

Géotechnique

Géotechnique appliquée au BTP



Pierre Martin

EYROLLES

Géotechnique appliquée au BTP

Du même auteur

Géomécanique appliquée au BTP, 2^e édition, 2005

Ces risques que l'on dit naturels, 2007

Chez le même éditeur

B. COUETTE. – *Guide pratique de la loi MOP*, 2005

P. GÉRARD. – *Pratique du droit de l'urbanisme*, 2007, 5^e édition

P. GRELIER WYCKOFF. – *Pratique du droit de la construction*, 2007, 5^e édition

Marchés publics et marchés privés

P. GRELIER WYCKOFF. – *Le mémento des marchés publics de travaux*, 2007, 3^e édition

Intervenants, passation et exécution (Le code des marchés publics 2006)

P. GRELIER WYCKOFF. – *Le mémento des marchés privés de travaux*, 2006, 2^e édition

Intervenants, passation et exécution

G. KARSENTY. – *Guide pratique des VRD et aménagements extérieurs*, 2004

G. KARSENTY. – *La fabrication du bâtiment*, tomes 1 et 2, 1997 et 2001

Géotechnique appliquée au BTP

Pierre Martin

EYROLLES

The logo for EYROLLES features the word "EYROLLES" in a bold, sans-serif font. Below the text is a horizontal line with a small grey circle centered underneath it.

ÉDITIONS EYROLLES
61, bld Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com



Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée notamment dans les établissements d'enseignement, provoquant une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2008, ISBN : 978-2-212-12271-8

TABLE DES MATIÈRES

Préface	1
Introduction	3
Trente cinq ans après	3
Des échantillons au site	3
Les principes	4
Les théories	4
Les méthodes	5
Les pratiques	5
L'efficacité de l'étude	6
I La géotechnique	7
1.1 Exemples édifiants	7
1.1.1 Les barrages hydrauliques	8
1.1.1.1 Barrages en remblais	9
1.1.1.2 Barrages-poids	10
1.1.1.3 Barrages-voûtes	11
1.1.2 Tassement, poinçonnement et... ruine	20
1.1.2.1 La tour de Pise	21
1.1.2.2 Autres édifices inclinés	24
1.1.2.3 Le silo à blé de Transcona (Winipeg) – Canada	25
1.1.2.4 Le Campanile de San Marco à Venise	27
1.1.2.5 Quelques ponts	28
1.1.3 Exemples probants	29
1.1.3.1 Décision inopportune	29
1.1.3.2 Étude contestée	30
1.1.3.3 Le géomécenicien ignorait la géologie	31
1.1.3.4 Décision opportune	33
1.2 Géotechnique	33
1.3 Aperçu historique	37
1.3.1 Dès l'Antiquité	38
1.3.2 À Venise	39

1.3.3	La guerre de places	40
1.3.4	La période scientifique	41
1.3.4.1	La mécanique des remblais	41
1.3.4.2	La mécanique des sols	42
1.3.4.3	L'hydraulique souterraine	46
1.3.4.4	La géophysique appliquée	47
1.3.4.5	Les sondages mécaniques	47
1.3.4.6	La mécanique des roches	48
1.3.4.7	La géologie de l'ingénieur	48
1.3.4.8	Les sciences de l'ingénieur	48
1.4	Évolution	49

2 Les principes 55

2.1	Cadre scientifique	55
2.1.1	Les disciplines	56
2.1.1.1	La géologie	56
2.1.1.2	La physique	57
2.1.1.3	La chimie	61
2.1.1.4	Les mathématiques	61
2.1.2	La géotechnique	62
2.1.2.1	Les objets	63
2.1.2.2	Les phénomènes	64
2.2	Les écoles géotechniques	68
2.2.1	Les sourciers	68
2.2.2	Les écoles rationnelles	70
2.2.2.1	L'école naturaliste	70
2.2.2.2	L'école physicienne	71
2.3	Langage et raisonnement	72
2.3.1	Le langage	72
2.3.1.1	Les mots	73
2.3.1.2	Les nombres	77
2.3.1.3	Les formules	78
2.3.1.4	Les logiciels	79
2.3.2	Le raisonnement	80
2.3.2.1	Les géotechniciens	80
2.3.2.2	Les autres intervenants	81
2.3.2.3	L'ordinateur	81

2.4 Le site et l'ouvrage	85
2.4.1 Étudier le site	85
2.4.2 Construire l'ouvrage	86
2.4.3 Retarder la ruine	87
2.4.4 Éviter les catastrophes	88
2.5 Le géotechnicien	89
2.5.1 Les acteurs de la construction	89
2.5.2 Le géotechnicien	90
2.5.2.1 Démarche	91
2.5.2.2 Attitude	92
2.5.2.3 Formation	93
2.5.2.4 Une équipe	94
2.5.2.5 Organisation professionnelle	95
3 Les théories	97
3.1 La prospective	98
3.1.1 L'irrationnel	100
3.1.1.1 La fatalité	101
3.1.1.2 Le hasard	101
3.1.2 La science	103
3.1.2.1 Réductionnisme ou holisme ?	107
3.1.2.2 Le déterminisme	108
3.1.2.3 La probabilité	109
3.1.2.4 La semi-probabilité	111
3.1.2.5 Les ensembles flous	111
3.1.2.6 Le chaos	112
3.1.2.7 Les systèmes critiques auto-organisés	114
3.1.3 Logique géotechnique	115
3.1.4 Les théories géotechniques	117
3.1.4.1 Représentation des formes	118
3.1.4.2 Étude des phénomènes	119
3.2 La modélisation	122
3.2.1 Modélisation analytique	126
3.2.1.1 Modélisation des formes	127
3.2.1.2 Modélisation du comportement	128
3.2.2 Le modèle géotechnique de synthèse	139
3.2.3 Représentativité des modèles	140
3.2.3.1 Matériau naturel, milieu géomécanique	141

3.2.3.2 Structures naturelles, figures géomécaniques	141
3.2.3.3 Phénomènes naturels, modèles de comportements	142
3.2.4 Validation des modèles – validité des résultats	142

4 Les objets	145
4.1 Le géomatériau	145
4.1.1 Caractères généraux	145
4.1.1.1 Morphologie	148
4.1.1.2 Paramétrie	149
4.1.1.3 Comportement	149
4.1.2 Organisation	153
4.1.2.1 Le système terrestre	154
4.1.2.2 Les cycles naturels	156
4.1.3 Le géomatériau français	161
4.2 Les phénomènes naturels	162
4.2.1 Évolution générale	163
4.2.2 Étude	165
4.2.3 Les phénomènes internes	166
4.2.3.1 Éruptions volcaniques	166
4.2.3.2 Séismes	167
4.2.4 Les phénomènes atmosphériques	171
4.2.4.1 Les phénomènes climatiques	171
4.2.4.2 Les phénomènes météorologiques	171
4.2.4.3 Phénomènes liés aux conditions atmosphériques	172
4.2.5 Les phénomènes externes	172
4.2.5.1 Les mouvements de terrain	173
4.2.5.2 Autres phénomènes externes	180
4.2.6 L'eau souterraine	180
4.2.6.1 Nappes d'eau souterraines	181
4.2.6.2 Circulations karstiques	182
4.2.6.3 Eau intersticielle	182
4.3 Les aménagements et les ouvrages	183
4.3.1 Les aménagements	183
4.3.1.1 Les zones	183
4.3.1.2 Les lotissements	184
4.3.1.3 Les tracés	184
4.3.2 Les ouvrages	184
4.3.2.1 Excavations et soutènements	185
4.3.2.2 Les remblais	191

4.3.2.3 Les chaussées	194
4.3.2.4 Les fondations	194
4.3.2.5 Captages d'eau souterraine	200
4.3.2.6 Réhabilitation des sites pollués	202
4.3.2.7 Stockage des déchets	203
4.4 L'accident géotechnique	204
4.4.1 Prospective	205
4.4.2 L'accident	206
4.4.2.1 Selon les dommages	207
4.4.2.2 Selon la cause	207
4.4.2.3 Apprécier le risque	208
4.4.2.4 Assurer la sécurité	209
4.4.3 Les causes	211
4.4.3.1 Causes naturelles	211
4.4.3.2 Accidents induits par l'ouvrage	213
4.4.3 Le risque économique	217
4.4.4 Effets pervers des aménagements	217
4.4.5 Comportements aberrants	219
4.4.6 La pollution	219
4.4.7 Paradoxe géotechnique	222
4.4.8 Les interventions	222
4.4.8.1 La prévention	222
4.4.8.2 La prévision	224
4.4.8.3 La protection	224
4.4.8.4 Les secours	225
4.5 Le site	225
4.5.1 Dimensions	226
4.5.1.1 Par rapport au temps	226
4.5.1.2 Par rapport à l'ouvrage	226
4.5.1.3 Par rapport à la structure géologique	226
4.5.1.4 Par rapport aux phénomènes	227
4.5.1.5 Par rapport à l'échelle d'observation	228
4.5.2 Modélisation	228
4.5.2.1 Modélisation géométrique	228
4.5.2.2 Modélisation du comportement	230

5 L'étude géotechnique231

5.1 Intérêt de l'étude	231
5.1.1 Adaptation de l'ouvrage au site	233

5.1.1.1	L'adaptation d'un immeuble	234
5.1.1.2	L'eau souterraine	237
5.1.1.3	Contourner la difficulté	237
5.1.2	Justification de l'étude	238
5.2	La méthode	240
5.2.1	Nécessité d'une méthode cohérente	240
5.2.1.1	Des sites difficiles à aménager	240
5.2.1.2	Un milieu naturel mal connu	242
5.2.1.3	Mesures et calculs	243
5.2.1.4	Des techniciens multiples	243
5.2.1.5	Confondre études et sondages	244
5.2.1.6	Site et étude géotechnique	245
5.2.2	Esquisse d'une méthode	246
5.2.2.1	Justification et limites	246
5.2.2.2	Un programme spécifique	248
5.2.2.3	Par le site ou par l'ouvrage	250
5.2.3	La méthode	252
5.2.3.1	L'observation	253
5.2.3.2	L'expérimentation	255
5.2.3.3	L'analogie	257
5.2.3.4	Un problème nouveau et unique	257
5.2.3.5	Conduite d'une étude	258
5.2.3.6	Normalisation de l'étude	259
5.3	Organisation de l'étude	260
5.3.1	Stratégie de la géotechnique	260
5.3.1.1	Bâtir le modèle géotechnique du site	260
5.3.1.2	Prévoir l'évolution du site	262
5.3.2	Tactique de l'étude géotechnique	262
5.3.2.1	Du général au particulier	263
5.3.2.2	Par étapes (par rapport à l'ouvrage)	264
5.3.2.3	Par phases (par rapport au site)	265
5.3.3	Les règles générales d'une conduite	270
5.3.3.1	Ordre et continuité	270
5.3.3.2	Faire assez mais pas trop	270
5.3.3.3	Un risque calculé	271
5.3.3.4	S'arrêter à temps	271
5.4	Déroulement de l'étude	272
5.4.1	Rôle du géotechnicien	272
5.4.1.1	Spécialisation	272

5.4.1.2	Connaissance du projet et analyse du site	273
5.4.1.3	Proposition et réalisation d'un programme d'étude	273
5.4.1.4	En tirer des renseignements pratiques	273
5.4.2	Les étapes	273
5.4.2.1	Avant projet sommaire (APS)	274
5.4.2.2	Avant projet détaillé (APD)	275
5.4.2.3	Spécifications techniques détaillées (STD)	276
5.4.2.4	Dossier de consultation des entreprises (DCE)	277
5.4.2.5	Contrôle général des travaux (CGT)	277
5.4.2.6	Réception des travaux (RDT)	278
5.4.2.7	Éviter l'accident	278
5.4.3	Les limites de l'étude	279
5.5	Les techniques	279
5.5.1	La géologie appliquée	281
5.5.1.1	La documentation	281
5.5.1.2	La télédétection	282
5.5.1.3	Les observations de terrain	282
5.5.2	La géophysique	282
5.5.2.1	La résistivité électrique	283
5.5.2.2	La gravimétrie	285
5.5.2.3	La sismique	285
5.5.3	L'instrumentation de terrain	287
5.5.3.1	Les sondages mécaniques	288
5.5.3.2	L'instrumentation permanente	299
5.5.4	Les essais de laboratoire	300
5.5.4.1	Les essais d'identification	301
5.5.4.2	Les essais mécaniques	301
5.5.6	L'informatique	303
5.6	Le résultat	303
5.6.1	Qualité du résultat	304
5.6.2	Critère de qualité	305
5.6.2.1	Les théories et les lois	306
5.6.2.2	Représentativité des modèles	307
5.6.2.3	Représentativité des paramètres	307
5.6.2.4	Représentativité des mesures	309
5.6.2.5	Validité des mesures	310
5.6.2.6	Précision des mesures	311
5.6.2.7	Précision des résultats	311
5.6.3	Gérer l'incertitude	312

5.6.3.1	Le coefficient de sécurité « déterministe »	312
5.6.3.2	Les coefficients « semi-probabilistes »	313
5.7	Le rapport	314
5.7.1	Les fonctions du rapport	314
5.7.2	L'interprétation	315
5.7.3	La forme	316

6 L'économie géotechnique323

6.1	Économie de l'ouvrage	323
6.1.1	Lors de l'étude du projet	324
6.1.2	Lors de la construction de l'ouvrage	324
6.1.3	Après la mise en service	326
6.2	Le commerce géotechnique	326
6.2.1	Le marché de la géotechnique	327
6.2.2	Fournisseurs et clients	329
6.2.3	Les risques du maître d'ouvrage	330
6.2.4	Structure du prix d'une étude	331
6.2.5	Le coût d'une étude	332
6.2.6	L'étude frelatée	333
6.2.7	Les prix vus par les géotechniciens	334
6.3	Attribution de l'étude	334
6.3.1	Attribution directe	335
6.3.1.1	Sur références	335
6.3.1.2	Par copinage ou concussion	335
6.3.2	Appel à la concurrence	335
6.3.2.1	Appels d'offres	336
6.3.2.2	Le maître d'ouvrage géotechnicien	339
6.3.2.3	Sévère sélection, concours limité et marché à commandes	340

7 La responsabilité du géotechnicien343

7.1	La garantie du risque géotechnique	343
7.1.1	Les limites de la géotechnique	345
7.1.2	Le risque calculé	346
7.2	Le contentieux géotechnique	348
7.2.1	Le contentieux amiable	350
7.2.2	Le contentieux judiciaire	351
7.2.2.1	L'expert judiciaire	352
7.2.2.2	Le tribunal	353

7.2.3 La garantie du géotechnicien	354
7.2.3.1 Nature de l'activité	355
7.2.3.2 Limites de la mission	355
7.2.3.3 Pièces contractuelles	356
7.3 Pour un droit géotechnique	357
7.3.1 La responsabilité des constructeurs	358
7.3.2 La responsabilité du géotechnicien	359
7.3.2.1 Position du géotechnicien dans l'acte de construire	360
7.3.2.2 Fondements de la responsabilité du géotechnicien	361
7.3.2.3 Obligation de moyens	363
7.3.2.4 Des règles qui évoluent	364
7.3.2.5 Des contraintes matérielles	365
7.3.2.6 Pas de pouvoir de décision	365
7.3.2.7 Responsabilité discutable	366
7.3.3 Les droits européens	366
7.4 La géotechnique et l'intérêt général	367
 Bibliographie	373
 Index	379

PRÉFACE

La géotechnique est complexe mais ne serait pas très compliquée si on ne la rendait pas telle en négligeant la géologie et en confondant les buts et les moyens, les études et les sondages.

Ses buts sont les études des sites que l'on a choisis afin d'y adapter les ouvrages que l'on va y construire et/ou de prévenir les risques que l'on y court. Les moyens tant intellectuels que matériels de les atteindre sont nombreux et variés ; tous sont utiles, certains sont nécessaires, aucun n'est suffisant ; la façon de les utiliser, la méthode, est loin d'être unanime.

La géophysique, la géomécanique et l'hydraulique souterraine sont les disciplines mathématisées de la géotechnique ; elles proposent et manipulent un milieu homogène, invariant..., et des modèles très schématiques, toujours éloignés du réel. Un sondage mécanique, un essai *in situ* ou sur échantillon ne concerne strictement qu'une fraction de matériau, hétérogène, variable... sur laquelle il s'exerce ; en étendre le résultat à une zone plus ou moins vaste du site n'est mathématiquement pas possible, même en recourant à la statistique. Les paramètres de Coulomb, de Hooke ou de Darcy, les milieux et les modèles de Rankine, de Fellenius, de Boussinesq, de Dupuit..., les conditions aux limites prêtées aux phénomènes étudiés, sont des abstractions commodes pour intégrer des équations de champ et manipuler les formules biunivoques qui en proviennent ; les résultats auxquels conduisent ces formules et leurs paraphrases informatiques, correspondent à des ordres de grandeurs qu'il est indispensable de connaître mais qu'il serait imprudent d'utiliser sans critique.

Pour réussir le passage de l'échantillon et/ou de l'essai au site, il est nécessaire de recourir à la géologie, à la géomorphologie, à la géodynamique... ; elles décrivent des matériaux et des modèles complexes mais nettement moins schématiques : la nécessité évidente de ce recours est sans doute la raison qui avait conduit Terzaghi à définir le géotechnicien comme un géologue qui serait aussi mécanicien et non comme un mécanicien qui serait aussi géologue ; pour étayer ce point de vue, je rappelle que la plupart des accidents géotechniques sont dus à l'inadaptation de l'ouvrage au site, à la méconnaissance de la géologie et non à des erreurs de calculs géomécaniques (*cf. 1.1*).

La nature n'est pas capricieuse ; le sol n'est pas vicieux : aux constructeurs de s'accommoder de ce qu'ils sont ; la géotechnique le leur permet. Les catastrophes ne sont pas naturelles : les effets paroxystiques mais normaux des phénomènes naturels sont catastrophiques quand on ne tient pas compte de leur éventualité ; la géotechnique permet d'éviter ou au moins, de prévenir les catastrophes.

« On ne résout pas les problèmes en sabrant leurs solutions » (Victor Hugo)

INTRODUCTION

Trente cinq ans après

La première forme de cet essai date de 1971 ; la dernière date de 1997. Entre temps, la géotechnique s'est fait un nom et une place parmi les géosciences et les techniques de la construction, de l'aménagement du territoire et de l'environnement ; mais elle a peu évolué, bien que durant ces trois dernières décennies, son domaine se soit sensiblement modifié. Aux autoroutes se sont ajoutées les voies ferrées à grande vitesse dont les tracés sont plus difficiles à adapter aux sites tourmentés. Les grands aménagements hydroélectriques, souvent montagnards, étaient à l'échelle régionale ; les centrales électronucléaires, relativement petites et généralement de plaines, sont à l'échelle locale. On a construit davantage de fragiles pavillons que de solides immeubles. Les grandes fouilles urbaines et les grands tunnels ferroviaires et routiers se sont multipliés. Les problèmes de pollution des nappes aquifères avaient largement dépassé ceux de leurs ressources et exploitations qui redeviennent d'actualité. Le respect de l'environnement qui ne faisait pas vraiment partie des préoccupations des aménageurs de naguère, est devenu l'élément favori d'un projet... Et malheureusement, les dommages aux chantiers et aux ouvrages sont aujourd'hui aussi fréquents qu'il y a trente cinq ans ; ils ont toujours d'aussi graves conséquences économiques et parfois même humaines, mais maintenant, les maîtres d'ouvrages et les juristes contestent souvent l'aléa géologique ou le vice du sol, traditionnellement évoqués par les constructeurs en difficulté.

Ainsi, le besoin de géotechnique efficiente est toujours actuel. Il faut donc rappeler aux praticiens et aux utilisateurs de la géotechnique, qu'il existe une méthode cohérente, stable, facile à mettre en œuvre et efficace. C'est ce qui justifie les éditions successives de cet essai dont la persistance est la meilleure preuve de son utilité.

Des échantillons au site

Le progrès technique général a permis d'améliorer les matériels et les procédés : on dispose facilement de photographies aériennes et satellitaires dédiées ; sur le terrain, on s'implante au GPS ; les sondeuses sont devenues hydrauliques et/ou électriques, plus ou moins automatiques ; les appareils de géophysique et d'essais *in situ* ont largement profité des développements de l'électronique et de l'informatique ; il en a été de même des appareils de laboratoire et de bureau ; les prises et exploitations de mesures, ainsi que les études elles-mêmes, ont été complètement transformées par l'informatique. Pourtant, les principes, les

théories, les méthodes et les pratiques n'ont pas changé : on confond encore géomécanique et géotechnique en faisant passer les campagnes de sondages et d'essais pour des études géotechniques et on ignore la géologie appliquée au BTP qui seule permet d'assurer le passage des échantillons au site, indispensable à l'étude géotechnique de quelque ouvrage que ce soit.

Les principes

Les principes de la géotechnique sont simples mais leur expression est compliquée, car ils procèdent à la fois de la géologie et de la physique, de l'observation, de l'expérimentation et du calcul. À partir du terrain, la géologie étudie la morphologie et le comportement des géomatériaux réels, roches et sols constituant le sous-sol d'un site, qui sont tangibles, discontinus, variables, hétérogènes, anisotropes, contraints, pesants et bien plus que cela : la nature les a faits ainsi et on ne peut que le constater. À partir de sondages et d'essais, la géomécanique les réduit aux milieux virtuels d'un modèle qui doivent être continus, immuables, homogènes, isotropes, libres, parfois non pesants et rien que cela : le traitement mathématique l'impose. Pour passer des premiers aux seconds, de la réalité à l'image, il suffit d'un peu d'imagination et d'usage ; pour repasser ensuite et nécessairement des seconds aux premiers, des échantillons au site, il faut ajouter que les géomatériaux ne sont pas désordonnés, que leurs hétérogénéités et leurs comportements ne sont pas aléatoires, mais qu'au contraire, ils sont structurés de façon tout à fait cohérente, ce qui ramène à la géologie : tout résultat d'essai et de calcul géomécanique incompatible avec une observation géologique, est inacceptable en géotechnique.

Les théories

La plupart des théories géologiques sont établies depuis longtemps et sont largement vérifiées par l'observation : tectonique des plaques – accréation, subduction ; cycle géologique – surrection, érosion, transport, sédimentation, diagenèse, métamorphisme ; cycle de l'eau – évaporation, transport atmosphérique, précipitations, ruissellement, infiltration, résurgence... La plupart des géomécaniciens n'en tient pas souvent compte ou même les ignore.

Dans l'état actuel de nos connaissances mais sans doute par essence, une théorie unitaire de la géomécanique ne peut pas être formulée ; ses théories restreintes de formes artificiellement simples sont trop particulières pour être généralisées ; elles ont une origine occasionnelle : confronté à un problème technique nouveau, un praticien a essayé de le résoudre en s'appuyant sur l'étude expérimentale d'un phénomène qu'il supposait influent et qu'il a isolé ; les lois de Hooke, de Coulomb, de Darcy, les théories proposées par Terzaghi, Ménard... sont plutôt des hypothèses que l'usage ne valide pas toujours. Et même en admettant la possibilité d'une généralisation prudente, on se heurte au difficile passage des échantillons au site ; la géomécanique le fait par intégration

d'équations de champs dans des intervalles de définition et des conditions aux limites imposées par la technique de calcul plutôt que par la prise en compte de la réalité, ce qui conduit à des modèles extrêmement schématiques, même si l'on admet que les matériaux des échantillons représentent bien les géomatériaux du site. Mais la géomécanique ignore ce que sont réellement les géomatériaux d'un site, car elle ne les représente que par quelques paramètres et elle ne manipule que quelques données ponctuelles obtenues par sondages et essais, tellement peu nombreuses qu'il serait ridicule de leur attribuer une quelconque valeur statistique.

Les méthodes

Les méthodes de la géologie sont anciennes et éprouvées : documentation pour éviter de perdre son temps à retrouver ce que d'autres ont décrit et savaient, indispensables observations de terrain, télédétection, mesures géophysiques, sondages étalons... synthétisés par des cartes et des coupes à diverses échelles. Rares sont les géomécaniciens qui en utilisent et même qui éprouvent le besoin d'en disposer.

Les méthodes de la géomécanique, sondages mécaniques pour établir des coupes et recueillir des échantillons que l'on voudrait « intacts », essais sur ces échantillons, calculs... sont les objets de normes, directives et formules dont le respect est censé les rendre parfaitement sûres ; le constructeur d'un ouvrage endommagé sera certainement considéré comme responsable du dommage souvent qualifié un peu vite de « géotechnique », si l'on considère qu'il ne les a pas respectées, ce qui est le plus souvent subjectif mais difficilement réfutable devant un juge.

Afin de définir une méthode cohérente de l'étude géotechnique, il serait vain de remettre en question tout ce dont on dispose ; on n'aurait en effet rien d'autre à proposer. Par contre, on peut d'abord recenser et critiquer les principes, les théories et les méthodes de la géologie, de la géophysique, de la géomécanique, de l'hydraulique souterraine... pour essayer d'en tirer un fonds commun qui servira de base à cette étude.

Les pratiques

L'étude géotechnique est aussi une opération commerciale généralement engagée après consultation ou appel d'offres, et réglée par un contrat de louage de service qui lie le géotechnicien au maître d'ouvrage ; mal préparée, mal conduite, parfois frelatée, cette opération peut entraîner des déboires économiques et même des dommages matériels au chantier et/ou à l'ouvrage ; il est donc indispensable d'en définir le cadre et d'en critiquer la pratique.

Ainsi l'activité professionnelle du géotechnicien est une source de responsabilité fondée sur des lois et règlements qu'il doit connaître et respecter, mais

qu'il peut aussi critiquer : généralement, il n'intervient pas directement sur l'ouvrage ni même au delà de l'avant-projet ; vis-à-vis du maître d'ouvrage, il n'a alors qu'une obligation de moyens, pas de résultat ; il n'est donc pas un constructeur au sens de la loi. Ce n'est évidemment pas ce que voudraient les assureurs des constructeurs et leurs conseils : ils essaient toujours de convaincre les juges du contraire ; ils peuvent y parvenir si le géotechnicien n'a pas clairement spécifié la nature et les limites de son intervention dans son contrat et dans son rapport. Pour garantir les constructeurs d'un ouvrage endommagé, il pourrait évidemment devoir répondre de son obligation si ses conseils les avaient induit en erreur, mais alors, ce serait à eux de le démontrer.

L'efficacité de l'étude

Ma conception de la géotechnique est fondée sur une connaissance de la géologie, de la géomécanique, de l'art de l'ingénieur, du commerce et du droit acquise par l'étude, la lecture, la conversation, l'expérience et la pratique de tous les jours pendant plus de quarante ans ; son application impose d'utiliser avec prudence, le peu que l'on sait et dans lequel on n'a qu'une confiance limitée, pour répondre à des questions précises qui engagent des intérêts plus sérieux que son propre prestige. Elle est justifiée par l'efficacité de l'étude : ça marche ou ça ne marche pas. Et il faut toujours que ça marche !

Afin d'alléger ce texte, je ne m'étendrai pas sur ce qui est classique en géotechnique ou que j'ai traité dans d'autres ouvrages ; sans excès de formalisme, j'insisterai par contre sur ce qui, même de façon insolite, peut éclairer la géotechnique sous un angle original ou révélateur pour justifier une démarche pragmatique et cohérente.

« Une des bases de la méthode expérimentale est le doute... Il n'y a de vérité absolue que pour les principes mathématiques ; pour tous les phénomènes naturels, les principes desquels nous partons, de même que les conclusions auxquelles nous arrivons, ne présentent que des vérités relatives » (Claude Bernard).

1.1 Exemples édifiants

Un ouvrage de BTP doit être propre à sa destination et le rester durant son utilisation ; s'il n'en va pas ainsi, ce peut être parce qu'il n'a pas été correctement adapté aux particularités de son site de construction pour des raisons qu'il importe de déterminer. On ne peut évidemment pas endommager volontairement un ouvrage ou même une de ses parties pour déterminer expérimentalement sa limite d'usage ; les essais destructifs que l'on entreprend parfois au début de grands chantiers sur quelques éléments secondaires prototypiques ainsi que les essais classiques de laboratoire et de terrain ont des résultats pratiques spécifiques, rarement généralisables. L'observation et l'analyse du comportement réel d'ouvrages accidentellement endommagés est donc le seul moyen dont dispose par défaut la géotechnique pour contrôler et accroître son corpus, justifier et valider ses théories, modèles et méthode ; il faut étudier ce qui n'a pas marché pour éviter que cela se reproduise : le retour d'expérience et l'expertise géotechnique après un dommage, un accident, une catastrophe sont donc les seules actions de recherche et développement géotechnique efficaces, à condition d'être réalisées par des géotechniciens compétents et expérimentés.

Les ouvrages dont les dommages voire la ruine ont été évités ou du moins retardés fort longtemps, sont innombrables et variés, de tout temps et de tous lieux ; s'il n'en était pas ainsi, rien de durable n'existerait : pour éviter ces dommages, il faut et il suffit d'être compétent, expérimenté, consciencieux, actif et attentif ; affirmation apparemment évidente et/ou stupide, qui mérite d'être illustrée. Mais on peut toujours attribuer l'absence de dommage à la chance plutôt qu'au savoir-faire : les exemples que fournissent les ouvrages intacts risquent donc de n'être ni très convaincants ni très instructifs ; par contre, les exemples que fournissent les ouvrages endommagés le sont toujours, car leurs dommages traduisent invariablement le défaut de savoir-faire et non la malchance : en fait, la plupart des dommages qui affectent les ouvrages, quels qu'en soient le type et les dimensions, résultent de la négligence voire de l'ignorance des décideurs et/ou des constructeurs insoucians, présomptueux, parcimonieux... : études géotechniques manquantes, erronées, insuffisantes, mal interprétées voire négligées ou même frelatées, contrôles géotechniques des études techniques et des chantiers absents..., entraînant des erreurs et défauts de conception, d'exécution et/ou d'entretien... des ouvrages. On en travestit les causes en fatalité, hasard, malchance... pour ne pas perdre la face, se donner bonne conscience ou plutôt fuir ses responsabilités, individuelles mais aussi collectives.

Il est très rare que la cause d'un dommage ou d'un accident à un ouvrage soit une erreur de calcul géomécanique ; un tel calcul repose sur des théories, des

procédés, des modèles et des formules généraux dont la pertinence doit être critiquée au cas par cas, et sur des données spécifiques plausibles mais peu nombreuses et incertaines : les résultats sont toujours des ordres de grandeur que par précaution, on minimise par de substantiels coefficients de sécurité ; en fait, la principale cause est la négligence ou même l'ignorance de la morphologie et du comportement naturels du site de construction, entraînant l'inadaptation de l'ouvrage au site : la géotechnique ne se réduit donc pas à la géomécanique qui n'est que son outil physico-mathématique. Les conditions dans lesquelles un ouvrage est endommagé sont spécifiques et ne peuvent pas être reproduites ; même un petit ouvrage courant est un prototype, car son site est unique : ce qui s'est passé ici ne se produira pas forcément là ; on ne peut donc étudier les accidents géotechniques qu'en enquêtant pour reconstituer virtuellement chacun et en tirer un retour d'expérience qui ne sera pas forcément généralisable, mais toujours utile ; il est indispensable de le faire, car ce sont des expériences ratées, les seules qui permettent de justifier, de faire progresser la géotechnique, de démontrer son utilité et d'accroître l'expérience des géotechniciens.

Les exemples évidemment exceptionnels qui suivent, montrent clairement que la géotechnique mécaniste mais surtout naturaliste est indispensable à l'art de construire : l'ignorer conduit presque toujours au dommage, à l'accident, voire à la catastrophe.

1.1.1 Les barrages hydrauliques

Les aménagements hydrauliques, barrages et retenues, sont des ouvrages complexes fragiles qui perturbent fortement la morphologie et le comportement, tant mécanique qu'hydraulique de leurs sites ; leurs études doivent faire appel à toutes les disciplines, géologie, géomécanique, hydraulique... et toutes les techniques, documentation, télédétection, levés de terrain, géophysique, sondages, galeries, essais... de la géotechnique. Presque toujours catastrophiques pour l'aval, les ruptures de barrages, heureusement assez rares, sont ainsi des exemples particulièrement instructifs ; elles surviennent le plus souvent en périodes de temps anormalement pluvieux quand arrive une grosse crue inattendue, alors que le plan d'eau de la retenue est déjà à sa cote maximum et que l'évacuateur de crue se révèle insuffisant, ou bien par désorganisation partielle ou totale des fondations due à des fuites dans des roches d'assise perméables et sensibles à l'eau, en soumettant le contact barrage/terrain à la poussée hydrostatique qui le claque et/ou en provoquant des renards qui le sapent. Mais on va voir que si les causes géotechniques des catastrophes que produisent ces ruptures paraissent déterminantes – ce sont elles que l'on décrit toujours –, ce sont les décisions et comportements aberrants des décideurs, des constructeurs et/ou de ceux qui ont charge de l'entretien qui le sont réellement, mais on évite généralement de les montrer.

1.1.1.1 Barrages en remblais

De la simple levée à la grande digue, les barrages en remblais, terre ou enrochements, sont de très loin les plus anciens et les plus nombreux au monde ; adaptés à toutes sortes de sites, ce sont en effet les plus simples et les moins onéreux à construire, en empilant des matériaux locaux ; ce sont aussi les plus fragiles, car même protégés en surface, les matériaux dont ils sont construits sont très sensibles à tous les effets de l'eau, imbibition, infiltration, érosion... Il faut assurer la stabilité et l'imperméabilité du massif et de l'assise, le risque de renards en cas de fuites, la défense contre les vagues en amont, contre l'érosion par la pluie en aval..., mais surtout l'insubmersibilité, car un débordement est toujours fatal : il se crée rapidement une brèche incontrôlable par laquelle s'engouffre toute l'eau de la retenue. Ils ne sont devenus sûrs que dans les années trente, grâce aux études géomécaniques systématiques de Terzaghi.

► South Fork Dam (Johnstown) – Pennsylvanie

Le barrage en remblais perreyés sur le South Fork Run, sous-affluent de l'Alleghany tributaire de l'Ohio, a eu une histoire incohérente dont la fin fut dramatique : construit en 1852 pour soutenir le canal de Pennsylvanie, à une quinzaine de kilomètres en amont de Johnstown qui avait déjà subi de violentes crues, il était long de 284 m, haut de 22 m, large de 83 m en pied et de 3 m en crête ; sa retenue de 19 M m³ d'eau, était longue de plus de 3 km ; à l'époque, c'était la plus grande des États Unis. Désaffectée dès 1857 après l'arrivée du chemin de fer, elle fut pratiquement abandonnée ; en 1862, une première rupture due à un défaut de la galerie centrale de prise d'eau et de vidange, alors que la retenue n'était qu'à moitié pleine, n'eut pas de graves conséquences ; ensuite, une érosion locale de crue abaissa le niveau de la crête de plus de 1 m. L'ouvrage ne fut réparé qu'en 1879, avec beaucoup de désinvolture, par un club de pêche et chasse des maîtres des forges de Pittsburg qui construisirent sur ses rives quelques résidences de loisir : on obstrua de façon sommaire la galerie de vidange endommagée et l'entrée de l'évacuateur de crues creusé dans la roche de la rive large de 22 m mais seulement profond de 2,75 m, fut grillagée et jamais curée afin d'empêcher le passage des poissons vers l'aval ; c'était le seul exutoire et il ne pouvait plus faire passer que le tiers de son débit insuffisant d'origine, environ 170 m³/s. Dès lors connu pour être dangereux, plusieurs fausses alertes estompèrent le risque. Dans la nuit du 30 mai 1889, un épisode de violents orages sur tout l'ouest des monts de Pennsylvanie, déclencha une crue torrentielle de 350 m³/s qui fit monter le niveau de la retenue à près de 0,5 m/h ; on essaya de nettoyer et approfondir l'évacuateur, d'en ouvrir un sur l'autre rive, mais le 31 dans l'après-midi, la retenue déborda, créant une brèche dans l'axe du barrage, d'abord lentement et de petites dimensions puis de plus en plus rapidement jusqu'à atteindre 130 m de large et 20 m de haut ; en moins d'une heure, une onde de plus de 10 m de haut ravagea l'aval mais épargna en partie Johnstown ; malheureusement, une embâcle d'arbres et de débris obstrua les arches d'un pont ferroviaire à l'aval et son remous noya la ville ; un incendie de pétrole de lampes d'éclairage allumé par les fourneaux de cuisine acheva la catastrophe en se propageant à l'ensemble de la ville ! Il y eut plus de 2 200 victimes et plus de 1 500 disparus.

1.1.1.2 Barrages-poids

Les barrages-poids sont adaptés aux vallées modérément larges dont les versants rocheux peuvent être plus ou moins profondément altérés, mais imperméables et indéformables aux pressions relativement faibles qu'ils leur transmettent, 20 bars au plus ; ils ont d'abord été construits en maçonnerie, puis en béton coulé classique, plus récemment en béton corroyé, en fait remblais de géomatériaux locaux traités au ciment. Peu affectés par les débordements, ils peuvent être ruinés par la désorganisation partielle ou totale de leurs fondations due à des fuites, claquage du contact barrage/terrain par la poussée hydrostatique, renards...

► Puentes – Murcie

Construit de 1785 à 1791 sur le rio Gadalentín dans le haut bassin du rio Sangonera, à 12 km à l'WNW de Lorca, le barrage de Puentes était l'un des premiers barrages-poids de l'époque préindustrielle, à son époque le plus grand du monde ; soigneusement construit, un massif de maçonnerie paré de pierres de taille était long de 278 m, haut de 50 m, large de 44 m en pied et 11 m en crête. En majeure partie fondé sur un substratum rocheux solide et imperméable, il enjambait un sillon épigénique large de 20 m, comblé par des alluvions fragiles et perméables ; les constructeurs avaient bien remarqué cette hétérogénéité et l'avaient traitée avec les moyens insuffisants dont ils disposaient à l'époque : une forêt de pilotis réunis en tête par un treillis de madriers bloquant un radier de fondation épais de plus de 2 m ; pendant plus de dix ans le niveau de la retenue insuffisamment alimentée ne dépassa jamais 25 m ; néanmoins, des fuites inévitables ont peu à peu érodé l'axe de l'assise du barrage, déchaussant et désorganisant insidieusement la partie correspondante du massif, mais personne ne s'en préoccupa. Le 30 avril 1802, une violente crue emplit la retenue en quelques heures, pour la première et seule fois ; un renard détruisit alors les fondations sur le sillon et un bouchon de maçonnerie large de 15 m et haut de 30 m sauta ; la soudaine et inattendue inondation d'aval que provoqua la vidange rapide de la retenue, fit plus de 600 victimes jusqu'à Lorca.

► Bouzey – Vosges

Le barrage de Bouzey à l'ouest d'Épinal, est un ouvrage-poids en maçonnerie long de 525 m, haut de 20 m, fondé sur le grès bigarré triasique ; sa retenue de 7 M m³ soutient le canal de l'Est. Mise en eau en 1880, des fuites de plus en plus importantes se produisirent sous l'ouvrage à mesure de la montée de l'eau ; le 13 mars 1884, un glissement partiel de la fondation, environ 150 m de long sur 0,5 m de flèche et la fissuration de la maçonnerie en décollant, obligea à vider la retenue et à conforter l'ouvrage, corroi d'argile en amont, contreforts en béton en aval, reprises de la maçonnerie fissurée. La remise en eau se fit en 1890 ; le 27 avril 1895, la partie haute de la maçonnerie de qualité médiocre, trop mince et mal réparée céda ; il y eut 87 morts à l'aval. C'est en cherchant les causes du glissement de sa partie centrale que Dumas mis en évidence le rôle des infiltrations sous l'ouvrage et notamment celui de la poussée hydrostatique qu'il appela sous-pression, agrandissement des fissures, décollement et claquage du contact barrage/terrain, deuxième cause de rupture de ces ouvrages.

À nouveau réparé, le barrage existe encore et sa retenue qui alimente toujours le canal est aussi devenue un plan d'eau touristique.



Photo 1.1.1.2 – Le barrage de Bouzey

Vue de l'aval – prise du canal de l'Est.

Incrustations : plaque commémorative – vue RD, évacuateur de crue

► St. Francis – Californie

Mise en eau le 1^{er} mars 1926, la retenue de St. Francis, d'un volume de 47 M m³, était destinée à alimenter Los Angeles en eau ; elle faisait partie d'un aménagement général hydroélectrique et d'adduction du versant est de la Sierra Nevada. Construit dans le canyon de San Francisquito débouchant dans la vallée de Santa Clara, le barrage était un ouvrage-poids en béton, long de 213 m, haut de 62 m, large à la base de 53 m et de 5 m en crête ; il était fondé en grande partie sur des micaschistes plus ou moins délités, et à l'ouest, pour le tiers supérieur de la rive droite, sur un conglomérat de grave plus ou moins cimentée à lits de sable et d'argile, résistant à sec, mais se désagrégeant dans l'eau ; au contact, la roche était serpentinisée, ce qui en faisait une surface potentielle de glissement ; le site n'avait pas fait l'objet d'étude géotechnique, de sorte que les risques de désagrégation du conglomérat sous l'effet de l'immersion, de glissement sur le contact et de renards en cas de fuites n'avait même pas été envisagés par les constructeurs ; en cours de remplissage, des fuites auxquelles ils ne prêtèrent pas beaucoup d'attention, se manifestèrent en rive droite ; le 12 mars 1928, alors que le remplissage venait à peine de s'achever à la faveur d'une crue, un glissement du conglomérat au contact du micaschiste puis le délitage du conglomérat provoquèrent la rupture de l'ouvrage et la violente inondation consécutive fit plus de 400 victimes à l'aval, dans la vallée de Santa Clara.

1.1.1.3 Barrages-voûtes

Les barrages-voûtes imposent des vallées étroites (largeur/hauteur < 3), des gorges dont les versants raides, parfaitement stables naturellement, sont

constitués de roches massives d'excellente qualité, susceptibles de ne pas se déformer sensiblement sous la pression de leurs fondations, plus de 30 bars pour les voûtes épaisses et jusqu'à 80 bars pour les voûtes minces ; pour réduire cette pression, les semelles de répartition sont dangereuses car elles favorisent l'effet hydrostatique, claquage et renard, en cas de fuites. Ces ouvrages et leurs assises se déforment légèrement sous la pression de l'eau de la retenue ; il importe donc de contrôler rigoureusement ces déformations pendant toute la durée de la mise en eau et jusqu'au remplissage complet de la retenue pour vérifier qu'elles demeurent dans les limites acceptables de l'élasticité linéaire. Les fuites au large doivent être impérativement prévenues par des voiles d'injections imperméabilisants, puis de façon analogue, celles susceptibles de se produire durant la vie de l'ouvrage.

► Malpasset – Var

Construit sur le Reyran, dernier affluent rive gauche de l'Argens, au NW de l'agglomération de Fréjus/Saint-Raphaël, le barrage de Malpasset était une voûte très mince de 225 m de long en crête et 66 m de haut, dont la retenue aurait atteint 50 M m³ ; elle était destinée à l'alimentation en eau de la plaine agricole côtière, de l'agglomération et des communes environnantes, en cours d'urbanisation touristique.

Le barrage était implanté vers la limite sud du massif du Tanneron, sur un petit horst cristallin ~ NE-SW, qui barre le graben stéphanien ~ N-S du Reyran. La roche subaffleurant sur les versants est un gneiss feuilleté plus ou moins riche en micas, lardé de filons de pegmatite minéralisée dont certains étaient alors exploités en amont dans de petites mines à flanc de coteau. Selon l'endroit, son faciès varie de la roche massive et dure à l'arène oxydée très friable, son litage de schistosité est en principe ~ N-S subvertical, parallèle aux versants, mais en fait plus ou moins variable en direction et pendage, et l'ensemble est extrêmement fracturé à toutes les échelles d'observation et selon des directions et des pendages très différents, N-S, ESE-WNW, NE-SW ... Là où il est plus ou moins profondément arénisé, le gneiss est sensiblement perméable. Le Reyran traverse le horst dans un défilé sinueux qui n'est toutefois pas une véritable gorge (l/h ~ 3,5) : à l'emplacement du barrage où, de direction N-S, il est le plus étroit, le gneiss est plutôt massif et peu altéré mais très fracturé sur le versant droit (ouest) dont la pente est d'environ 40°, tandis qu'il est très altéré, strictement aval-pendage sur le versant gauche (est) dont la pente est d'environ 30°.

Tout cela n'était pas vraiment favorable à une voûte très mince ; le premier et seul géologue consulté au seul niveau des études préliminaires, avait conseillé la construction d'un barrage-poids plus en amont ; il ne fut pas écouté, plus consulté, et la géotechnique se réduisit à l'exécution d'une carte géologique de terrain montrant un gneiss presque partout subaffleurant, apparemment sain pour des non géologues, et à quelques sondages mécaniques tout aussi rassurants ; il n'y eut aucun véritable suivi géotechnique de chantier. Le Reyran étant un oued pratiquement sec la plupart du temps, on ne fit pas de galerie de dérivation durant le chantier, qui aurait permis d'observer le gneiss en profondeur ; on utilisa simplement le dispositif de vidange définitif au pied de l'ouvrage ; pas d'évacuateur de crue latéral non plus et donc pas de terrasse-

ments qui auraient permis d'observer le gneiss en subsurface ; le déversoir de crue était une simple échancrure au sommet du barrage, dont le seuil était haut calé pour obtenir le volume maximum de retenue. Vers la fin du chantier, les constructeurs eurent pourtant quelques doutes : en rive gauche, l'extrémité du barrage très mince était pratiquement parallèle aux courbes de niveau et au litage de schistosité du gneiss plus ou moins altérée, donc sans butée naturelle, essentielle pour ce type de barrage ; ils la bloquèrent par un massif en béton. Les injections de collage ont été sommaires et il n'y a pas eu de voile au large puisque l'on considérait que le gneiss était imperméable. Le souci principal des constructeurs était la recherche systématique du moindre coût !

La mise en eau débuta en 1954 ; le premier remplissage fut anormalement long à cause d'une sécheresse pluriannuelle sévère et d'une procédure judiciaire pour l'expropriation de la mine de fluorine de la Madeleine ; ainsi, l'indispensable contrôle du comportement de tout barrage lors de sa mise en service, ne fut pas très rigoureux ; les classiques mesures périodiques de déformations ne furent jamais attentivement interprétées. La réception de l'ouvrage et le paiement de l'entreprise intervinrent bien avant que la retenue soit entièrement utilisable !

Comme il arrive souvent en Provence après une longue période de sécheresse, il se produisit une courte période de pluies diluviennes durant la deuxième quinzaine de novembre 1957 – 500 mm en dix jours dont 130 mm en 24 h, le 2 décembre. Il s'ensuivit une crue très rapide et très violente, car le bassin versant du Reyran est relativement petit, ses versants sont assez raides, le gneiss et les schistes subaffleurants y sont pratiquement imperméables, et la végétation de maquis est clairsemée. Le niveau de la retenue qui était à une dizaine de mètres de la crête du barrage monta alors très rapidement – 4 m en 24 h - ; il se produisit des suintements à l'aval de l'ouvrage, qui devenaient de véritables sources à mesure que l'eau montait. On décida néanmoins de ne pas ouvrir la vanne de vidange pour éviter des dommages au chantier de construction de l'autoroute A8, situé 1 km à l'aval ; on l'ouvrit finalement le 2 décembre à 18 h, alors que l'eau était prête à déborder, très au-dessus du niveau de service et même de celui de sécurité du barrage ; l'effet sur la montée de l'eau fut insignifiant. Le barrage explosa littéralement à 21 h 13, libérant 50 M m³ d'eau en quelques heures ; une onde de 50 m de haut déferla à 70 km/h dans la plaine côtière de l'Argens et dans les quartiers ouest de Fréjus qu'elle atteignit en moins de vingt minutes, ne laissant aucune possibilité de fuite aux occupants de la zone balayée par l'eau ; elle fit 423 victimes et des dégâts matériels considérables, routes, voies ferrées, fermes, immeubles... détruits.

Après la catastrophe, il ne restait sur le site que la base de la partie droite de l'ouvrage, légèrement décollée du gneiss et basculée vers l'aval et un fragment du massif de blocage de l'extrémité rive gauche, déplacé de près de 2 m vers l'aval. Sur le versant gauche, on observe toujours un dièdre de failles très obtus aval pendage, figure classique d'éboulements rocheux ; le coin de roche qui le remplissait a disparu avec la partie de barrage qu'il supportait. Des blocs de béton et de roche sont disséminés dans la vallée jusqu'à plus d'un kilomètre de distance.



Photo 1.1.1.3.a – Les ruines du barrage de Malpasset vues de l’aval

S'appuyant sur de solides études géotechniques, le collège de trois experts désigné par le tribunal de Draguignan montra que la cause immédiate de la rupture était l'effet des fuites d'eau sous l'ouvrage, pression hydrostatique (sous-pression) qui a provoqué le claquage des failles en dièdre du versant gauche puis pression hydrodynamique (renards) qui a déblayé le coin de gneiss sans doute très fracturé et altéré ; par de sérieuses références bibliographiques, il précisa que cette cause plus que fréquente de ruptures de barrages était parfaitement connue depuis longtemps (*cf. Puentes, Bouzay, St. Francis*). Il relevait l'absence totale d'étude et de contrôle géotechniques, le manque de rigueur dans le contrôle du premier remplissage, l'ouverture trop tardive de la vanne de vidange... On peut y ajouter le mauvais choix d'implantation et de type d'ouvrage ; en fait, l'économie drastique comme principe de construction.

Cela engageait la responsabilité pénale des constructeurs ; leurs défenseurs firent désigner un deuxième collège d'experts qui, ne pouvant faire autrement, confirma l'effet des fuites d'eau sous l'ouvrage ; mais il contredit les autres conclusions du premier collège, en soutenant spécieusement que ce phénomène clairement décrit et expliqué par Dumas à propos de Bouzey était quasi inconnu à l'époque de la construction du barrage, qu'il échappait à l'investigation directe, que son effet néfaste n'avait pu être mis en évidence qu'au cours des expertises consécutives à la catastrophe, que les connaissances, les méthodes et les moyens de la géotechnique au moment de la construction n'étaient pas les mêmes qu'au moment du procès dont l'instruction a été très longue, et même que les règles de l'art de construire ce type de barrage n'imposaient pas l'usage de la géotechnique : on ne pouvait donc pas s'appuyer sur les acquis des expertises pour charger les constructeurs qui avaient fait un ouvrage techniquement irréprochable en tant que tel ! Ainsi, aucune faute professionnelle ne pouvait leur être reprochée ; leur responsabilité personnelle, tant pénale que civile, a été dégagee.

La fatalité sous son double aspect juridique de cas fortuit et de cas de force majeure, a aussi été écartée : la catastrophe ne pouvait pas être assimilée à un cas fortuit puisque les experts des deux collèges en avaient parfaitement établi la cause immédiate ; et elle n'était pas un cas de force majeure puisque si cette cause était bien irrésistible et à la rigueur imprévisible, elle n'était sûrement pas extérieure à l'ouvrage ; c'était bien le comportement anormal de l'ouvrage qui

avait fait céder son assise. Pas de responsable, mais pas de fatalité ; comprenez qui pourra ! Le droit a parfois des raisons que la géotechnique ne connaît pas.

En l'absence de responsable, les assureurs des constructeurs n'ont dû d'indemnité à personne ; il ne restait donc qu'à suivre le principe de l'égalité de tous devant les charges publiques, traditionnellement évoqué en matière de travaux publics pour indemniser les tiers mais pas les usagers, pour les dommages causés par l'existence d'un ouvrage d'intérêt public et *a fortiori*, par sa destruction. Et c'est ainsi que le département du Var, maître d'ouvrage qui n'avait pas les moyens de ses ambitions et avait donc imposé aux constructeurs des « économies » à tous les niveaux par manque permanent de crédits, fit deux fois, et même au delà, les frais de l'opération. Pour les particuliers, c'est surtout la générosité publique qui a assumé la charge financière des dommages.

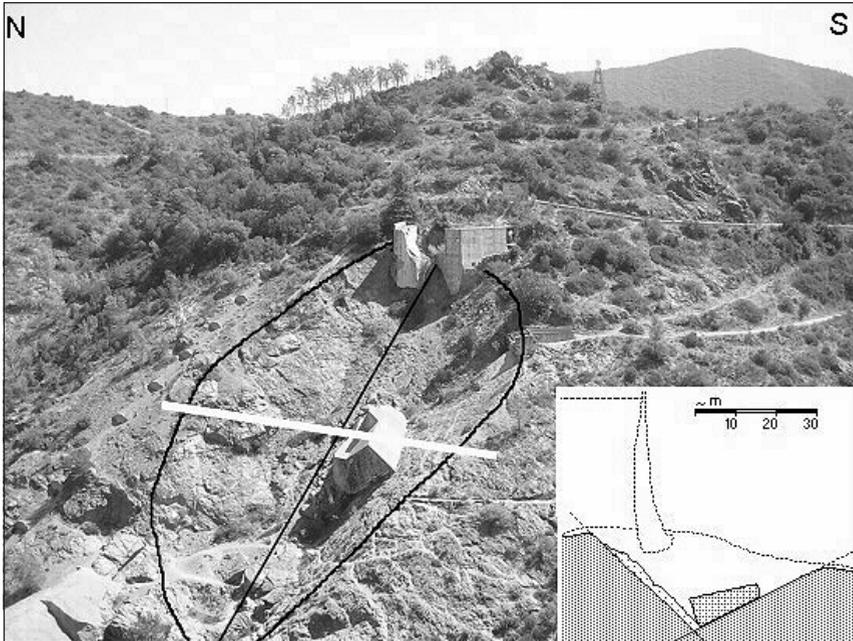


Photo 1.1.1.3.b – Le dièdre de failles de la rive gauche

Des morceaux de l'extrémité du barrage et du massif de blocage sont restés en place ; quelques blocs de béton sont tombés dans le dièdre.

En 1966, à la suite de cette catastrophe, le Comité technique permanent des barrages a été créé. Cet organisme est constitué de divers spécialistes de la construction de ce type d'ouvrage dont la hauteur dépasse 21 m ; mais l'époque de la construction des grands ouvrages en France était alors presque révolue. Pour échapper à son contrôle, on y construit maintenant des ouvrages de hauteur inférieure ; or un barrage de plaine, très long et peu élevé peut créer une retenue dont le volume est comparable à celui d'une retenue de haut barrage de

montagne, et être donc aussi dangereux que lui en cas de rupture (cf. *South Fork – 22 m, Bouzay – 20 m*).

Pour remplacer Malpasset et étendre son service à l'ouest des Alpes maritimes, le barrage de Saint-Cassien sur la Siagne a été étudié et construit beaucoup plus sérieusement ; il ne menace personne et sa retenue se remplit chaque année. On peut aussi noter que l'aqueduc romain dont on voit quelques arches au nord de Fréjus, y amenait déjà les eaux de la Siagne : les Romains savaient donc que le Reyran au bassin versant très petit et au régime fantasque, n'était pas utilisable pour une adduction permanente.

► **Le Vajont (Longarone) – Vénétie**

Un sasso è caduto in un bicchiere colmo d'acqua e l'acqua traboccata sulla tovaglia. Tutto qui. Solo che il bicchiere era alto centinaia di metri e il sasso era grande come una montagna, e di sotto, sulla tovaglia, stavano migliaia di creature umane che non potevano difendersi. Dino Buzzati, *Corriere della Sera*, 11 octobre 1963.

Une pierre est tombée dans un verre d'eau et l'eau s'est répandue sur la nappe. Rien de plus. Sauf que le verre était haut d'une centaine de mètres, que la pierre était aussi grande qu'une montagne et qu'au-dessous, sur la nappe, il y avait des milliers de gens sans défense.

Construit sur le Vajont, affluent rive gauche du haut Piave, fleuve torrentiel alpin qui aboutit à l'est de la lagune de Venise, le barrage est une étroite voûte longue en crête de 195 m et haute de 265 m, longtemps la plus haute du monde et la deuxième hauteur de barrage tous types confondus. Le volume de sa retenue aurait dépassé 180 M m³ à la côte maximum 725 m ; le Vajont lui-même n'était pas suffisant pour alimenter cette retenue ; mais cet ouvrage était le noyau de l'aménagement hydroélectrique du haut Piave : toutes les eaux captées et turbinées par les barrages d'altitude, se déversaient dans sa retenue pour y être stockées et alimenter la retenue finale du Val Gallina et la centrale de Serzene ; l'ensemble avait été étudié, construit et était exploité par la Sade, *Società adriatica di elettricità*.

Le barrage est implanté à l'entrée d'une étroite et profonde cluse de calcaire massif plus ou moins karstique subhorizontal du Dogger, qui débouche à ~ 1,5 km de là dans la vallée du Piave où se trouve Longarone ; en amont de la cluse, les versants d'une combe beaucoup plus large sont essentiellement constitués de marno-calcaires du Malm localement coiffés d'une dalle de craie du Crétacé supérieur. L'aménagement de ce site exceptionnel, particulièrement favorable à ce type de barrage, avait été étudié dès le début du xx^e siècle, mais en 1937, le risque de glissements du versant gauche (sud) dominé par le mont Toc, avait été clairement établi lors des premières études : la dalle de calcaire, aval pendage ~ 15° au pied du versant, se redresse progressivement pour devenir aval pendage ~ 40° vers le sommet, et sa couverture marno-calcaire épaisse de 300 à 400 m était en fait constituée de matériaux plissotés, indice de glissements anciens de type fractal sur une surface de contact argileuse soumise à la pression hydrostatique variable des eaux infiltrées dans le réseau karstique du calcaire.

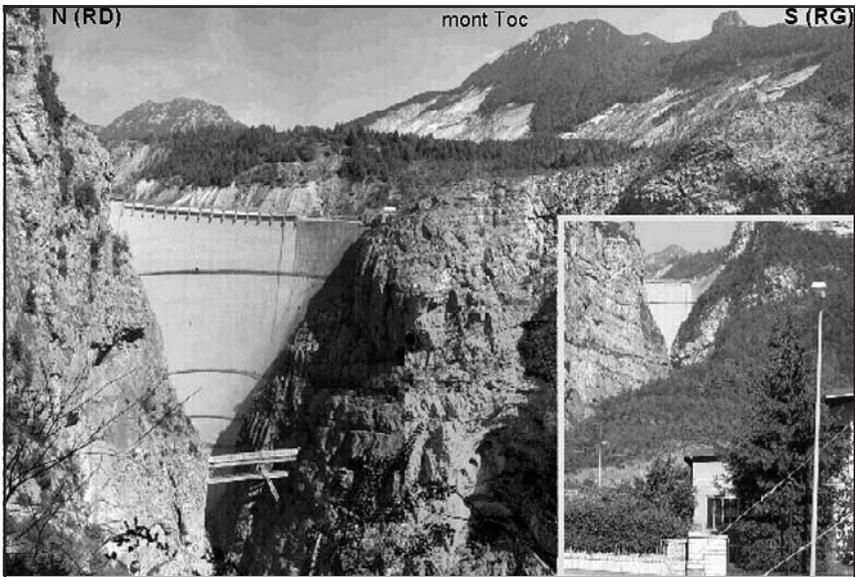


Photo 1.1.1.3.c – Le barrage du Vajont vu de l’aval

*Sous le mont Toc, on voit les surfaces du deuxième glissement ;
derrière le barrage, on voit la partie haute de son bourrelet de pied
– en incrustation, vue de la cluse et du barrage depuis Longarone.*

La mise en eau a commencé en 1960 ; on s’est rapidement aperçu que le versant gauche était effectivement instable : arbres inclinés, fissures du sol, pertes des ruissellements, fissuration des constructions, petits glissements, micro-séismes... Le 4 novembre 1960, alors que la retenue avait atteint la cote 650, un premier glissement de 700 000 m³ atteignit le lac en un quart d’heure, provoquant une seiche de 10 m de haut qui butta contre le barrage car la retenue n’était qu’à mi-hauteur ; sous la crête du mont Toc, la partie amont de la surface de glissement apparut au toit de la dalle calcaire ; pour palier l’obstruction du fond de la retenue et relier ses deux parties, on établit une dérivation souterraine en rive droite ; puis on procéda à l’étude géotechnique du site de façon particulièrement sérieuse, détaillée et complète ; durant un an, alors que la retenue était maintenue à la cote 600, les mesures de déplacements de nombreux repères sur l’ensemble du site montraient un ralentissement, mais pas un arrêt, du glissement ; par contre, une étude sismique avait montré que le massif instable s’était fortement décomprimé par foisonnement, ce dont on ne tint pas compte ; la montée de la retenue à la cote 700 réactiva les mouvements : il devenait évident qu’un grand glissement était susceptible de se produire, favorisé par l’immersion du pied du versant instable ; on redescendit la retenue à la cote 650 et les mouvements ralentirent de nouveau ; mais selon un modèle mathématique basé des hypothèses hydrauliques et sur l’interprétation des données de l’étude géotechnique, la hauteur de la seiche que provoquerait le glissement ne dépasserait pas 25 m ; par « sécurité », il suffisait donc de maintenir la hauteur d’eau de la retenue 25 m sous la crête du barrage, soit à la cote 700. On discutait aussi

la forme que prendrait ce glissement, lent et fractionné ou rapide et monolithique, en privilégiant la première, beaucoup moins dangereuse et ne compromettant pas l'usage de l'aménagement. La nationalisation de l'aménagement du Piave était en cours ; pour obtenir le meilleur prix d'expropriation, la Sade minimisait les risques !

Depuis 1960, certains repères s'étaient déplacés de plus de 4 m. En juin 1963, rassuré par les indications du modèle, on remit la retenue à la cote 700 : les mouvements accélérèrent ; puis deux semaines de pluies diluviennes – 10 mm/j le 15 septembre, 40 le 2 octobre, 200 le 8 – rendit le niveau de la retenue incontrôlable malgré l'ouverture de deux conduits de vidanges sur le côté gauche du barrage, ce qui a accéléré le mouvement en accroissant la charge hydraulique dans le massif ; et c'est un glissement plan sur le toit de la dalle, rapide et monolithique, analogue au précédent mais bien plus grand, qui se produisit le 9 octobre 1963 à 22 h 45 ; la hauteur de la seiche qui ne devait atteindre que 25 m dépassa 200 m dans la partie aval de la retenue : le choc d'arrivée du bourrelet de pied du glissement – 270 M m³ à plus de 50 km/h -, à quelques centaines de mètres en amont du barrage créa deux seiches, une vers l'amont qui balaya sans grand dommage les rives du lac, agricoles mais à peu près désertes la nuit, l'autre vers l'aval qui atteignit les premières maisons du village de Casso, 250 m au-dessus de la crête du barrage, sur lequel elle passa sans le détruire ; elle s'engouffra dans la cluse et haute de près de 70 m déboucha en moins de 5 mn dans la vallée du Piave où elle s'étala, noyant sous 30 M m³ d'eau Longarone et de nombreux villages alentour, faisant 2018 victimes – en fait, on n'a jamais su combien – et des dégâts considérables.

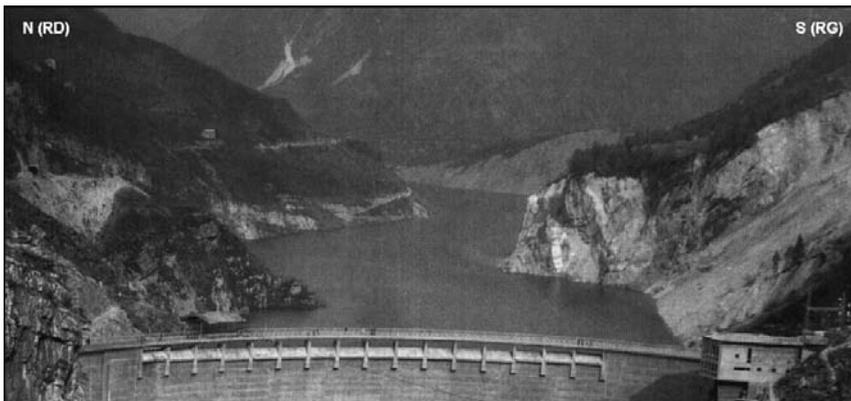


Photo 1.1.3.1.d – Avant la catastrophe

Le lac est vers la cote 650, limite de sécurité. On voit la surface de premier glissement en RG et son bourrelet en RD, la masse instable du deuxième glissement en RG ainsi que d'autres cicatrices de glissements au deuxième plan.

Long de plus de 2 km dans le sens de la vallée, large de près de 1 km, haut de plus de 250 m, le bourrelet de marno-calcaire a glissé en bloc, sans trop se disperser ; il a buté contre le versant droit en y montant sur plus de 100 m de

haut, ensevelissant la route et barrant totalement et définitivement la vallée à une altitude supérieure à celle du barrage. Les mouvements de ce glissement plan typique directement liés au niveau de l'eau dans la retenue qui fragilisait le pied de la masse instable, ont été brusquement accélérés par des pluies diluviennes : une énorme quantité d'eau a ruisselé dans la partie haute du versant, sur la niche d'arrachement décapée du précédent glissement qui, en partie, fonctionnait comme bassin de réception d'un court torrent ; elle s'est rapidement infiltrée dans le karst calcaire et sous sa couverture marno-calcaire qui s'est décollée de la dalle calcaire sous l'effet de la pression hydrostatique et a glissé pratiquement sans frottement sur une lame d'eau peut-être vaporisée, en quelques minutes.

L'ampleur, la rapidité – 1/4 d'heure – et la violence de l'événement ne pouvaient donc pas être prévues par la géomécanique qui manipule hors du temps des matériaux doués de frottement, de cohésion... ; c'est pourtant toujours ainsi que se produisent les grands glissements-plans de montagne, quasi instantanés en phase finale, comme ceux du Granier, du Claps du Luc ou du Rossberg.

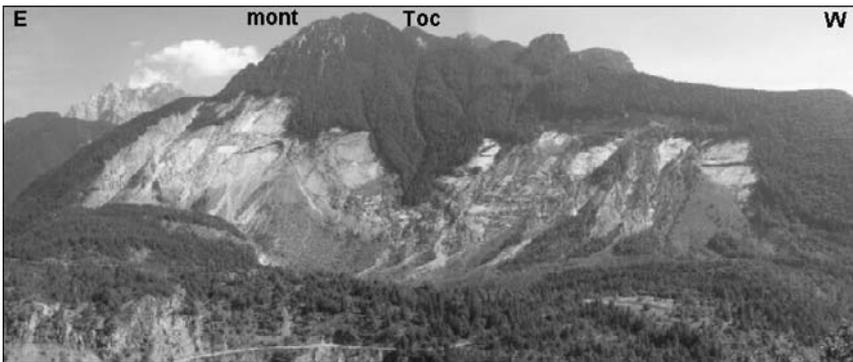


Photo 1.1.3.1.e – Le deuxième glissement vu de Casso

On voit les surfaces d'arrachement sous le mont Toc et le bourrelet de pied au premier plan.

Les conclusions des collègues d'experts italiens administratifs et judiciaires étaient qu'un tel phénomène était imprévisible car ses caractéristiques, dimensions, vitesse, effets... étaient inconnus jusqu'alors ; il n'y avait donc pas de responsable. Mais un collègue d'experts internationaux critiqua sévèrement l'interprétation entachée de lacunes et d'erreurs des données objectives des études, ainsi que la pertinence du modèle géomécanique qui avait permis d'affirmer péremptoirement que le glissement serait relativement lent et que la vague ne dépasserait pas 25 m ; elle montra aussi que des glissements de pareilles ampleur et rapidité s'étaient déjà produits un peu partout dans le monde et avaient eu des conséquences analogues en bordures de fjords et de lacs d'Alaska, de Norvège ou même de Suisse ; elle concluait que, compte tenu de l'incertitude sur le scénario de l'événement attendu et notamment sur la hauteur de la seiche, le niveau de l'eau dans la retenue n'aurait jamais dû être aussi haut et qu'au vu des données objectives des études, la catastrophe était

prévisible. Il y eut des condamnations à des peines de prison pour certains constructeurs, confirmées en appel.

Le barrage existe toujours mais ne retient plus d'eau ; en amont du bourrelet, un lac que l'on peut vider à volonté par la dérivation souterraine, subsiste mais n'est pas utilisé pour l'aménagement hydroélectrique. Une chapelle, des ex-voto et des panneaux explicatifs ont été implantés sur une plate-forme dominant le barrage ; à Erto, en amont du glissement, il y a un petit musée commémoratif.

À la sortie du défilé de Malpasset, à côté du pont de l'autoroute, il n'y a rien ; les touristes sont accueillis par une buvette qui vend des guides de visite !

1.1.2 Tassement, poinçonnement et... ruine

La plupart des géomatériaux superficiels sont plus ou moins compressibles et ont une pression de rupture plus ou moins grande ; n'importe quel ouvrage construit sur autre chose que du rocher dur inaltéré subit un tassement plus ou moins important ; plus la différence entre la pression de service de ses fondations et la pression de rupture du géomatériau d'ancrage est faible et plus ce dernier est compressible, plus le tassement sera important. Tant que cette différence est relativement grande, si le géomatériau est latéralement homogène et si la structure de l'ouvrage est équilibrée, le tassement est uniforme et régulier : l'ouvrage s'enfoncé d'autant moins et d'autant plus lentement que la différence est plus grande, mais il ne s'incline pas et sa structure, si elle est solide, ne subit pratiquement aucun dommage ; si ce géomatériau est hétérogène, ce qui est presque toujours le cas, l'ouvrage subit des tassements dits différentiels : il s'incline plus ou moins et/ou se déforme et généralement, il se fissure ; dans les deux cas, le phénomène décroît progressivement dans le temps et s'arrête plus ou moins vite selon la différence de pressions et la compressibilité du géomatériau, car à mesure que le temps passe, le géomatériau se compacte, sa compressibilité décroît, ce qui entraîne l'accroissement de sa pression de rupture et donc de la différence. Les dommages à un ouvrage qui subit un tassement uniforme et régulier seront limités voire nuls si l'ampleur et la durée du tassement ont été correctement estimées par le calcul et l'expérience, et si sa structure et ses liaisons avec l'extérieur ont été adaptées aux estimations ; pour s'en assurer, il faut mesurer le tassement en fonction du temps durant la construction et souvent même lors de sa mise en service en évitant qu'elle soit trop rapide. Le tassement doit évidemment diminuer puis s'arrêter ; s'il ne le fait pas, c'est que la différence de pression et la compressibilité du géomatériau étaient trop faibles : après un début de tassement régulier mais limité et rapide, le tassement devient différentiel et l'ouvrage s'incline ; la pression transmise par les fondations croît du côté le plus abaissé, ce qui augmente le tassement tandis qu'elle diminue de l'autre côté, ce qui arrête le tassement local voire entraîne un gonflement si la pression devient nulle : l'inclinaison s'amplifie et la pression côté incliné croît de plus en plus ; si elle atteint la pression de rupture du géomatériau, l'ouvrage se couche si sa structure est solide et rigide ou se disloque. Si le poids de l'ouvrage en service est à peu près égal à celui de sa structure, le tassement se stabilise peu à peu, l'inclinaison éventuelle reste faible

et l'ouvrage subsiste ; c'est le cas des clochers qui, un peu partout, penchent plus ou moins. Si le poids de l'ouvrage en service dépasse largement celui de la structure et même varie dans le temps, les tassements différentiels augmentent jusqu'à entraîner une inclinaison incompatible avec l'utilisation de l'ouvrage qui peut s'effondrer si sa structure n'est pas solide ; c'est le cas des réservoirs, mais surtout des silos à grain dont on ne compte pas les destructions.

1.1.2.1 La tour de Pise

Implantée dans un site particulièrement ingrat, la plaine alluviale fluvio-marine subactuelle de l'embouchure de l'Arno, dont le sous-sol est constitué d'une couche épaisse de plus de 300 m de matériaux sablo-argileux aquifères peu consistants, très compressibles, la tour penchée de Pise existe depuis plus de huit siècles ; la pérennité de ce chef-d'œuvre d'architecture qui est aussi un chef-d'œuvre géotechnique montre qu'un aléa, inconnu et impossible à comprendre à l'origine, n'entraîne pas nécessairement la ruine d'un ouvrage si l'on en corrige les effets en temps voulu et si l'on entretient l'ouvrage durant toute sa vie.

Son inclinaison est impressionnante, environ 5° vers le sud, soit environ 5 m de faux aplomb pour environ 20 m de diamètre à la base et environ 57 m de hauteur, mais elle n'a jamais menacé de s'écrouler spontanément : en la regardant attentivement de l'est ou de l'ouest, on voit qu'elle penche moins en haut qu'en bas, car son aplomb a visiblement été progressivement corrigé au cours de son édification : ses constructeurs successifs ont sans doute rapidement compris que le sous-sol du site n'était pas stable ; ils surveillaient donc attentivement leur ouvrage dont la construction a duré près de deux siècles, de 1173 à 1350, en deux ou trois phases d'une dizaine d'années chacune ; ils l'arrêtaient quand les mouvements devenaient inquiétants comme vers 1180 au niveau du quatrième étage et en 1278, au niveau de la terrasse du sixième, et la reprenaient en rectifiant un peu l'inclinaison quand les mouvements s'atténuaient. Ainsi, grâce à cette pratique qui permettait la lente consolidation des matériaux du sous-sol de son assise sous l'effet de son propre poids, grâce à sa surprenante silhouette de banane, la tour existe toujours.

Il en va au contraire différemment quand on essaie de la redresser ou de sinon arrêter, du moins ralentir son mouvement ; jusqu'à la dernière, trop récente pour que l'on puisse en apprécier le résultat définitif, toutes les interventions sur les fondations se sont soldées par une aggravation sensible et rapide de l'inclinaison : en 1838, lors du creusement du trottoir périphérique destiné à observer la partie basse de la tour enterrée par le tassement, le mouvement qui était à peu près arrêté, a fortement repris, 40' de plus d'inclinaison, soit 45 cm de plus de faux aplomb ; en 1934, injection de ciment dans les fondations : + 31" d'inclinaison, soit + 8 mm de faux aplomb ; au cours des années 1960/70, pompages dans la nappe aquifère : + 41" d'inclinaison, soit + 10 mm de faux aplomb ; en 1985, intervention sur les fondations : 10" d'inclinaison, soit + 2,5 mm de faux aplomb ; en 1995, encore des travaux sur les fondations dont le principal résultat a été une véritable panique, car on a craint un moment l'effondrement ! Épais d'environ 10 m, les matériaux superficiels sur lesquels

est directement fondée la tour sont plutôt sableux, assez consistants et auraient supporté sans poinçonner la pression moyenne d'environ 5 bars que son radier de fondation leur transmettrait si elle était droite ; l'inclinaison se traduit par des tassements d'environ 1,3 m au nord et de 2,8 m au sud, de sorte que la pression est d'environ 0,5 b au nord et d'environ 10 b au sud. On pense que cela est dû d'abord au fait que ces matériaux sont un peu plus compacts au nord qu'au sud et à la présence d'une couche d'argile molle plus ou moins fluente au-delà de 10 m.

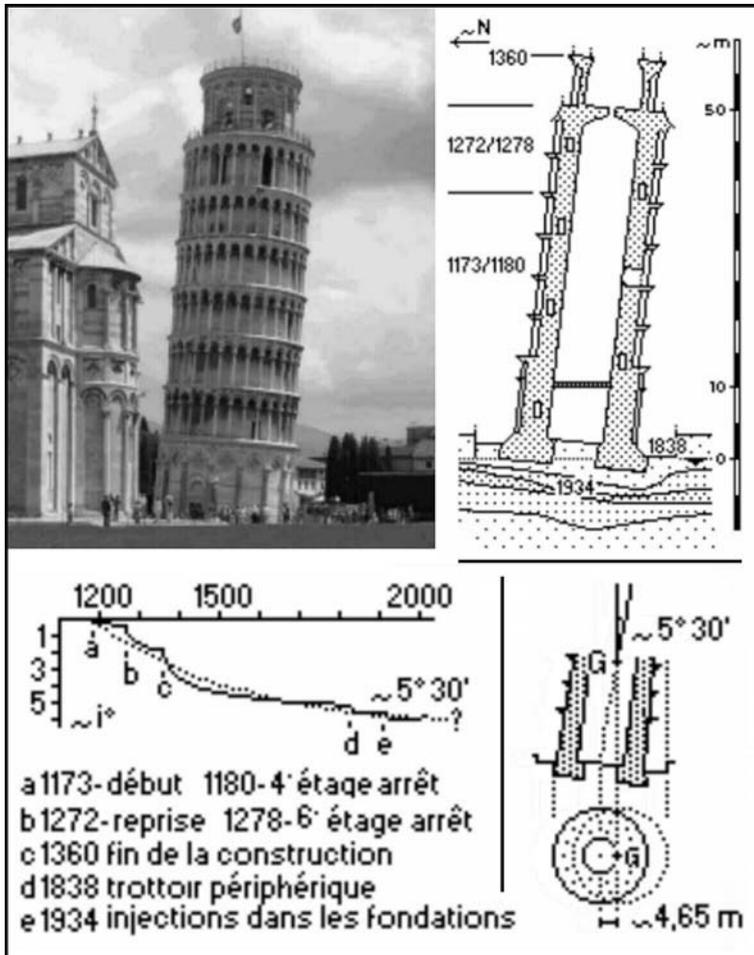


Photo 1.1.2.1 – La tour de Pise

Son aplomb a été rectifié au cours de sa construction : elle penche moins en haut qu'en bas.

Grâce à la géomécanique, on peut donc maintenant expliquer l'inclinaison de la tour par les tassements différentiels de sa fondation, mais plus simplement, on

constate en descendant sur son parvis, que ce tassement dépasse 2 m au total, ce qui est tout aussi ahurissant que son inclinaison ; on a fait aussi des mesures de faux aplomb très précises, moins de 1 mm/an d'accroissement au cours du XX^e siècle, mais on sait que la tour a commencé à pencher dès le début de sa construction ; certains géomécaniciens ont pu néanmoins prétendre qu'elle était devenue instable au point de prédire son écroulement dans un délai très proche ; le délai de certaines prédictions est même déjà passé depuis pas mal de temps !

De nombreuses commissions d'experts ont étudié le comportement de la tour en vue d'éviter cet écroulement tant de fois prédit, mais qui heureusement ne s'est pas produit ; demeurées théoriques, leurs études n'ont longtemps servi qu'à alimenter des querelles d'experts et la perplexité des décideurs. Après l'effondrement d'un campanile à Pavie en 1989, qui a fait 4 victimes, on a fermé par précaution l'accès à la tour en février 1990 et une 17^e commission a repris les études de la 16^e qui dataient de 1965. Sans attendre ses conclusions on a décidé de renforcer la structure de la tour, ce qui était une excellente chose, facile à faire ; on a ainsi cerclé ses parties les plus dégradées au moyen de câbles d'acier précontraints : les fissures se sont alors un peu fermées. Selon le diagnostic de la commission publié en 1993, il importait de ralentir le mouvement, ce qui se fait plus ou moins naturellement à très long terme ; c'est difficile à réaliser comme l'ont montré diverses tentatives mais cela peut être une bonne chose à court terme pour rassurer les contemporains : chercher à redresser un tout petit peu la tour est en fait la quête plus médiatique que technique du Graal de la géotechnique pisane.

Ce qui a alors été décidé ne rassurait pas vraiment : en 1993, après modélisation et simulations multiples, on a placé au pied du côté nord qui a le moins tassé, un contrepoids de 600 tonnes de plomb pour diminuer de 1° 30' soit environ 1,2 m de moins de faux aplomb : cette curieuse façon de traiter le tassement différentiel général en surchargeant le côté qui tassait le moins et dont on disait même qu'il se soulevait, n'a pas eu l'effet escompté : le gain d'inclinaison n'a été que de 52'' et donc le faux aplomb n'a gagné que 13 mm, mais... le tassement c'est accru de 2,5 mm ! En 1995, on a congelé le sous-sol du côté sud, ce qui a accru l'inclinaison jusqu'au risque d'effondrement ; on a alors arrêté les travaux et ajouté 230 t de lest au nord pour arrêter l'inclinaison mais, conséquence inévitable, on a encore accru le tassement. Avec la 18^e commission, cela est devenu un peu surréaliste mais plus prudent : elle a d'abord fait établir un modèle numérique très compliqué pour tester les effets possibles des différentes solutions envisagées, puis fait bâtir un modèle en vraie grandeur près du pignon ouest du cimetière pour valider la solution retenue, ancrer la partie nord par des tirants puis extraire par forage à la tarière un peu de matériau sous la partie nord de la fondation afin de faire tasser ce côté sans faire tasser l'ensemble et enfin injecter le sous-sol côté sud ; cette solution a été préférée à une autre envisagée, reprise en sous-œuvre au moyen de micropieux ancrés vers une cinquantaine de mètres de profondeur ; elle a ensuite fait haubaner la tour au niveau du 3^e étage le temps d'exécuter les travaux.

L'opération terminée après une dizaine d'années d'études plus ou moins sérieuses et de travaux plus ou moins imprudents voire dangereux, et pour plus de 25 M, on aurait arrêté pour un temps indéterminé le mouvement, l'incli-

naison aurait diminué de 0° - $15'$ et le faux aplomb de 22,5 cm, soit un gain d'environ 4 % alors que l'on visait au moins 10 %.

On dit que cette « réparation » doit assurer encore deux à trois siècles de vie à la tour de Pise, mais bien savant ou plutôt bien inconscient serait qui pourrait l'affirmer. Que durera encore la tour ? Un jour, un an, dix ans, un siècle, dix siècles ou même plus ? Tout dépendra en fait de l'intérêt que l'on continuera ou non à lui témoigner et des bêtises que l'on évitera de faire en essayant de la conforter et surtout de la redresser inconsidérément.

1.1.2.2 Autres édifices inclinés

On trouve à peu près partout des édifices plus ou moins inclinés qui sont devenus stables ou du moins très peu évolutifs et sont ainsi demeurés fonctionnels.

À Bologne il y a deux tours penchées voisines datant du haut Moyen Âge ; celle des Asinelli a 97 m de haut mais penche relativement peu ; la Garisenda a 47 m de haut et un faux aplomb d'un peu plus de 3 m ; elles sont stables. L'ensemble est spectaculaire ; selon l'endroit d'où on les regarde, elles semblent se toucher ; on a dit que les constructeurs les ont fait pencher volontairement pour montrer leur habileté, mais cela est peu probable.

En France, parmi les plus spectaculaires, il y a le clocher du xvi^{e} siècle de Saint-Martin d'Étampes qui inquiète beaucoup moins que sa sœur de Pise, car il est stable ; redressé lui aussi en cours de travaux, il penche moins en haut qu'en bas, 5° au plus. Il y a aussi la tour de la porte de Soisson de l'enceinte de Laon ; elle se serait inclinée d'environ 15° peu de temps après sa construction à la suite d'un glissement sur la bordure de la butte témoin où est établie la vieille ville ; elle a pu être incluse dans l'enceinte car elle ne s'est pas disjointe. Il y a encore une tour wisigothe intégrée à l'enceinte intérieure de la cité de Carcassonne au xiii^{e} siècle, qui se serait inclinée de près de 10° lors des terrassements des basses lices ; elle a été reprise en sous-œuvre par un blocage en pied et surmontée d'un étage vertical, car elle non plus ne s'était pas disjointe ; l'ensemble est stable depuis lors.

La plupart des édifices des très nombreuses villes construites sur des côtes basses, généralement des deltas, comme Venise ou Amsterdam, tassent plus ou moins. À Venise qui est aussi un remarquable musée géotechnique, la plupart des constructions sont bien fondées et leurs structures sont adaptées aux petites déformations de sorte que, si l'ensemble de la ville tasse continuellement, on n'y trouve que très peu d'ouvrages endommagés et les rares qui tombent en ruine le font par défaut d'entretien ; le clocher de San Stefano stabilisé par des contreforts implantés dans un petit canal et celui de San Giorio dei Greci penchent visiblement ; quelques autres penchent plus ou moins. À Amsterdam, de nombreux vieux immeubles sont plus ou moins inclinés, gondolés, fissurés, car ils ont subi des tassements différentiels importants ; certains sont confortés par des poutres en bois et des tirants en acier ; toujours habités, leurs occupants s'en accommodent.

Mexico est construite sur l'ancien lac en grande partie remblayé de Texcoco, dans une vaste cuvette volcanique dont le sous-sol est composé de sédiments sablo-argileux très récents, épais de plus de 700 m ; leurs trente premiers mètres essentiellement argileux, sont très compressibles, peu résistants, saturés en eau, avec pour certains niveaux colloïdaux, des paramètres d'Atterberg particulièrement élevés : $I_p \sim 375 \%$, $W_p \sim 125 \%$, $W_L \sim 500 \%$! Depuis son origine, la ville s'enfonçait lentement ; l'enfoncement y est devenu particulièrement rapide et spectaculaire, plus de 6 m au milieu du xx^e siècle, en raison du poids croissant de l'agglomération et de l'intensification des pompages d'eau souterraine ; plus ou moins inclinés mais toujours fonctionnels comme la basilique de N.D. de la Guadalupe, de nombreux bâtiments anciens présentent pratiquement tous les exemples de comportements et de déformations possibles selon leur type de structure et leur mode de fondation ; c'est sans doute une des raisons pour lesquelles le 7^e congrès international de mécanique des sols s'y est tenu en 1969. L'Opéra et palais des Beaux-Arts y a été un exemple particulièrement instructif, car sa construction commencée en 1904, ne s'est achevée qu'en 1934 en raison de nombreuses difficultés géotechniques qui, compte tenu de l'état des connaissances et des techniques de l'époque, auraient pu être évitées : fondé sur un trop lourd radier en béton de 2,5 m d'épaisseur, il a tassé uniformément de près de 2 m en raison de 1 à 5 mm par an, mais grâce à la rigidité de son radier, à la solidité et à la tolérance de sa structure métallique bien équilibrée portant des parements de marbre et des cloisons de briques, il l'a fait sans autre dommage et notamment, sans s'incliner. Comme il avait commencé à tasser dès le début de sa construction, pour arrêter ou au moins ralentir le phénomène, il aurait fallu rapidement modifier son système de fondation en allégeant le radier et en y ajoutant des pieux ; en 1910, alors qu'il n'était plus possible de le faire, on a essayé d'injecter du ciment sous le radier mais la granulométrie trop fine des sédiments n'a pas permis d'y parvenir efficacement ; en 1915, on a entouré l'édifice d'une enceinte de palplanches métalliques sans plus de succès ; pour permettre l'accès à l'édifice dont le rez-de-chaussée était pratiquement devenu un sous-sol à la fin de la construction, il ne restait plus qu'à l'entourer d'une esplanade en contrebas de la voirie générale ; c'est ce que l'on a fait.

1.1.2.3 Le silo à blé de Transcona (Winnipeg) – Canada)

Les groupes de silos comptent parmi les ouvrages les plus délicats à fonder, car leur charge répartie dans de nombreuses cellules varie constamment et rapidement dans le temps et dans l'espace ; les silos qui sont tombés en ruine partout dans le monde ne se comptent pas ; le décor et le scénario sont toujours les mêmes : sous-sol compressible et fondations superficielles, inclinaison rapidement croissante à la suite d'un chargement trop rapide et désordonné, et éventuellement d'un incident secondaire comme une période de fortes pluies, un dégel rapide...

Le silo à blé de Transcona, près de Winnipeg était un ouvrage parallélépipédique compact et rigide en béton armé de surface environ 24x60 m, haut d'environ 30 m, constitué de 65 cellules cylindriques juxtaposées reposant sur un sous-sol en caissons et un radier en béton armé de 0,6 m d'épaisseur à 3,5 m

de profondeur. À vide, il pesait environ 20 000 t soit une pression de service d'environ 1,4 b et en charge environ 47 500 t soit une pression d'environ 3,3 b.

Le site de construction est le fond d'un lac glaciaire asséché ; sous environ 3 m de remblais argileux récents, il y a 10 m d'argile vaseuse peu consistante reposant sur un substratum calcaire.

À la fin du printemps 1913, à la suite d'un dégel très rapide, le remblai haut de 9 m de la voie ferrée qui longe le silo tassa fortement et on mit la voie sur pieux ancrés dans le calcaire. La construction du silo s'est terminée en août 1913 sans que l'on se soit intéressé à la cause de cet accident et donc sans que l'on ait contrôlé le tassement éventuel de l'ouvrage à vide ; le stockage de blé uniformément réparti commença en septembre, toujours sans contrôler le tassement ; 45 jours après, le 17 octobre, quand on eut stocké 22 000 t de blé, le silo s'enfonça brusquement de 0,3 m, puis s'inclina vers l'ouest en poinçonnant l'argile pour se stabiliser 24 h après avec une inclinaison de 27°, quand son côté abaissé buta sur le calcaire ; un bourrelet haut de 3 m se forma devant le côté abaissé et un fossé de 1,5 m se forma sur le côté relevé. La structure qui ne se déforma pratiquement pas, put être reprise en sous-œuvre sur des puits descendus au calcaire et redressée au moyen de vérins ; après réhabilitation de la structure, le silo put être normalement mis en service ; cela a été possible parce que la structure était solide, le calcaire pas très profond et parce que ceux qui ont entrepris cette opération étaient très ingénieux, audacieux et habiles.

Aucune étude géotechnique n'avait été réalisée par les constructeurs ; ils s'étaient contentés de quelques essais de plaque en fond de fouille qui avaient indiqué que la pression de rupture de l'argile variait de 2,5 à 3,6 bars ; bien que très proche du maximum, ils fixèrent à 3,4 b la pression maximum en charge transmise à l'argile, valeur couramment adoptée pour des ouvrages voisins hors zone lacustre, ce que l'absence de connaissance géologique ne permettait pas de savoir, sans se préoccuper de l'épaisseur, de l'hétérogénéité et de la compacité de l'argile sous le radier. L'étude plus sérieuse réalisée longtemps après l'accident permit d'établir la coupe du sous-sol par sondages et de mesurer sur échantillons la résistance à la compression simple R_c de l'argile qui variait de 0,7 à 1,2 b, soit une pression de rupture Q_1 de 4 à 6 b selon la formule de Terzaghi, $Q_1 = R_c * N_c$ avec $R_c = 2c$ et $N_c = 5,7$ pour $\varphi = 0$. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles obtenues au moyen des essais de plaque, mais on les minimise par un coefficient de sécurité de 1/3, soit une pression de service au plus égale à 2 b. Que l'on parte des valeurs obtenues par les essais de plaque, ce qui n'est pas recommandable, ou par celles obtenues par les essais de laboratoire et le calcul, et compte tenu de l'hétérogénéité de l'argile, la pression de service à vide de 1,45 b était donc risquée mais admissible ; le silo vide ne s'est effectivement pas incliné, mais on ignore quel a été son tassement ; il en a été de même pour le bâtiment de service voisin ; la pression de 3,1 b avec 22 000 t de charge était trop élevée et le silo s'est renversé vers la fin du premier stockage.

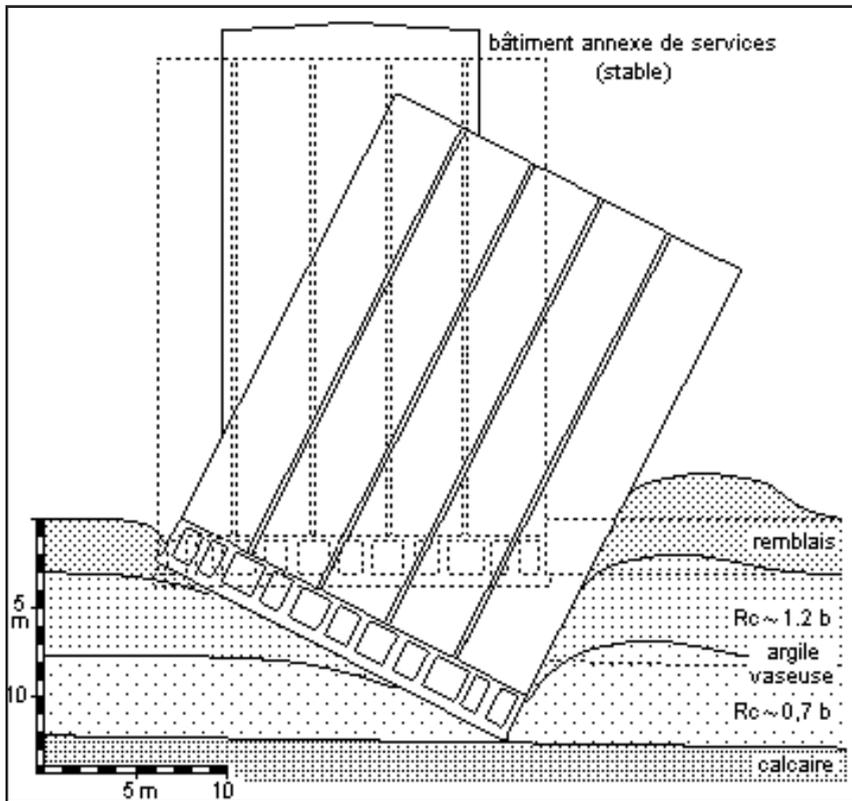


Figure 1.1.2.3 – Le silo à blé de Transcona

Cet exemple montre qu'une structure solide peut subir une grave inclinaison sans être détruite ni même sérieusement détériorée et que l'on peut éventuellement la récupérer : quand un ouvrage se fissure, ce n'est pas parce que le matériau sur lequel il est fondé est « mauvais », mais parce que sa structure est fragile, incapable de subir les tassements différentiels que la construction de n'importe quel ouvrage provoque inmanquablement.

1.1.2.4 Le Campanile de San Marco à Venise

L'effondrement d'un haut édifice n'est pas souvent dû à un défaut géotechnique comme l'on a souvent tendance à le penser : haut d'une centaine de mètres, le campanile de San Marco n'était pas plus incliné que d'autres à Venise : son faux aplomb n'atteignait pas 1 m ; construit en 1512, il s'est écroulé en 1902 ; il était fondé sur un massif de maçonnerie de 13 x 13 m de surface et 3,2 m d'épaisseur, reposant sur des pieux jointifs en bois de 2,5 m de long, une technique courante de fondation à l'époque de sa construction.

On a mesuré que la pression ultime de rupture du matériau d'assise était d'environ 20 bars alors que la pression effective que lui transmettait l'ouvrage

était d'environ 6 bars, soit un coefficient de sécurité supérieur à 1/3, valeur que l'on considère maintenant comme suffisante ; géomécánicos sans le savoir, les anciens vénitiens faisaient comme nous ! Donc, l'écroulement n'était dû ni à l'inclinaison extrêmement faible, ni au poinçonnement voire aux tassements différentiels de la fondation tel que la géomécanique le prévoit habituellement, car il se serait produit peu de temps après l'achèvement de la construction, mais sans doute à la dégradation des matériaux de construction de la base de l'édifice soumis aux immersions répétées des *acque alte*, les marées qui inondent la place San Marco plusieurs fois par an ; son écroulement aurait alors été provoqué par un événement secondaire aléatoire, *acqua alta* ou *secca* exceptionnelle, petit séisme... qui l'aurait ébranlé : il a été reconstruit à l'identique au même emplacement, avec des matériaux de superstructure plus légers, sur les mêmes fondations, car les pieux en bois constamment immergés étaient restés en très bon état ; par précaution, on les a seulement entourés d'une rangée de pieux supplémentaires pour élargir le massif de fondation : la géomécanique n'est peut-être pas la science exacte que l'on pense.

1.1.2.5 Quelques ponts

À Pise, un pont sur l'Arno a eu moins de chance que la tour ; il s'agissait d'un ouvrage en maçonnerie comportant deux piles en rivière fondées par caissons à air comprimé à 10 m de profondeur sous le talweg alors profond de 2,5 m, sur le même matériau que la tour, sable et argile fluvio-marins ; il s'est effondré dès la fin de sa construction, en 1935, car la pile gauche s'est affaissée de 1 m en poinçonnant l'argile sur laquelle on l'avait fondée, décapée par une crue du sable qui la couvrait jusqu'à 8 m de profondeur. Les résultats des sondages et des essais d'étude avaient permis de qualifier l'argile de compacte et de fixer la pression de service à 3 b, mais les conditions de prélèvement, de conservation et d'essais des échantillons avaient été plus ou moins déficientes ; de plus on n'avait pas tenu compte de l'érosion possible du sable superficiel, due à l'accroissement de vitesse de l'eau sous les arches ; selon la méthode de calcul de Fellenius, pour le fond à 2,5 m de profondeur, la stabilité de la pile était assurée à la pression retenue de 3 b avec un coefficient de sécurité de 3 ; on a vérifié par la suite qu'il est devenu inférieur à 1 quand le fond est passé à 8 m, sans tenir compte que de plus, l'argile décapée avait perdu une partie de sa compacité. On a aussi calculé par la suite qu'ainsi fondé, si le pont ne s'était pas écroulé, il aurait tassé de plus de 1 m en une centaine d'années !

Comme pour cet exemple, la ruine d'innombrables ponts est due à l'érosion provoquée par l'accroissement de vitesse de l'eau sous les arches ; on la réduit avec plus ou moins de succès par un seuil construit en aval de l'ouvrage. Mais on l'amplifie en exploitant souvent loin en aval les alluvions sablo-graveleuses du lit mineur ; c'est pour cette raison qu'en juillet 1973, le pont de Digne sur la Bléone s'est écroulé et qu'en avril 1978, le pont de Tours sur la Loire a fait de même.

1.1.3 Exemples probants

Les dommages et accidents subis par d'innombrables ouvrages de toutes natures et dimensions un peu partout ne sont heureusement jamais aussi graves, essentiellement financiers et/ou matériels, très rarement mortels : dépassements de crédits et/ou de délais de construction, fissuration voire ruine partielle ou même totale de l'ouvrage lui-même... Là encore, la cause immédiate apparente généralement évoquée et souvent retenue par la plupart des experts qui ne sont pas géotechniciens est le vice du sol, comme disent les juristes ou l'aléa géologique comme disent les entrepreneurs : l'ouvrage était parfait mais le sol était mauvais ; on peut ainsi indemniser les maîtres d'ouvrages sans mettre en cause la valeur professionnelle des constructeurs qui en sont légalement responsables. En fait, dans la plupart des cas, il est difficile voire impossible de caractériser clairement ce vice ou cet aléa, souvent fantaisistes, parfois fictifs, qui permettent de minimiser et même escamoter les défauts de l'ouvrage, sa vulnérabilité au risque : ce bâtiment ne s'est pas fissuré parce que sa structure n'était pas adaptée à subir un tassement inévitable, ce mur de soutènement ne s'est pas effondré parce qu'il était mal calculé, mal fondé et/ou mal drainé, ce talus n'a pas glissé parce que sa pente était trop raide..., mais, dans chaque cas, parce que le sol était « mauvais ». Ce raisonnement spécieux est possible parce que si l'on a de nombreux exemples de dommages analogues dans des endroits différents et donc pour des causes qui ne sont pas forcément les mêmes, on manque presque toujours de contre-exemples identiques aux mêmes endroits pour des causes indiscutables, qui permettraient de trancher : cet ouvrage correctement étudié et construit n'a pas subi de dommage, mais rien ne prouve que ce soit dû à la géotechnique ; cet autre a subi des dommages, mais rien ne prouve que la géotechnique aurait permis de les éviter. Voici des exemples qui permettent de trancher :

1.1.3.1 Décision inopportune

Un ensemble de petits pavillons de banlieue devait être construit sur un terrain plat mal drainé dont le sous-sol était constitué d'un substratum marneux peu profond, surmonté par une couverture argilo-sableuse assez sensible à l'eau, plus ou moins humide mais non aquifère. Le géotechnicien, chargé d'une étude d'APS (cf. 5.6.2) seulement, avait proposé soit des fondations sur puits ancrés dans le substratum sans risque de tassement appréciable, soit sur semelles filantes encastrées dans la couverture, à condition que les constructions soient sur vides sanitaires et entièrement chaînées ; les fondations sur dallages étaient formellement exclues en raison de la sensibilité à l'eau de la couverture et d'éventuelles variations saisonnières d'humidité entraînant des phases successives de dessiccation et de gonflement. Les constructeurs utilisèrent abusivement l'étude d'APS pour l'exécution, sans compléments d'APD ni *a fortiori* de STD ; néanmoins, ils respectèrent ces dispositions pour une première tranche de pavillons fondés sur semelles, avec vide sanitaire et chaînage. Mais ces travaux eurent lieu en saison sèche et l'argile superficielle parut compacte ; sur proposition de l'entreprise dans un but d'économie, le promoteur et le maître d'œuvre approuvés par le bureau de contrôle décidèrent de construire les

pavillons des autres tranches en parpaings porteurs sur terre-plein remblayé compacté et dallage simplement grillagé, sans étude géotechnique complémentaire et même sans que le géotechnicien auteur de l'étude d'APS en ait été informé, sans doute pour éviter sa désapprobation ou peut-être par présomption ; par précaution illusoire, quelques essais de plaque ont toutefois été réalisés par un organisme spécialisé sur les terre-pleins achevés, ainsi considérés aptes à supporter des dallages de fondation ; le ferrailage des dallages ne fut pas amélioré pour en faire de véritables radiers, aucun drainage des eaux de ruissellement et notamment, aucune gouttière, aucun trottoir et caniveau périphériques n'étaient prévus et n'ont été réalisés. Si l'on avait fait tout cela, indispensable mais pas forcément efficace, l'économie par rapport à la solution initiale de vide sanitaire et de chaînage aurait été pratiquement nulle !

Quand le programme fut livré, à mesure que le temps passait et que la pluie tombait, tous les acquéreurs des nombreux pavillons ainsi construits constatèrent des dommages plus ou moins importants, ondulations des dallages et affaissements de leurs bordures dépassant localement 3 cm, décollement des carrelages, fissurations des murs porteurs et des cloisons, décalages des seuils d'escaliers intérieurs, coincements des huisseries..., alors que les pavillons de la première tranche ne subissaient aucun dommage. Quelques pavillons particulièrement endommagés durent être entièrement détruits et reconstruits, d'autres durent être repris en sous-cœuvre et dotés de vides sanitaires ; les moins endommagés durent être plus ou moins réparés après avoir été dotés de gouttières, trottoirs et caniveaux périphériques ; de nombreux acquéreurs durent être provisoirement relogés plus ou moins longtemps.

Le coût des opérations a été particulièrement élevé, très largement supérieur à l'économie que l'on prétendait faire en changeant le mode de construction, sans compter les désagréments supportés par les occupants et les indemnités qui leur ont été attribuées pour cela ; pour certains pavillons, il a largement dépassé le coût initial de construction. Les assureurs des constructeurs évoquèrent en vain l'état de « catastrophe naturelle », puis discutèrent longtemps et âprement l'implication de chacun, y compris celle du géotechnicien qui fut rapidement mis hors de cause ; ils durent finalement indemniser les acquéreurs, à l'avantage du promoteur juridiquement considéré comme une victime, qui avait effectivement fait de belles économies sur l'ensemble du budget de son opération.

Le fait que les premiers pavillons, construits conformément aux recommandations de l'étude d'APS, se soient montrés stables, prouve qu'elles étaient particulièrement opportunes et que le sol n'était pas vicieux, mais que les constructeurs « économes » avaient été bien imprudents !

1.1.3.2 Étude contestée

Un aménageur avait été chargé par une commune d'amoindrir son risque d'inondations en préservant son développement. Une première tranche d'études et de travaux avait porté sur l'amélioration du cours du torrent dont les crues saccageaient de temps en temps les abords, rectifications du lit mineur, création de bassins de rétention, construction de levées de terre... Une deuxième tranche d'études et de travaux devait maintenir hors d'eau en toutes circonstances et

sans risque une vaste zone marécageuse demeurée inondable pour en permettre l'aménagement urbain, voirie et réseaux (VRD) à la charge de l'aménageur, lots pour la constructions de petits immeubles et ensembles de pavillons vendus à des promoteurs immobiliers.

Le sous-sol de cette zone était constitué d'une formation superficielle alluviale, quatre à cinq mètres de limon plus ou moins compressible sur autant de grave relativement compacte, et d'un substratum marneux compact. Par économie initiale dérisoire, il est habituel d'utiliser d'abord de telles zones en décharges publiques, jamais réellement contrôlées ; ensuite, cela grève considérablement le délai et le coût de l'aménagement en raison de l'impossibilité de maîtriser la régularité des apports de matériaux généralement de très médiocre qualité, très hétérogènes et mal ou même pas compactés. L'aménageur et son géotechnicien décidèrent donc de faire remblayer la zone par un terrassier selon les règles de construction des remblais routiers (*cf.* 4.3.2.2), préparation de l'assise, qualité définie du matériau mis en œuvre par couches régulières, contrôle permanent des livraisons et du compactage... L'objectif final était d'obtenir sans interventions secondaires, une voirie et des réseaux enterrés stables, et de permettre de fonder superficiellement toutes les constructions, pavillons comme petits immeubles ; un contrôle géotechnique général en fin de chantier avait montré qu'en principe, il avait été atteint ; la réalisation des VRD par l'aménageur le confirma. Un dossier géotechnique du niveau de l'APD était remis à chaque acquéreur, à charge pour lui d'adapter son ouvrage aux caractéristiques du remblai en procédant à un contrôle géotechnique spécifique. La plupart d'entre eux confièrent ce contrôle au géotechnicien de l'aménageur qui y procéda pour un coût minime ; leurs ouvrages purent être fondés superficiellement comme prévu et sans dommages ultérieurs. Quelques autres confièrent ce contrôle à leurs géotechniciens habituels ; certains de ceux-là confirmèrent le dossier de l'aménageur et aucun ouvrage correspondant fondé superficiellement sans précaution particulière imprévue n'a subi de dommages ultérieurs ; un géotechnicien mit en doute les qualités du remblai, fit exécuter quelques sondages et essais pour finalement faire fonder quelques pavillons sur micropieux et deux immeubles sur pieux ancrés dans la marne du substratum ; puis le promoteur demanda à l'aménageur des compensations financières ; après expertise judiciaire, il fut débouté attendu que les autres constructions se comportaient normalement, que son étude ne contredisait pas celle d'APD qui lui avait été remise et donc que les fondations profondes étaient inutiles et les surcoûts correspondants, injustifiés.

1.1.3.3 Le géomécenicien ignorait la géologie

Dans le quartier résidentiel d'une riche ville côtière, une résidence luxueuse avait été construite à flanc de coteau de molasse marno-gréseuse aval pendage, à cheval sur deux plates-formes étagées en déblais, la plate-forme supérieure dans de la molasse plutôt gréseuse, l'inférieure dans de la molasse plutôt marneuse ; cette différence visuelle de matériaux d'assise d'à peu près égale compacité avait incité le maître d'œuvre à consulter un géotechnicien compétent qui avait conseillé d'accroître un peu la profondeur d'encastrement des semelles filantes dans la partie marneuse qui s'était légèrement altérée au contact de l'air et sous la pluie,

entre la fin des terrassements et le début de la construction ; aucune venue d'eau souterraine n'avait été observée durant tout le chantier. Le parti architectural était très compliqué, juxtaposition de blocs à un ou deux niveaux couverts par des toits en tuiles ou des terrasses accessibles ; au passage d'une plate-forme à l'autre, un joint fractionnait la superstructure mais pas les fondations ; à travers façades et cloisons, il n'avait été ni l'objet de traitement spécifique, ni doté de couvre-joints.

Des fissures filiformes apparurent rapidement sur les façades et cloisons, là où passait le joint et quelques éclats de revêtements se produisirent sur ses bords ; les fondations sous le joint et le dallage du rez-de-jardin de la partie aval n'étaient pas fissurés. Le conseil de l'assureur dommages-ouvrage plaça quelques fissuromètres sur le joint et les observa pendant plus d'un an ; il constata des mouvements saisonniers à peine perceptibles, parfaitement normaux et conclut à un manque d'ouvrage : il conseilla de couvrir le joint par un dispositif mobile comme il aurait dû l'être, ce qui ne pouvait évidemment pas être indemnisé comme un dommage à l'ouvrage. Le propriétaire qui trouvait les couvre-joints inesthétiques et n'acceptait pas qu'un joint puisse normalement jouer, exigea une étude géotechnique qui fut confiée à la succursale locale d'un grand organisme spécialisé ; les travaux de terrain consistèrent en quatre sondages rapides, quelques essais pressiométriques, quelques teneurs en eau et un essai œdométrique sur un échantillon prélevé à la main dans une fouille manuelle extérieure dont le fond n'avait pu atteindre le niveau d'ancrage des semelles en raison d'un afflux d'eau souterraine, alors que les sondages demeuraient secs ; sur ces bases, sans se préoccuper cette présence d'eau, l'organisme conclut à des mouvements saisonniers de dessiccation/gonflement de la molasse marneuse pourtant très compacte selon les résultats des essais et conseilla une reprise en sous-œuvre de la partie aval de la construction par micropieux, en indiquant d'avoir à les ancrer à une profondeur et avec des contraintes ELU et ELS spécifiées, dans la molasse gréseuse pourtant stratigraphiquement située sur la molasse marneuse et non au-dessous ! Un ingénieur de structure établit le dossier de la reprise conseillée et l'assureur indemnisa le propriétaire sur cette base, bien que la résidence ne fût manifestement pas impropre à sa destination puisque son propriétaire l'occupait sans aucune gêne de façon continue depuis l'achèvement de la construction, soit plus de 5 ans. Le propriétaire insatisfait du montant de l'indemnité qu'il avait reçue et prétendant que rien ne prouvait que les « désordres » ne s'aggravaient pas avec le temps, fit effectuer une autre étude de reprise par un autre ingénieur qui doubla le coût prévisionnel des travaux en les étendant à la partie amont de la construction ; devant le refus de l'assureur d'accroître l'indemnité, il porta l'affaire devant un tribunal. L'expert désigné en référé vérifia le comportement saisonnier des fissures, confirma ainsi l'avis initial du conseil de l'assureur, montra que l'eau souterraine qui stagnait autour de la construction provenait de l'arrosage du jardin et du colmatage d'un drain périphérique mal construit, que la construction était et demeurerait solide, et que l'étude géotechnique ne contenait aucun élément justifiant sa reprise en sous-œuvre. Le joint et ses abords furent traités correctement et le drain fut rétabli ; plus de dix ans après l'achèvement de sa construction, la résidence est toujours normalement occupée et le propriétaire trop gourmand a dû restituer une grande partie de l'indemnité qu'il avait reçue.

Je pourrais multiplier les exemples de surcoûts, dommages et accidents souvent très graves dus à la méconnaissance ou au mauvais usage de la géotechnique ; je préfère terminer ce chapitre d'introduction plutôt consternant par un exemple de bon usage de la géotechnique.

1.1.3.4 Décision opportune

Une ville de bord de mer devait faire construire sa station d'épuration dans un site urbain très enclavé, proche du rivage, sur une formation de calcaire extrêmement karstique ; comme on le fait habituellement, les affluents devaient y entrer gravitairement et les effluents devaient être relevés ; son radier devait donc se trouver quelques mètres au-dessous du niveau de la mer. Une étude géotechnique indigente, quelques sondages et essais routiniers, n'avait donné que des indications sommaires pour les terrassements et les fondations, en ignorant le problème de l'exhaure des eaux souterraines durant le chantier et même de l'équilibre hydrostatique de l'ouvrage terminé. Lors du creusement d'une tranchée dans le calcaire à proximité du site, on s'était aperçu que le rabattement de la nappe, en communication quasi directe avec la mer, était impossible, compte tenu de l'énorme débit à mettre en jeu, pratiquement en vain. Quelqu'un a heureusement fait le rapprochement avec le projet en cours d'étude ; une étude géotechnique plus sérieuse et mieux préparée a montré qu'il en serait de même pour la station et qu'il était donc nécessaire de placer son radier au-dessus du niveau de la mer. Le projet dont la mise au point technique était presque achevée, a dû être modifié dans ce sens et le permis de construire a été revu ; au lieu de relever les effluents, on a relevé les affluents, ce qui n'a nécessité que de modifier la position des pompes de relevage ; le surcoût résultant des défauts de la première étude a donc pu être très limité et budgétisé dès l'abord. À l'exécution, la fouille principale n'a posé aucun problème d'eau souterraine ; par contre, une petite fosse de relevage, oubliée lors de l'étude, a dû être creusée dans le calcaire pendant le coulage du radier général ; malgré sa petite surface et sa faible profondeur, il a été tout à fait impossible d'y rabattre le niveau de l'eau de plus de quelques centimètres et il a fallu la construire, non sans mal, comme un caisson immergé.

Cet incident sans grande conséquence sur la construction de l'ensemble de l'ouvrage, a prouvé le bien-fondé de la décision de monter le niveau de la station avant l'ouverture du chantier ; si elle n'avait pas été prise alors, il aurait été nécessaire de le faire pendant les travaux, ce qui aurait entraîné un surcoût exorbitant de construction entraînant de sérieux problèmes budgétaires et un énorme allongement du délai de mise en service.

1.2 Géotechnique

Dans le groupe des géosciences, la géotechnique étudie la subsurface terrestre sur laquelle notre action directe est possible, pour nous permettre de l'aménager ou de l'exploiter. Elle s'intéresse plus particulièrement aux techniques du génie civil, du bâtiment, des carrières, des eaux souterraines, de la prévention des

risques « naturels »... Son domaine n'est donc pas fixé et s'agrandit en fonction de nos besoins et de nos progrès techniques. Ses applications en tous lieux sont innombrables, d'une très grande diversité, toujours uniques et pour certaines extrêmement complexes : aménagements et protection de zones urbaines, industrielles, de voies de communication..., terrassements superficiels et souterrains, soutènements et fondations d'ouvrages de toutes sortes, extractions de matériaux de construction, d'eau souterraine..., pollutions, stockages de déchets..., en fait tout ce que l'on peut creuser, construire, exploiter ou rejeter à la surface de la Terre.

C'est à la fois une science, cadre de recherche théorique et d'enseignement, somme de ce que l'on sait ou plutôt de ce que l'on essaie de comprendre et que l'on croit savoir, et une technique, cadre d'études d'applications, somme de ce que l'on peut faire à un moment donné dans un certain domaine d'activité.

Comme science, la géotechnique étudie la morphologie et le comportement du géomatériau sous l'effet de phénomènes naturels ou induits qui entraînent son évolution dans l'espace et dans le temps ; elle propose un système théorique cohérent, rendant compte des connaissances du moment, dont les éléments sont des théories et des lois établies en grande partie de façon inductive à partir d'observations et d'expériences le plus souvent entreprises pour résoudre des problèmes techniques nouveaux concernant le comportement naturel ou induit d'ensembles sites/ouvrages : Coulomb a établi sa loi pour prévoir la stabilité des remblais de fortifications, Darcy a établi la sienne pour prévoir le débit des captages d'eau souterraine... Ces théories modélisent des acquis techniques et sont validées par des résultats d'applications : le volet scientifique de la géotechnique est subordonné à son volet technique :

Comme technique, la géotechnique étudie le géomatériau d'un certain site pour l'adapter à un besoin spécifique, l'aménager et/ou y construire un certain ouvrage. L'étude géotechnique de BTP vise à obtenir un résultat imposé, unique et précis, nécessairement positif, la réussite de l'adaptation. Elle le fait au moyen de recettes et de règles appuyées sur la théorie et éprouvées par l'expérience. La complexité de la morphologie et du comportement du géomatériau est telle que, dans sa phase initiale, une étude géotechnique doit souvent être conduite comme une étude théorique ; les résultats de certaines études peuvent ainsi conduire à préciser des théories et à perfectionner la méthode géotechnique ou celles d'autres géosciences ; mais le seul but d'une étude géotechnique est la résolution d'un problème pratique.

La géotechnique technique qui concerne plus particulièrement cet essai ne sert pas à fabriquer une chose tangible, un bien matériel, un ouvrage répondant à un programme et à un usage spécifiques dans un site donné, mais à produire de l'immatériel, définir les conditions générales et particulières dans lesquelles on pourra projeter cet ouvrage, le construire et l'entretenir dans un site dédié afin qu'il soit fonctionnel, sûr et économique ; pour cela, on devra l'adapter aux particularités naturelles du site afin d'éviter des dommages ou même des accidents d'abord au chantier, ensuite à la construction, qui résultent soit de l'évolution propre de l'ensemble site/ouvrage – tassement, glissement, colmatage..., soit de son exposition à un phénomène naturel dangereux – séisme, crue... Évidemment, quelle que soit la façon dont il ont été projetés et

construits, que des erreurs aient alors été éventuellement commises, c'est le séisme qui détruit l'immeuble non parasismique, la crue qui emporte le pont mal calibré et/ou inonde le lotissement dans le lit majeur, la gravité et les caractères locaux du géomatériau qui font que le talus de déblai trop haut et/ou trop pentu glisse, que le bâtiment mal fondé tasse et se fissure, que le mur de soutènement mal drainé s'écroule... : c'est toujours le comportement naturel de son site d'implantation, plus ou moins perturbé par sa présence, qui fragilise l'ouvrage inadapté ; mais si l'ouvrage est endommagé, ce n'est pas le sol qui était vicieux, c'est l'ouvrage qui était vulnérable. On peut prévenir les effets de phénomènes dangereux qui menacent n'importe quel ouvrage dans n'importe quel site en les identifiant et en les étudiant, pour l'adapter à la réalisation éventuelle de l'un d'entre eux sans grave dommage ou en le construisant ailleurs.

Bien qu'il ne figure que depuis une trentaine d'années dans les dictionnaires français, le mot *géotechnique*, daté d'environ 1960 dans un de ces ouvrages, paraît âgé de plus de cent ans – son usage dans certains exemples du chapitre précédent est donc un peu anachronique, mais sous sa forme empirique, la géotechnique existait bien avant qu'on ne la désigne. Depuis, son sens qui varie selon les pays et les époques, a subi une bien curieuse évolution, assez parallèle à celle de la géotechnique elle-même ; à son origine dont il est difficile de dire si elle est anglaise, française ou plutôt suisse, il devait désigner l'ensemble des applications des géosciences ; dès le début du xx^e siècle, il était tombé en désuétude, sans doute parce que ceux qui auraient pu l'utiliser, avaient des occupations apparemment trop différentes pour qu'un terme général leur parût nécessaire.

Cet abandon reflétait l'évolution parallèle d'une géologie de l'ingénieur, traduction littérale d'*ingenieurgeologie* ou d'*engineering geology*, et d'une *Erdbaumechanick*, devenue la mécanique des sols en français ; il n'était pas besoin de la dire appliquée tant elle était le domaine des ingénieurs du BTP, alors que lui correspondaient les deux termes anglais de *soil mechanics* pour la science et de *soil engineering* pour la technique. Terzaghi utilisa d'abord *Erdbaumechanick* pour titre de son ouvrage fondateur ; il eut ensuite recours à notre terme comme synonyme de *soil engineering*, en l'orthographiant curieusement *Géotechnique* pour le titre d'une revue de langue anglaise. Il paraît avoir finalement douté de l'utilité de ce terme puisqu'il appela un de ces derniers ouvrages *Soil Mechanics in Engineering Practice*. À peu près en même temps, Buisson, traducteur de *Theoretical Soil Mechanics*, exhuma sans lendemain le terme français dans le sens de mécanique des sols appliquée pour titre de son ouvrage en deux tomes dont il ne publia que le premier pour se consacrer à la traduction de celui de Terzaghi qu'il considérait comme meilleur que le sien. Peut-être grâce au titre français de la revue, le mot s'est maintenu comme synonyme de *soil engineering* sous sa forme anglaise, sans accent. Les Belges avec leur Institut géotechnique d'État et surtout les Suisses avec leur plus que centenaire Commission géotechnique de la Société suisse des sciences naturelles, ont préservé le mot dans notre langue ; mais en France, on ne parlait que de *mécanique des sols*. Il y a une cinquantaine d'années, au début de la construction des autoroutes françaises, je l'ai récupéré chez Buisson et les Américains qui en avaient restreint le sens aux techniques des sols routiers pour

désigner mon *Bureau d'études géotechniques*, expression qui est maintenant devenue générique.

Actuellement, l'acception du mot et même ce qu'il désigne ne sont toujours pas fixés : du côté de la science, les Comités français de géologie de l'ingénieur, de mécanique des sols et de mécanique des roches, les Sociétés internationales correspondantes de *Mécanique des sols et de géotechnique*, de *Mécanique des roches*, de *Géologie de l'ingénieur et de l'environnement* ne représentent qu'une partie d'une géotechnique implicite ; les Comités ont une revue et organisent des congrès communs, mais les articles et communications œcuméniques y sont encore rares. L'Union française des géologues qui a des sections d'*Aménagement-génie civil*, d'*Eau*, d'*Environnement*, de *Mines et carrières*, ignore explicitement la géotechnique et même la géologie de l'ingénieur. Selon sa définition, l'eurocode 7 (cf. 5.2.3.6) concerne le *calcul géotechnique* qui n'est en fait que du calcul de mécanique des sols. En France comme ailleurs, on en est donc toujours à assimiler la géotechnique à la mécanique des sols, à isoler la mécanique des roches et la géologie de l'ingénieur, à ignorer la géomécanique et on oublie toujours l'hydrogéologie et l'hydraulique souterraine, alors que l'eau souterraine sous toutes ses formes a un rôle fondamental dans le comportement du géomatériau : la plupart des accidents géotechniques de tous lieux et de toutes natures lui sont directement liés.

Du côté de la technique, la consécration du mot français s'est faite dans le courant des années 70, avec la création à laquelle, seul (ingénieur) géologue de dix, j'ai participé en proposant le terme, de l'*Union syndicale géotechnique* d'orientation nettement géomécanique et avec l'établissement de *Listes départementales de géotechniciens agréés en matière de mouvements du sol et du sous-sol* d'orientation plutôt géologie de l'ingénieur.

L'expression *ingénieur géotechnicien* calquée sur *ingénieur géologue* paraît être un pléonisme puisque, même s'il est enseignant et/ou chercheur, le géotechnicien doit nécessairement être un ingénieur, homme expérimenté de bureau d'étude, de terrain et de chantier ; la plupart des géologues ne sont pas ingénieurs, de sorte qu'il est nécessaire de le préciser pour ceux qui le sont.

Dans cet essai, le mot *géotechnique* désigne l'ensemble indissociable géologie de l'ingénieur (géomorphologie, géodynamique, hydrogéologie), + géomécanique (géophysique, mécanique des sols, mécanique des roches, hydraulique souterraine) : comme Terzaghi, je pense que la géotechnique est l'ensemble dont ces disciplines sont les éléments de même niveau.

Cette étroite imbrication de général et de particulier, de principes et de pratiques, de naturel et de physique, de science et de technique, de géologie et de mécanique explique l'extrême confusion dans laquelle la géotechnique s'est développée et continue à le faire. Dès son origine, la géomécanique a connu cette confusion, avec Collin le praticien expérimenté et Poncelet le théoricien calculateur (cf. 1.3.4.1) ; si l'on était tenté de penser que cela est de la vieille histoire, je rappellerais l'attitude dogmatique et même inquisitoriale, dans la ligne de celle de Poncelet vis à vis de Collin, adoptée il y a une quarantaine d'années par la commission technique du Comité français de mécanique des sols à propos d'ouvrages non-conformistes de MM. M et A Reimbert, rares

expérimentateurs français de l'époque, que les mécaniciens du sol ne tenaient pas pour des spécialistes : constructeurs de silos à grains internationalement connus, ils utilisaient leurs observations sur ces ouvrages et leurs expériences minutieusement décrites sur modèles réduits de grains de blé ou de sable, pour étudier la poussée de massifs pulvérulents sur les écrans, au moyen de photographies et de mesures électromécaniques ; ils étendaient ces acquisitions à certains problèmes de murs de soutènement, de massifs d'ancrage, de rideaux de palplanches et de pieux ; à la même époque, le Comité supervisait des expériences grandeur nature de même objet à Saint-Rémy-de-Chevreuse, extrêmement onéreuses mais à peu près stériles ! Il a fallu qu'un groupe de praticiens dont Buisson, le père de la géotechnique française, intervienne durant plus de cinq ans pour qu'enfin le conseil du Comité accepte la publication d'un article de MM. Reimbert, alors que de nombreuses revues techniques françaises et étrangères publiaient depuis longtemps leurs communications. L'objet de la controverse était la valeur de l'angle dièdre du prisme de poussée, le coin de Coulomb, $\pi/4-\varphi/2$ pour Rankine et les théoriciens du Comité ou $\pi/4-\varphi/3$ pour Reimbert, avec φ , angle de talus naturel ; la discussion pratique de ces valeurs est byzantine, car elles interviennent dans les calculs classiques artificiellement compliqués de stabilité des ouvrages de soutènement et de fondations dont les résultats ne sont au mieux que des ordres de grandeur : aucun cas étudié n'est analogue à un autre et en dehors du remblai frais, aucun géomatériau n'est strictement pulvérulent et seulement frottant, aucune ligne de rupture n'est strictement rectiligne.

Tout cela n'a pas facilité le développement rationnel de la géotechnique scientifique et de sa méthode technique, mais surtout les relations des géotechniciens avec leurs clients et ceux qui pourraient l'être ou le devenir. Pourtant, la géotechnique pourrait être une discipline cohérente et efficace si les géotechniciens ne négligeaient pas la géologie, l'interaction de l'ouvrage et de son site formant un ensemble continu, s'ils ne confondaient pas réalité et modèle, étude géotechnique et campagne de sondages et d'essais, s'ils subordonnaient ces travaux à la réflexion et les résultats de calculs à l'expérience comme Coulomb et Terzaghi l'ont explicitement recommandé... et si les utilisateurs acceptaient que le même géotechnicien expérimenté intervienne du début de l'étude du projet à la fin de la construction de l'ouvrage et souvent même au delà pour assurer son entretien et sa sécurité, en payant à son prix la prestation intellectuelle (cf. 6.2.4). C'est ce que je me propose de montrer dans ce qui suit.

1.3 Aperçu historique

L'histoire de la géotechnique est un bon exemple de l'évolution générale des sciences appliquées et des techniques : c'est en effet une technique aussi vieille que l'humanité et connue de toutes les civilisations ; comme bien d'autres, elle a commencé à devenir rationnelle vers la fin du XVIII^e siècle, quand les progrès de la science occidentale ont permis d'aborder méthodiquement l'étude de phénomènes naturels complexes qui n'étaient connus qu'empiriquement.

Un de nos caractères spécifiques est notre constante volonté d'adapter le milieu naturel à nos propres besoins. Selon le niveau de civilisation, nous y sommes plus ou moins parvenus grâce à la technique qui est universelle, aidée ou non par la science qui est spécifique de la civilisation occidentale moderne. Tout ce qui concerne donc nos relations pratiques avec le géomatériau ressortit à la géotechnique : ramasser un galet et le casser pour en faire un *chopper*, chercher, choisir et aménager une grotte pour l'habiter, exploiter une carrière de silex, construire une cité lacustre, ériger un mégalithe... étaient des activités géotechniques.

1.3.1 Dès l'Antiquité

L'intérêt historique et artistique que nous accordons aux monuments dont toutes les civilisations ont parsemé leurs aires de développement, nous fait oublier que la réalisation de toute construction implique d'avoir d'abord choisi et aménagé un site, choisi et exploité des matériaux, établi des fondations... ; ce sont des actes spécifiquement géotechniques. Et les Anciens savaient très bien faire cela puisque quantité de leurs œuvres sont arrivées en plus ou moins bon état jusqu'à nous. La façon dont ils ont résolu certains problèmes techniques de construction et en particulier ceux concernant la mise en œuvre du sous-sol, est tout aussi admirable que la qualité esthétique de leurs réalisations. Les anciens Chinois, les anciens Grecs... savaient construire beau et parasismique.

Dès l'Antiquité, il y avait donc évidemment des géotechniciens en Mésopotamie, en Égypte, en Méditerranée, en Bretagne, en Grèce, à Rome, dans les Andes, en Amérique centrale, en Chine, en Inde et ailleurs, pour contribuer à la construction des édifices, des routes, des canaux, des ponts... dont nous admirons les vestiges. Ils utilisaient des techniques empiriques, sans cesse améliorées, comme celle commune à tous qui consiste à adapter la charge appliquée par l'ouvrage à la capacité portante du géomatériau d'assise, en jouant sur les dimensions et la profondeur d'ancrage des fondations ; nous continuons à le faire. Darius décrit très précisément cette technique dans la dédicace de son palais de Suse ; Vitruve la conseillait aux constructeurs romains ; deux Évangiles disent qu'au bord d'un torrent à crues, l'homme prudent établit les fondations de sa maison en creusant jusqu'au roc, alors que le fou construit sur le sable...

Au Moyen Âge européen, il fallait bien que certains constructeurs eussent de solides connaissances géotechniques pour assécher des marais, construire des canaux et les grandes cathédrales qui sont souvent assises sur des fondations profondes : Notre-Dame de Paris entre autres, est construite sur une forêt de pieux en bois, longs de quelques mètres, qui traversent la couche de limon meuble superficiel, pour s'ancrer dans le cailloutis compact sous-jacent des alluvions de la Seine.

Les peuples dont les sites d'installations sont les plus ingrats, sont devenus les plus habiles géotechniciens, en particulier, ceux des lagunes, des deltas et des grandes plaines alluviales ; ils devaient construire sur des matériaux peu consolidés, incapables de supporter de lourds édifices sans aménagements et

facilement modifiés par des phénomènes géodynamiques actuels, crues, marées, tempêtes... auxquels ces sites sont fréquemment exposés. Durant un millénaire, le phare d'Alexandrie a résisté aux tempêtes, sur une île particulièrement exposée des confins du delta du Nil ; il a finalement été détruit par un séisme au XIV^e siècle. Les caïcongs des deltas d'Extrême-Orient soutiennent toujours de nombreux édifices antiques et sont encore mis en œuvre ; l'actuelle école géotechnique hollandaise est directement issue des efforts séculaires qu'ont dû prodiguer les Frisons pour aménager leur province sans cesse disputée à la mer ; et Terzaghi était un Viennois, d'abord confronté aux problèmes de construction sur les alluvions argileuses compressibles de la vallée du Danube.

1.3.2 À Venise

Avec les Hollandais, les Vénitiens me paraissent être ceux qui, en Occident, se sont montrés les plus extraordinaires géotechniciens ; ils ont fondé, développé et maintenu durant plus de treize siècles, une ville et ses annexes dans l'un des sites les plus inhospitaliers qui soient, une lagune particulièrement instable. Cette lagune borde en effet le fond d'un golfe aux marées sensibles et aux tempêtes impressionnantes, érodant sans cesse un fragile cordon littoral qu'il a fallu protéger, tout en préservant des passes navigables ; plusieurs fleuves torrentiels alpins y aboutissaient et la comblaient progressivement ; il a fallu les détourner pour préserver des chenaux de navigation et de drainage, tout en maintenant un apport d'eau douce nécessaire à la vie ; le sous-sol de la ville est affecté par un affaissement permanent, en partie naturel et en partie résultant du tassement dû au poids de la ville, qui imposa plusieurs fois de changer son niveau de base.

Par l'ampleur des travaux entrepris et par leur durée, l'aménagement du site de Venise doit être l'un des plus considérables que l'homme ait jamais entrepris. La ville elle-même est construite sur un groupe d'îlots dont la pérennité n'est due qu'à l'activité incessante des hommes ; il a fallu le protéger à la fois de l'érosion et de l'envasement, compenser son lent enfoncement par des apports quasi permanents de remblais, de telle sorte que la partie artificielle du sous-sol de Venise est stratifiée. Et pourtant, ce petit archipel avait été judicieusement choisi comme le mieux adapté aux besoins de ses occupants, parce que situé dans la partie la plus sableuse et donc la plus stable de la lagune.

Toute la ville est évidemment construite sur « fondations spéciales ». Le système change selon la nature locale du sous-sol, l'époque de construction, le poids et les dimensions de l'édifice. On connaît trois types de fondations à Venise, le radier, les pieux courts et quasi jointifs compactant la couche superficielle très peu consistante du sous-sol, ou les pieux longs et espacés transmettant les charges à une couche sous-jacente sableuse, plus compacte. Nous n'avons rien inventé ; les pieux étaient en bois, ils ont été en acier, ils sont en béton ; les longrines et les radiers étaient des enchevêtrements de troncs couchés, ils ont été des poutres d'acier ou des voûtes renversées maçonnées, ils sont en béton armé, coulé ou injecté. Les matériaux ont changé, mais la

technique est la même ; elle a seulement évolué avec la nature des matériaux et les progrès de leur mise en œuvre.

Comme tous les maîtres d'œuvre vénitiens, Sansovino était aussi un habile géotechnicien qui évidemment, attachait un soin particulier à fonder ses constructions et à réparer celles des édifices qu'il restaurait ; chef des Procurateurs, c'est-à-dire architecte en chef de la République, tout ce qui s'est entrepris à Venise durant une bonne moitié du XVI^e siècle, l'a été sous son contrôle ou avec son concours ; il est ainsi un des premiers hommes de l'art à avoir entrepris une étude systématique des techniques de fondation ; on trouve dans ses écrits, de nombreux paragraphes proprement géotechniques.

1.3.3 La guerre de places

Durant le XVII^e siècle, les nécessités de la guerre de places ont obligé les ingénieurs militaires à construire des remparts de plus en plus hauts et épais. Ce ne pouvaient donc plus être des murs entièrement maçonnés comme avant, mais des massifs en terre perreyés. Pour d'évidentes raisons fonctionnelles et économiques, la pente de ces remparts devait être aussi raide que possible ; mais on s'aperçut vite que, selon le matériau utilisé et la hauteur de l'ouvrage, on ne pouvait pas faire ce que l'on voulait. Ceci amena les constructeurs à réfléchir sur la stabilité des remblais et des murs de soutènement. Pour faciliter la construction des remparts que l'on peut encore observer des Alpes du sud aux côtes atlantiques et des Pyrénées aux Flandres, Vauban a fait établir et diffuser, par l'abbé Duroi notamment, des règles empiriques de stabilité. Ceux qui les construisaient sous sa responsabilité, devaient en effet mettre en œuvre avec le maximum de rapidité, d'économie, d'efficacité et de sécurité, des matériaux souvent médiocres, dans des sites généralement ingrats ; pour cette raison, on le considère parfois comme un précurseur de la mécanique des sols. Toutefois, il faudra attendre 1720 et Forest de Bellidor, pour qu'une partie d'un traité de construction soit consacrée à l'étude empirique de la poussée des terres, appliquée à la stabilité des murs de soutènement et des fondations.

En architecture civile, certaines planches de l'*Encyclopédie* montrent des fondations sur pieux en bois plus ou moins espacés et profonds, notamment pour des bâtiments tels que les moulins hydrauliques, souvent construits en bordure de cours d'eau où le sous-sol n'est généralement pas porteur ; mais rien n'indique la façon dont on les projetait, sans doute empiriquement.

L'empirisme a largement survécu au XVIII^e siècle. Les constructeurs de voies ferrées du XIX^e siècle ont pu rapidement perfectionner leur outillage et leur matériel grâce à la science naissante ; mais ils ont dû demeurer empiristes pour remblayer des marais, fonder des viaducs ou percer des tunnels un peu partout en Europe puis dans le monde ; ils nous ont montré qu'un géotechnicien ne doit pas dédaigner l'empirisme, s'il lui permet de résoudre des problèmes pratiques que la science ne sait pas aborder, en se souvenant que c'est bien par empirisme que la science géotechnique s'est bâtie.

1.3.4 La période scientifique

Avant de faire de la géologie, on a fait de la mécanique des sols, ou plutôt de la mécanique des remblais ; c'est peut-être cette assimilation d'un matériau apparemment naturel mais en fait artificiel au géomatériau dont il est issu qui a compliqué la géotechnique naissante ; si les constructeurs des grands ouvrages du milieu du XIX^e siècle n'avaient pas disposé de la mécanique des remblais, ils auraient sans doute inventé, dès l'abord, la géotechnique réaliste que Terzaghi a bâtie en synthétisant les acquis de près d'un siècle de tâtonnements.

1.3.4.1 La mécanique des remblais

Dès 1727, Couplet proposa la théorie du coin de poussée limité par une surface de rupture plane. Elle fut reprise en 1773, par Coulomb, ingénieur militaire préoccupé de stabilité de remblais de fortification : en assimilant la condition de stabilité de ce coin de poussée et celle d'une charge sur un plan incliné dont il avait établi la loi pour rationaliser le charroi d'artillerie, il a clairement défini la cohésion et l'angle de frottement d'un remblai, et a établi la loi de leurs relations qui est à la base de la mécanique des sols ; la géotechnique entra ainsi dans sa phase scientifique : il savait calculer la hauteur critique des talus verticaux de matériaux sablo-argileux ; il savait aussi que, quand ils ne concernent pas du sable homométrique sec ou du remblai fraîchement déversé, les glissements se font selon une surface compliquée ; dans un but délibéré de simplification, ne retenant implicitement que le comportement du remblai dont le talus de déversement est à peu près un plan incliné, il recommandait de travailler sur le plan en faisant remarquer qu'ainsi, on agissait dans le sens de la sécurité puisqu'en vieillissant, la pente de talus du remblai s'accroissait par consolidation. Dès l'abord, il a donc pressenti l'utilité de ce que l'on appellera plus tard le coefficient de sécurité qui permet d'obtenir un résultat correct quoi que l'on calcule, pourvu qu'il soit suffisamment petit ; il a aussi ouvert la voie aux hypothèses simplificatrices qui deviendront vite abusives sous l'influence des mathématiciens du XIX^e siècle ; incapables de réaliser les constructions géométriques ou d'intégrer les équations qui représentaient le mieux les cas réels, ils dénaturèrent à plaisir les caractéristiques physiques du géomatériau et les conditions aux limites du phénomène.

Pourtant, dès 1846, Collin, ingénieur civil celui-là, rappela à propos de barrages en terre et de remblais de canaux et de chemins de fer, que la cohésion est totalement indépendante de l'angle de frottement et dit qu'elle dépend de la teneur en eau ; il a aussi établi que la courbe de glissement d'un matériau homogène la plus proche de la réalité, est l'arc de cycloïde, de moins en moins pentu d'amont en aval. Il se heurta malheureusement à la sommité scientifique du moment, Poncelet, autre ingénieur militaire, qui en 1840, avait appliqué le calcul trigonométrique à la théorie du coin ; il trouvait plus commode d'escamoter la cohésion et d'affirmer que la surface de glissement était bien le plan qu'imposait sa méthode géométrique ; sans doute n'avait-il jamais observé le glissement d'un talus d'argile. Poussant aussi loin que possible l'effet de sa tyrannie intellectuelle, il empêcha l'Académie des sciences de recevoir le mémoire de Collin et plongea ainsi pour 60 ans, la géomécanique dans

l'aberration de la fausse rigueur mathématique ; dans ce mémoire, à propos d'un glissement de remblai à Chaville, sur la voie ferrée Paris-Versailles par la rive gauche, Collin présentait une coupe réaliste de cet accident, indiquait la construction géométrique de l'arc de cycloïde correspondant et décrivait clairement l'influence de la cohésion dans l'équilibre des remblais.

1.3.4.2 La mécanique des sols

On avait ainsi les germes d'une mécanique de l'équilibre linéaire fondée sur le calcul trigonométrique et/ou infinitésimal généralisé à partir d'une ligne droite de rupture dans un milieu pulvérulent, et d'une mécanique de l'équilibre curviligne fondée sur le calcul de bilan action/réaction en mécanique statique à partir d'une ligne courbe de glissement dans un milieu cohérent, – arc de cycloïde, d'ellipse, de spirale logarithmique, de cercle... Cette opposition théorique a jalonné jusqu'à présent le développement erratique d'une grande partie de la mécanique des sols ; selon les circonstances elle est ainsi passée alternativement du point de vue du calculateur qui est forcé de dénaturer voire d'ignorer la cohésion, à celui de l'observateur qui sait devoir en tenir compte.

Du milieu du XIX^e siècle au début du XX^e, la mécanique des remblais est progressivement devenue la mécanique des sols car on s'intéressait aussi de plus en plus aux soutènements et aux fondations ; Rankine, Levy, Boussinesq, Massau et d'autres, ne niaient plus la cohésion, mais ils faisaient comme si ce paramètre malcommode à manipuler analytiquement n'existait pas, en sous-estimant délibérément son rôle et/ou en le réduisant à une fonction de l'angle de frottement ; enfant, aucun d'entre eux n'avait dû construire un château de sable. Le sommet du matériau mathématique est celui proposé par Boussinesq, qui est non pesant, élastique, homogène, isotrope et semi-infini ; on se prend à vouloir ajouter incolore, inodore, sans saveur et déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres. Malgré cela, ces mathématiciens furent bien obligés de reconnaître que les équations différentielles générales qu'ils posaient, n'étaient pas intégrables. Ils durent donc se contenter de résoudre de façon plus ou moins rigoureuse, les mêmes cas particuliers qui sont encore exposés dans les traités de mécanique des sols ; on trouvait même dans l'un d'eux, la justification qualifiée d'expérimentale, de l'utilisation du milieu de Boussinesq !

En 1880, à la suite de la ruine du barrage de Bouzey (*cf. 1.1.1.2*), Dumas définit la sous-pression, pression hydrostatique de l'eau souterraine sous les ouvrages enterrés.

Avec Resal en 1910, la mécanique des sols semble reprendre pied sur terre en reconsidérant la cohésion, mais elle n'avance guère du point de vue mathématique, car le calcul analytique n'aime pas les constantes.

Le début du XX^e siècle voit apparaître l'arc de cercle comme ligne de glissement, grâce à Hultin, Petterson et Fellenius. En affirmant qu'en mécanique des sols, il ne peut y avoir de théorie générale rendant compte de tous les phénomènes possibles, ce dernier clôt en principe l'ère des spéculations mathématiques pour ouvrir celle de la recherche expérimentale. Toutefois, les deux problèmes fondamentaux de la mécanique des sols, la stabilité des talus et la stabilité des fonda-

tions, sont artificiellement traités de façon apparemment unitaire ; on continue à le faire, mais en fait cela n'est pas convenable.

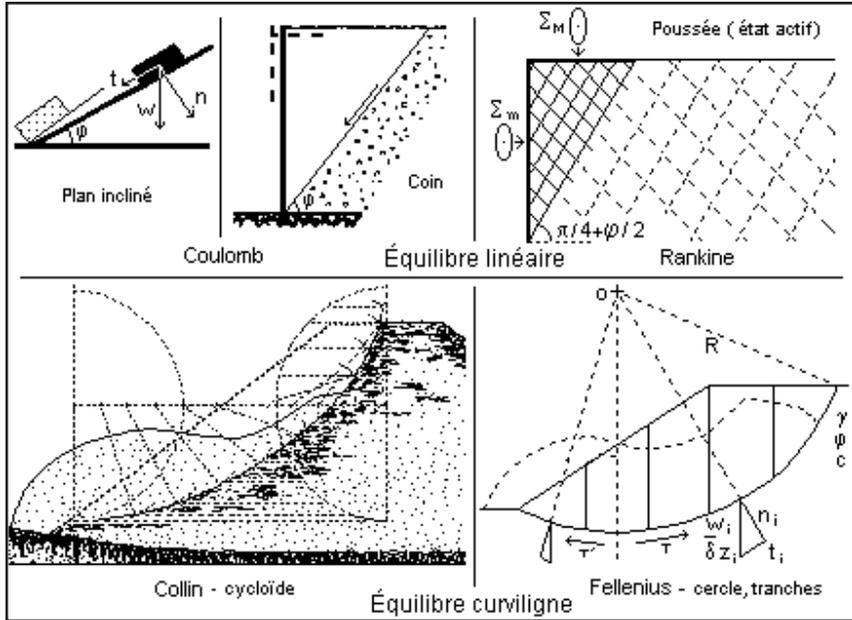


Figure 1.3.4.2 – Équilibres plastiques

L'estimation de la contrainte admissible pour une fondation superficielle s'est successivement perfectionnée depuis Rankine en 1915, jusqu'à Terzaghi, en passant par Prandtl, Fellenius, Skempton et quelques autres.

Vers 1920 avec Frontard, le problème de la ligne de glissement est enfin clairement défini. Il s'agit bien, ainsi que l'avait dit Collin, d'une courbe proche de l'arc de cycloïde, mais l'utilisation mathématique de cette courbe analytiquement complexe, conduit rapidement à des calculs inextricables ; on lui préfère donc l'arc de spirale logarithmique ou bien celui de cercle, selon que l'on travaille sur la butée ou la poussée des terres. En fait, seul celui de cercle est facilement utilisable ; de plus, il se prête bien au calcul numérique : on étudie ainsi la stabilité des talus par des cercles de glissement, selon la méthode de Fellenius-Bishop ; mais, selon la méthode de Rankine/Prandtl, la ligne de rupture de l'assise d'une semelle de fondation est un arc de spirale logarithmique prolongé par un segment de droite.

En matière de fondations et de barrages en terre, le pragmatisme s'affirme enfin nettement avec Terzaghi en 1925 ; le matériau retrouve sa réalité physique et le rôle de l'eau qu'il contient se concrétise. Terzaghi fait implicitement sienne l'idée de Fellenius selon laquelle il ne peut y avoir de théorie générale en mécanique des sols ; il recommande de caractériser le géomatériau, successivement sous ses aspects physique, hydraulique et mécanique et de dissocier

nettement l'étude de la stabilité d'une fondation de celle de son tassement, en privilégiant la seconde.

Reprenant le principe de correspondance de Rankine pour étendre les calculs trigonométriques de la poussée des sols pulvérulents aux sols cohérents, Caquot proposa en 1934, une façon élégante, mais peu réaliste, de s'accommoder de la cohésion. Son théorème des états correspondants qui assimile la cohésion à une fonction de l'angle de frottement, ce qu'elle n'est sûrement pas comme l'avait établi Coulomb et répété Collin, est en fait une survivance de l'esprit de Poncelet et une dernière « amélioration » de ce que l'on pourrait appeler la mécanique des sols linéaire. Mathématiquement, il est en effet facile de supprimer la cohésion en opérant un changement d'axe dans le plan de Mohr. En fait, cela ne résout pratiquement rien, car la pression hydrostatique équivalente que l'on introduit dans les formules, est tout aussi mal définie que la cohésion ; on remplace une constante gênante par une autre qui l'est autant mais qui n'a aucune réalité physique, même si on l'assimile à une pression latérale qui comprime un massif purement pulvérulent comme on peut le faire au triaxial ou dans un emballage sous vide de café en poudre, mais pas dans le sous-sol.

Si la manipulation de la cohésion a gêné et gêne encore les mécaniciens des sols au point de les avoir rendus irréalistes, c'est que ce paramètre est une constante mathématique physiquement des plus variables ; comme l'avait dit Collin, elle varie entre autres selon la teneur en eau ; elle est seulement mesurable dans un matériau donné, dans un état donné et à un instant donné, celui de la rupture, c'est-à-dire quand elle disparaît, contrairement à l'interprétation classique des essais UU du triaxial. Peut-être aussi existe-t-il plusieurs cohésions, et entre autres la cohésion triaxiale purement mécanique et artificielle dont parle Caquot, celle bien réelle de capillarité qui permet de construire les châteaux de sable mouillé et des argiles, que l'on peut assimiler à une colle ou un ciment...?

Depuis les années 30, la mécanique des sols classique paraphrase plus ou moins habilement les anciens en variant les langages mathématiques : on s'adapte tant bien que mal aux idées de Terzaghi, sans que des progrès déterminants puissent être enregistrés ; on piétine en essayant d'adapter une théorie que l'on veut parfaite à une pratique trouble-fête, sans vouloir reconnaître que c'est elle qui a raison. Et pour passer de l'échantillon éprouvé en laboratoire au matériau du site, problème insoluble par intégration, on veut forcer le second à avoir les qualités déterminées sur le premier, ce qui est proprement surréaliste. C'est ainsi qu'au congrès de mécanique des sols de 1964, à propos des argiles de Londres dont la réputation d'instabilité en talus de déblais n'est plus à faire depuis le début de la construction du métro de cette ville, Skempton constatait, comme d'autres avant et après lui, ici et là, que les résultats des essais de laboratoire n'étaient jamais confirmés par les mesures et les observations de terrain ; il se demandait donc comment il fallait modifier les appareils et les procédures d'essais pour qu'ils fournissent des résultats directement utilisables, démarche que Terzaghi avait explicitement condamnée. Sentant confusément que, si elle satisfaisait l'esprit méthodique des mécaniciens auxquels il s'adressait, cette démarche était pourtant vouée à l'échec, il proposait assez paradoxalement et sans en tirer d'application pratique, une explication structurale de sa

désagréable constatation ; c'était effectivement la bonne démarche, mais son explication typiquement mécaniste de microfissuration inexpliquée de l'argile qu'il ne pouvait concevoir qu'homogène, isotrope et immuable, n'était pas la bonne ; comme toute formation quelle qu'elle soit et où qu'elle soit, celle des argiles de Londres n'est pas homogène et isotrope : les glissements s'y produisent généralement là où existe une hétérogénéité quasi indécélable comme un fin lit de sable humide ; comme toute roche, l'argile n'est pas immuable : elle s'altère au contact de l'atmosphère et perd ainsi progressivement ses caractéristiques mécaniques, notamment sa cohésion : l'explication de la divergence est donc géologique, pas géomécanique.

Dans le courant des années 50 et 60, deux écoles se sont développées en France. Elles ont proposé des théories spécifiques, s'appuyant sur des résultats d'essais *in situ* dont les principes sont très anciens mais dont la technique a fait quelques progrès, pénétromètre statique en Hollande, en Belgique et dans le nord de la France (Buisman, De Beer), pressiomètre ou dilatomètre en France (Ménard, Mazier). Les résultats obtenus par la première sont forcément limités aux possibilités de l'appareil utilisé qui est loin de pouvoir tout pénétrer et peut-être aussi à celles de la théorie elle-même, qui utilise les paramètres issus d'un processus de rupture pour l'étude de phénomènes de plasticité ou d'élasticité. Le travail théorique de la seconde école est nettement plus intéressant parce qu'il est en fait indépendant de l'appareil utilisé et du matériau testé. Admettant implicitement, du moins pour l'étude des déformations, cette unité théorique que Fellellius et Terzaghi réfutaient, il permet d'aborder l'étude des déformations du géomatériau meuble ou rocheux, selon la relation classique de la rhéologie, contrainte – déformation : on définit expérimentalement un domaine de déformations élastiques et un module, un domaine de déformations plastiques et un point de rupture. Dès lors, les études conjointes de stabilités et de tassements devenaient théoriquement possibles. En fait, elles ne le sont pas vraiment puisqu'on utilise d'abord la pression limite, critère de plasticité, pour définir la stabilité et ensuite le module, critère d'élasticité, pour calculer le tassement. L'appareil utilisé, pressiomètre ou dilatomètre – mais rien n'empêche d'en utiliser d'autres au laboratoire notamment – peut facilement être mis en œuvre dans n'importe quel matériau. On peut ainsi réaliser de nombreuses mesures, en principe assez fidèles et relativement peu onéreuses, dont les résultats sont directement utilisables au moyen de formules qui doivent être manipulées avec précaution, car bien qu'apparemment rigoureuses, elle sont en fait empiriques.

La tendance a longtemps été soit d'essayer une synthèse entre la mécanique des sols classique, l'école du pénétromètre et celle du pressiomètre (Cassan, Sanglerat, Nuyens...), soit d'exploiter à fond, au moyen de l'ordinateur, les possibilités d'une part de la théorie de Boussinesq et de l'élasticité linéaire pour résoudre les problèmes de tassements et d'autre part, de la loi de Coulomb et de la théorie de la plasticité pour résoudre les problèmes de stabilité (école de Grenoble) ; on profitait alors de la puissance de l'ordinateur pour résoudre de vieux problèmes en procédant à des calculs impossibles avec du papier et un crayon ; depuis, on a systématisé l'informatisation des modèles pour pousser dans ses derniers retranchements la conception traditionnelle. La conception de Ménard est certainement la plus solide et la plus fructueuse ; elle mériterait un

approfondissement théorique sérieux ; elle a malheureusement été et continue à être altérée par l'exploitation commerciale du pressiomètre.

Je me suis attardé sur l'histoire de la mécanique des sols, qui est la principale discipline mathématique de la géotechnique, car elle caractérise bien l'évolution de la théorie, liée à la satisfaction des besoins pratiques.

À l'origine, le problème à résoudre était celui de la stabilité propre des remblais et des murs de soutènement. L'empirisme d'abord, puis la loi de Coulomb manipulée avec plus ou moins de bonheur durant tout le XIX^e siècle, ont suffi à le faire. Les simplifications allaient dans le sens de la sécurité, la construction était lente, ce qui permettait une consolidation du matériau non négligeable, à mesure que l'ouvrage s'édifiait ; et quand on se trompait, rien n'était bien catastrophique. Le bâtiment se contentait encore de solutions traditionnelles, depuis longtemps éprouvées, en superstructures comme en fondations ; il intéressait peu les mécaniciens des sols.

Avec l'apparition du béton armé vers la fin du XIX^e siècle, on s'est mis à construire vite et lourd ; le problème de la stabilité des fondations devint d'autant plus important qu'une erreur en la matière était presque toujours grave. On a alors épuisé peu à peu les ressources de la loi de Coulomb et des méthodes dérivées, en adoptant de confortables coefficients de sécurité, mais la stabilité des fondations était à peu près toujours assurée. On s'est ensuite heurté au problème des tassements, pratiquement négligé jusqu'alors, car la maçonnerie supporte beaucoup mieux les tassements différentiels que le béton, comme on le constate à Amsterdam, Mexico.... La consolidation, et en particulier le rôle de l'eau dans ce phénomène, a alors été étudiée, ce qui a permis d'aborder avec une précision suffisante le problème du tassement des hauts remblais et de la plupart des bâtiments courants.

Aujourd'hui, la finesse et la précision des calculs de superstructures en béton de plus en plus compliquées, l'usage généralisé de l'ordinateur pour les exécuter, imposent le recours à des méthodes analogues pour les calculs de fondations. On étudie enfin le comportement de l'ensemble sol/ouvrage analysé comme un système continu déformable et la raideur est devenue un des paramètres importants de la mécanique des sols ; c'est un progrès considérable. Mais malheureusement, la mécanique des sols est maintenant plutôt considérée comme une branche de la rhéologie que de la géotechnique ; chaque méthode de calcul a défini son propre module. Et selon leur habitude, les exploitants du pressiomètre ont présenté cet appareil comme le plus apte à satisfaire ce nouveau besoin ; c'est vrai en théorie ; ce l'est moins en pratique.

1.3.4.3 L'hydraulique souterraine

L'hydraulique souterraine a connu une évolution analogue. La loi de Darcy a été exprimée en 1856 ; elle rend bien compte de l'écoulement de l'eau souterraine sous faible gradient et en régime sensiblement permanent, comme il s'en produit dans les filtres à sable qui préoccupaient Darcy ; par extension, on l'a appliquée avec succès aux champs de captage par drainage gravitaire tels qu'on en établissait vers la fin du XIX^e siècle.

La théorie générale de l'écoulement laminaire en régime permanent a été présentée en 1863 par Dupuit, à propos de la tranchée drainante. Elle convient encore à l'étude de puits fournissant de très faibles débits par rapport à celui de la nappe, quand s'établit rapidement et aux environs immédiats de l'ouvrage, un écoulement permanent perturbant peu la nappe, supposée immobile et dont les limites sont considérées comme repoussées à l'infini.

Quand les puits se sont multipliés et les moyens de puisage accrus, on a dû avec Thiem en 1906, tenir compte des conditions aux limites de la nappe, tout en continuant d'admettre que le régime d'écoulement perturbateur demeurait permanent, c'est-à-dire que le débit prélevé dans la nappe était nettement inférieur au débit total de cette dernière.

Le problème de l'écoulement non permanent avait été abordé par Boussinesq dès le début du ^{xx} siècle, mais sans application pratique, car les moyens de pompages n'étaient pas encore suffisants pour la justifier ; il faudra donc attendre les années 30 pour que Thiess propose la théorie du régime transitoire. Elle a permis l'étude de cas, de plus en plus fréquents à mesure que les techniques des forages et des pompes évoluaient et que les pompages s'accroissaient, dans lesquels le débit prélevé dans une nappe est périodiquement très supérieur à son débit naturel.

Avec le développement de l'exploitation pétrolière qui conduit à épuiser plus ou moins rapidement des réservoirs limités, la théorie générale de l'écoulement des fluides dans les milieux poreux, s'est développée dans les années 40/50 avec notamment Muscat et Houpper. Ces travaux systématiques sont évidemment venus enrichir nos connaissances en hydraulique souterraine ; pendant ce temps, elle s'est plus spécifiquement consacrée aux problèmes d'alimentation, de bilan et de pollution des nappes avec les écoles russe et française. L'ordinateur permet maintenant de bâtir et de faire tourner des modèles numériques, pour l'étude systématique de vastes domaines hydrographiques, comme cela est devenu nécessaire pour résoudre certains problèmes de ressources limitées ou de pollution.

1.3.4.4 La géophysique appliquée

C'est aussi à la prospection pétrolière que l'on doit la création de la géophysique appliquée par Schlumberger en 1920, puis son développement. La miniaturisation de ses appareils par les ingénieurs de génie civil américains durant les années 50, a été rendue possible par le développement de l'électronique ; leur utilisation a ensuite été améliorée grâce à la prise de mesures et au traitement des signaux par des moyens informatiques. Ainsi, les géotechniciens disposent maintenant d'une gamme d'appareils adaptés à toutes les méthodes de la géophysique qui, pour certaines, sont de développement récent.

1.3.4.5 Les sondages mécaniques

La technique des sondages est aussi de développement récent, bien que la Chine antique et le Moyen Âge du nord de la France aient connu le forage par battage. Du puits à la main, connu de tout temps et partout, on est passé du battage au

câble, à la rotation et à la roto-percussion, en tête puis en fond de trou. On y a plus gagné en rendement qu'en précision. Heureusement, les techniques récentes d'enregistrement des paramètres de sondage en continu, ont rendu presque rigoureuses des opérations qui ne l'étaient guère. L'échantillonnage s'est constamment amélioré en perfectionnant les carottiers, mais l'échantillon intact est toujours un objet mythique.

1.3.4.6 La mécanique des roches

Le développement des grands aménagements hydroélectriques de montagne, barrages et galeries durant les années 30, mais surtout à partir des années 40, conduisit à la création de la mécanique des roches, sans que l'on se soit bien rendu compte au départ qu'elle n'est pas essentiellement différente de la mécanique des sols. Logiquement, elle devrait s'intégrer à la géomécanique, discipline mathématisée de la géotechnique ; c'est la position que j'ai adoptée dans mes essais.

1.3.4.7 La géologie de l'ingénieur

La géologie de l'ingénieur a toujours été exercée occasionnellement par certains géologues scientifiques. Ils étaient consultés par des maîtres d'œuvre avisés, notamment pour la construction des grands ouvrages transalpins de la fin du XIX^e siècle, comme Argand et d'autres (Révenier, Heim, Taramelli, Schardt, Lugeon) pour le creusement du premier tunnel ferroviaire du Simplon ; c'est une des raisons pour lesquelles les Suisses sont d'excellents géologues appliqués. Elle s'est individualisée durant la deuxième partie de la guerre de 1914-1918 avec les sections spécialisées des armées alliées puis allemandes. Elle s'est civilisée durant les années 20 et 30 par la collaboration systématique d'éminentes individualités comme Lugeon, aux grands aménagements hydroélectriques de montagne ; elle s'est développée à partir des années 40 aux États-Unis d'abord puis en Europe occidentale, avec des équipes fortement structurées comme celle d'EDF (Électricité de France). Dans les années 60 et ensuite, elle a par contre, raté le coche des autoroutes et autres grands aménagements, sur lesquels n'intervenaient pratiquement que des ingénieurs généralistes, uniquement préoccupés de sondages, d'essais et de calculs ; le nombre et la gravité de leurs ratés a progressivement redonné à la géologie de l'ingénieur un peu de la place qu'elle n'aurait pas dû perdre.

1.3.4.8 Les sciences de l'ingénieur

Poussées par la nécessité, les sciences de l'ingénieur et plus particulièrement celles de la construction ont connu un développement continu et cohérent depuis le milieu du XIX^e, à mesure des progrès de la mécanique, de la résistance des matériaux, des méthodes de calcul ainsi que de la technique des matériels de chantier. Parallèlement et sur le même modèle, on a continué à faire de la géotechnique sans le savoir, en dehors de toute préoccupation géologique. C'est ce qui explique en grande partie la mainmise des ingénieurs de formation généraliste sur la géotechnique qui considèrent que la géomécanique est un

chapitre de la rhéologie et de la résistance des matériaux, et que tout problème de géotechnique peut être résolu par le calcul.

Sur le plan officiel enfin, on peut relever, parmi les grandes premières, la création de la Commission géotechnique de la Société helvétique des sciences naturelles en 1899, la tenue du premier Congrès international de mécanique des sols en 1935, de mécanique des roches en 1966 et de géologie de l'ingénieur en 1968, d'hydrogéologie en 1974. Quelques congrès œcuméniques ont été organisés depuis les années 80 ; ils paraissent n'avoir pas convaincu grand monde.

Une histoire complète de la géotechnique reste toujours à écrire, non pas de la géotechnique récente, celle de la phase scientifique qui débute au XVIII^e siècle et que l'on connaît à peu près bien, mais plutôt celle de la phase empirique à travers les âges et les civilisations. La connaissance des solutions apportées aux problèmes géotechniques auxquels les hommes ont été confrontés au cours de leur évolution, nous serait sûrement profitable ; elle nous aiderait à aborder avec de meilleures armes les problèmes de plus en plus difficiles qui se posent à nous. En effet, sous des dehors scientifiques, on doit souvent les résoudre tout aussi empiriquement qu'eux, en faisant appel au bon sens et à l'expérience : la géomécanique n'est qu'une partie de la géotechnique.

1.4 Évolution

L'état actuel de la géotechnique résulte de l'histoire que je viens d'évoquer et plus récemment des chemins parallèles voire antagonistes suivis par la géologie de l'ingénieur et la géomécanique, les deux éléments d'égale valeur, indissociables et indispensables qui la constituent : mais la géologie de l'ingénieur ne fait que frôler la géomécanique par quelques formules relatives aux propriétés mécaniques et hydrauliques des sols et roches dont elle maîtrise mal l'usage pratique ; la géomécanique semble toujours ignorer que l'on ne peut pas réduire une étude géotechnique à des calculs traitant des données obtenues par sondages et essais, car une intégration analytique ou numérique n'est qu'un passage conventionnel de valeurs locales de paramètres à un modèle virtuel ; la géologie permet d'assurer le passage réel des échantillons au site et ainsi de donner un cadre cohérent à l'étude ; rares sont les géotechniciens qui utilisent conjointement la géologie et la géomécanique comme des outils complémentaires d'analyse pour aboutir à une synthèse proprement géotechnique.

Historiquement, chaque discipline de la géotechnique a très schématiquement évolué en trois phases à chaque étape de son développement. La première phase est la nécessité pratique de résoudre un problème technique nouveau par l'empirisme basé sur l'observation et l'expérience selon les moyens dont on dispose à l'époque considérée ; la deuxième est la mathématisation des théories tirées de cette résolution, destinée à les préciser, à les codifier, à les archiver et à les appliquer sous forme de calculs, règles et normes ; après une période plus ou moins longue d'adéquation durant laquelle les résultats pratiques valident les théories, la troisième phase débute quand en raison de l'évolution technique et/

ou à propos d'un problème nouveau, on s'aperçoit que l'on s'est enfermé dans un système axiomatique trop rigoureux et que les résultats pratiques diffèrent plus ou moins de ceux auxquels conduit la stricte déduction théorique ; en principe on devrait alors réviser les théories pour les adapter à la réalité par l'observation, en profitant des progrès techniques qui n'ont pas manqué de se produire entre temps, ce qui ouvre une autre étape dont elle annonce la première phase. Une perversion de cette troisième phase est de ne pas s'apercevoir ou s'avouer que l'on s'est enfermé dans un système trop rigide qui ne permet pas de rendre compte de certains faits sur l'interprétation desquels on bute ; on essaie alors d'adapter un système dépassé en trichant, sciemment ou non, pour lui faire englober plus qu'il ne peut, ce qui peut se révéler très dangereux : un résultat juste de calcul théoriquement correct, le respect de normes fondées seulement sur la théorie ne garantissent pas la qualité de leur application pratique ; seule l'expérience permet de le faire ; c'est ce que la géotechnique actuelle a plus ou moins oublié.

Son outil mathématique tant analytique que numérique est parfaitement rodé et son mode d'emploi est clairement défini. Malheureusement accepté comme tel et indiscuté, il est souvent utilisé sans discernement ; des résultats pratiques contestables risquent ainsi d'être considérés comme valables par le seul fait qu'ils sont issus de calculs rigoureux. Et des immeubles se fissurent, des talus glissent, des soutènements s'écroulent... On s'aperçoit alors que le géomatériau n'est ni homogène, ni isotrope, ni tout ce que la géomécanique voudrait qu'il soit, ou plus concrètement, on déplore de ne pas pouvoir passer mathématiquement des échantillons au site. On constate fréquemment que, pour utiliser universellement telle formule type établie dans tel pays, pour tel matériau et valable dans ce cas strict bien que ce soit rarement explicité, on l'affecte d'un mystérieux coefficient k , ou bien on y introduit une non moins mystérieuse fonction a^x ; hélas, l'expérience montre que dans un cas donné, le choix des valeurs de k ou de a est plus ou moins arbitraire et qu'ainsi, le résultat obtenu par l'application d'une telle formule est pour le moins sujet à discussion sinon tout à fait fantaisiste ou évident.

Actuellement, la géotechnique tourne en rond ; les calculs classiques, les règles et normes sont apparemment rigoureux, indiscutables ; mais elle est enlisée dans la recherche informatique pour produire et interpréter à l'ordinateur des phénomènes virtuels convenus, négligeant les phénomènes réels que l'on n'observe plus qu'*a posteriori*, quand un accident s'est produit : selon la méthode de Boussinesq, toujours utilisée et généralement avec fruit à condition d'en bien connaître la valeur et les limites, l'expression de la poussée exercée sur un mur de soutènement par une charge limitée appliquée sur le remblai amont, ne tient pas compte des caractéristiques mécaniques du remblai ; cette méthode est fondée sur la théorie du champ de contraintes dans un milieu élastique et non pesant alors que, pour calculer la poussée du remblai lui-même, il faut avec Rankine, s'appuyer sur la théorie de la rupture d'un milieu cohésif, frottant et pesant. Les théories de Rankine et de Boussinesq n'ayant aucune base commune, le problème de la poussée totale du remblai et de sa surcharge n'est globalement pas soluble ; pour étudier la poussée de la surcharge, on a donc d'abord dû négliger celle du remblai en justifiant consciemment ou non ce point de vue par l'attribution au remblai de caractéristiques irréelles, puis on a peu à

peu oublié le remblai tout en étudiant théoriquement tous les cas possibles de surcharges jusqu'à ce que quelques accidents aient rappelé que le remblai existait et qu'il n'était pas toujours possible de négliger l'effet de sa présence. Pour résoudre ce genre de problème, l'ordinateur permet maintenant de longues séries de calculs compliqués, basées sur les variations itératives des valeurs de paramètres qui, en principe, devraient être les invariants d'un matériau donné. Cela prolonge la vie de la technique de calcul classique, en déterminant ainsi le milieu qui convient et les conditions aux limites du modèle pour que le problème soit soluble ; si par la suite un accident se produit, ce ne sera pas parce que le calcul était erroné, mais parce que le géomatériau n'était pas conforme au milieu et le site pas conforme au modèle !

Imposé par les faits, un retour à l'observation et à l'expérience est devenu nécessaire ; il semble traduire le fait que la géotechnique revienne de la géomécanique à la géologie, de la rigueur à l'approximation ; en fait elle avance en adaptant le modèle à la réalité, le milieu au géomatériau, la théorie à l'observation et à l'expérience, bases de la recherche/développement.

Pour le moment, l'école mécaniste occupe le devant de la scène géotechnique parce que la phase de mathématisation par le calcul infinitésimal vient à peine de s'achever et que celle de la modélisation numérique est en plein développement ; leurs applications systématiques sont facilitées par la puissance de calcul et la commodité d'utilisation de l'ordinateur qui permettent de faire sortir d'une imprimante les caractéristiques d'un ouvrage complexe dont le comportement réel se révélera ensuite... étonnant. Les actuels traités et publications de mécanique des sols et des roches, d'hydraulique souterraine, de géophysique... sont en partie des exercices de mathématiques appliquées à la manipulation d'un milieu dont les liens avec le géomatériau sont extrêmement ténus, et non des textes de géotechnique faisant également appel à l'expérience et à la théorie comme il serait prudent de le faire ; on trouve même dans ces écrits, dans les cours et aux examens, des exercices et problèmes de géotechnique qui sont de la veine de ceux de robinets qui vident et remplissent des réservoirs ou de trains qui se croisent, de l'école primaire : soit un matériau comme ceci et cela, un ouvrage comme cela et ceci, calculer... *l'âge de l'ingénieur*, au moyen de la formule adéquate ; et si le résultat est conforme au corrigé, *tu seras ingénieur, mon fils !*

De belles formules et de beaux modèles numériques issus d'équations compliquées et de calculs savants, caractérisent le niveau de mathématisation actuellement atteint par la géotechnique ; ce niveau ne pourra être dépassé que quand, à la suite de Terzaghi, de Skempton et de quelques autres, la plupart des géotechniciens admettront leurs limites d'application ; pour l'heure, ils pensent encore que leurs possibilités sont à peu près illimitées et que l'augmentation de puissance des ordinateurs aplanira les difficultés actuelles en permettant de manipuler de plus en plus de paramètres dans des systèmes d'équations de plus en plus compliqués.

Le retour aux réalités se fait inéluctablement à mesure que les nombreuses applications de la géotechnique auront montré clairement l'imprécision fondamentale des résultats de ces calculs et multiplié les cas d'exception aux règles et normes. Les utilisateurs de la géotechnique en exigent des renseignements de

plus en plus précis ; on peut donc prévoir que ce retour nécessaire au pragmatisme rappellera que le milieu idéal d'un modèle schématique n'est que l'image imparfaite du matériau tangible d'un site réel.

La géotechnique devrait donc entrer dans la phase de son évolution où l'outil mathématique classique est suffisamment dominé par le praticien pour qu'il ne l'utilise que dans un contexte naturel clairement défini. On peut prévoir que cette phase permettra de faire évoluer en la précisant notre conception du géomatériau et de poursuivre son étude au moyen d'outils mieux adaptés, la statistique, la théorie du chaos...

Ces outils sont déjà créés et rodés, leur mode d'emploi est clairement défini ; l'évolution dans le sens de leur utilisation en géotechnique peut être très rapide. Certains l'ont déjà amorcée mais c'est, à de rares exceptions près, prématuré car notre connaissance du géomatériau ne peut techniquement pas être encore assez détaillée pour qu'il soit toujours possible de le faire fructueusement. On sait en effet que sa variabilité n'est pas aléatoire mais plutôt dépendante, ou mieux même qu'il est structuré. La prise en compte de ses hétérogénéités conduit à des difficultés théoriques sur lesquelles les géotechniciens butent actuellement quand ils essaient d'utiliser correctement les résultats issus de traitements mathématiques classiques. Ces hétérogénéités ne sont pas le fait du hasard et leur répartition correspond bien à des structures que l'on a peut-être beaucoup de mal à appréhender mais qui n'en sont pas moins réelles.

L'étude statistique du géomatériau peut donc être abordée selon deux conceptions différentes qui entraîneront ou entraînent déjà une nouvelle confrontation de la démarche du géologue à celle du mécanicien, c'est-à-dire une nouvelle querelle d'écoles.

Si en effet, on considère que la variabilité du géomatériau est aléatoire et que son comportement est chaotique, on est conduit à multiplier les paramètres à mesurer pour le décrire et surtout les mesures de ces paramètres. La probabilité de découvrir une hétérogénéité mineure pour la nature, mais peut-être majeure pour l'ouvrage, comme l'existence d'une petite zone d'argile plastique susceptible de favoriser le glissement d'un massif dans lequel sera ouverte une tranchée, sera directement liée au choix du ou des paramètres à mesurer et surtout au nombre de mesures effectuées car la démarche statistique impose de longues séries de données. Si comme cela est très souvent le cas, l'hétérogénéité est très petite à l'échelle du massif, ce nombre peut être tellement grand qu'il est impossible, tant techniquement qu'économiquement, d'effectuer toutes les mesures nécessaires pour la mettre en évidence et elle pourra facilement échapper à une recherche fondée sur sa probabilité aléatoire.

Si par contre, on considère que la variabilité du géomatériau traduit un ordre issu d'états antérieurs, on peut pressentir ou écarter l'existence d'une hétérogénéité techniquement dangereuse, prévoir ses caractères généraux puis, au moyen d'un nombre limité de mesures d'un paramètre judicieusement choisi, démontrer son existence ou son inexistence. Le paramètre choisi dans ce but peut ne pas être celui qui interviendra ensuite pour étudier l'influence éventuelle de l'hétérogénéité sur le point technique particulier pour lequel on peut la juger dangereuse ; les mesures portant sur ce dernier pourront même n'intervenir

qu'après que l'hétérogénéité aura été parfaitement repérée. Pour préciser l'exemple précédent, on peut imaginer un massif de grave fluvio-glaciaire dans lequel on compte réaliser une tranchée : en observant cette grave en des endroits différents du site de la tranchée, on peut se rendre compte qu'elle est susceptible d'être localement très argileuse et que les parties de talus existants correspondant à ces zones argileuses sont particulièrement instables ; on essaiera donc de repérer dans le site de la tranchée d'éventuelles zones plus ou moins argileuses au moyen de travaux de géologie de terrain puis de géophysique électrique (cf. 5.7.2.1), étalonnés sur l'endroit de référence ; si de telles zones ont pu être ainsi circonscrites dans le site, on y exécutera un petit nombre de sondages carottés ou non ; au cours de ces sondages, on effectuera des essais *in situ* et on prélèvera des échantillons sur lesquels on réalisera des essais de laboratoire. Les sondages et essais, peu nombreux, auront alors uniquement servi à mesurer les paramètres influents du matériau des zones plus ou moins argileuses, hétérogénéités non aléatoires d'une grave structurée.

On conçoit qu'en procédant ainsi, on puisse réduire énormément le nombre des sondages et essais qu'il aurait fallu faire si l'on avait dû, par ce seul moyen, délimiter aussi les zones plus ou moins argileuses considérées comme des hétérogénéités aléatoires de la grave. Et comme pour des raisons économiques, ce nombre ne saurait être très grand, il peut arriver dans le deuxième cas, que la probabilité de mettre en évidence l'hétérogénéité soit à peu près nulle. Quelle est en effet la valeur statistique et la représentativité de quelques unités, quelques dizaines ou même de quelques centaines d'échantillons dont le volume unitaire ne dépasse pas un ou deux litres, pris à peu près au hasard dans un volume de matières hétérogènes de quelques centaines de milliers de mètres cubes, constituant le sous-sol d'un site dont la surface vaut quelques hectares et l'épaisseur utile, une dizaine de mètres ?

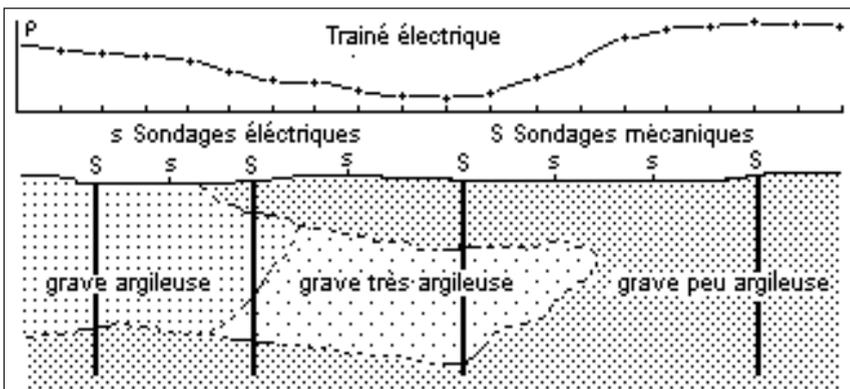


Figure 1.4 – Hétérogénéité d'une grave plus ou moins argileuse

C'est donc bien en considérant que le géomatériau est hétérogène comme le regrette le géomécanicien mais structuré comme le sait le géologue que la géotechnique évoluera de façon rationnelle et sûre.

Le premier principe de la géotechnique est un principe de précaution, simple à exprimer, difficile à mettre en œuvre : étudier, construire et entretenir nos ouvrages pour qu'ils soient fonctionnels, sûrs et économiques, en évitant les dommages, les accidents, les catastrophes. Ses principes secondaires sont issus de sciences et techniques nombreuses et variées, de sorte qu'ils sont exprimés par des théoriciens et des praticiens qui n'ont pas la même formation, le même langage ni la même forme de raisonnement : qu'est-ce qui distingue et/ou rapproche la géomécanique de la géodynamique, l'hydraulique souterraine de l'hydrogéologie ? En quoi et comment la construction d'un ouvrage modifie-t-elle son site et comment ce dernier réagit-il ? Un géomécanicien a-t-il besoin de bien connaître la géologie ? Et donc qu'est-ce qu'un géotechnicien ? ... Les réponses sont simples, mais débouchent sur des principes compliqués.

2.1 Cadre scientifique

La géotechnique a une place nettement individualisée parmi les sciences en général et les géosciences en particulier. Elle utilise ou peut utiliser les théories et les méthodes de presque toutes les autres pour permettre la mise en œuvre du géomatériau, ce qui implique que ses préoccupations et sa méthode propres soient essentiellement pratiques. Surtout liée à la géologie et à la physique, elle ne doit pourtant pas être particulièrement attachée à l'une d'elles.

Dans le groupe des géosciences, la géotechnique est une subdivision de la géologie appliquée. Elle synthétise les applications de la géologie, de la géophysique, de la géomécanique, de l'hydrogéologie, de l'hydraulique souterraine et de l'ingénierie du BTP. Ces disciplines ont des bases théoriques différentes mais des bases pratiques communes ; si l'étude de chacune d'elles peut à la rigueur être envisagée indépendamment, il ne saurait en être de même de leurs applications.

La segmentation des géosciences en cristallographie, minéralogie, géologie, hydrogéologie, géographie physique, géophysique, mécanique des sols, mécanique des roches, hydraulique souterraine..., traduit l'évolution historique de la géologie qui était initialement la seule géoscience. Ces disciplines s'en sont peu à peu détachées et ont fini par devenir plus ou moins autonomes ; une spécialisation de plus en plus poussée de leurs praticiens la concrétise. En recherche fondamentale, cette spécialisation est nécessaire : un seul homme ne peut tout savoir ni surtout tout faire ; elle permet donc à chaque discipline d'évoluer dans les meilleures conditions. Mais leur autonomie est devenue telle que la plupart des spécialistes de chacune n'ont pratiquement plus de connais-

sances communes hors celles de base, acquises au début de leurs études supérieures, ou pire, au cours du secondaire et généralement oubliées depuis. C'est très souvent le cas des spécialistes de la géomécanique et même parfois de la géophysique, qui n'arrivent ainsi que très rarement à considérer leurs disciplines comme des sciences naturelles, ce qu'elles sont pourtant de façon indiscutable.

2.1.1 Les disciplines

Les disciplines qu'utilise la géotechnique, proposent des théories et des formes de raisonnement permettant de poser et de résoudre spécifiquement les problèmes de mise en œuvre du géomatériau. Le géotechnicien doit les pratiquer pour ce qu'elles lui apportent et non pour ce qu'elles sont ; s'il n'était que le spécialiste de l'une d'elles, il se limiterait à une seule partie d'un ensemble qu'il lui est nécessaire de connaître globalement.

La géotechnique n'a pas de relation directe avec les sciences de la vie ; ses rapports avec les sciences humaines sortent du cadre de cet essai et on étudiera plus loin ses aspects économiques et juridiques. La géologie est son cadre d'observation, de modélisation analogique des objets, et de synthèse ; la physique et la chimie sont ses cadres de quantification et de modélisation numérique des objets et des phénomènes qu'elle manipule ; les mathématiques sont l'outil de cette manipulation.

2.1.1.1 La géologie

Le rôle de la géologie est essentiel en géotechnique ; c'est la discipline de base qui permet que la description du géomatériau et de son comportement soit cohérente et convenable ; sa démarche qui s'appuie sur le visible et l'accessible, est qualitative ou semi-quantitative ; elle doit donc être précisée par des mesures dans le cadre d'autres disciplines. Du point de vue morphologique, elle fournit à chaque échelle d'observation, les modèles schématiques les plus proches de la réalité, ce qui devrait conduire les autres disciplines à ne pas utiliser des modèles trop abstraits de conditions aux limites, nécessaires pour résoudre leurs équations. Du point de vue comportemental, elle permet d'étudier les phénomènes complexes, difficiles à mathématiser et de justifier la formulation de ceux qui peuvent l'être.

► La pétrographie

La pétrographie décrit et classe logiquement les roches de façon hétérogène mais cohérente, à la fois morphologique et comportementale ; schématiquement, les roches éruptives sont classées selon leur mode de mise en place, leur minéralogie et leur texture, les roches sédimentaires, selon leur mode de dépôt et leur granulométrie, les roches métamorphiques, selon les roches d'origine et leur degré de transformation. En géotechnique, seule la morphologie importe.

► **La géologie structurale**

La géologie structurale décrit et classe les ensembles rocheux et leurs relations, à des échelles successives allant de l’affleurement au globe terrestre. En fait, elle s’intéresse plus aux relations qu’à la morphologie ; la géotechnique fait le contraire, ce qui en complique l’utilisation.

► **La géomorphologie et la géodynamique**

La géomorphologie et la géodynamique décrivent l’aspect et l’évolution de la subsurface terrestre. Elles s’appuient sur des observations directes du géomatériau et de son comportement. Leur rôle est essentiel en géotechnique ; elles pourraient procurer des modèles-types aux géomécaniciens qui souhaiteraient éviter les élucubrations mathématisantes ; peu d’entre eux les connaissent.

► **L’hydrogéologie**

L’hydrogéologie s’intéresse aux relations de l’eau et du sous-sol mais davantage aux matériaux aquifères et aux réseaux de circulation qu’aux mouvements de l’eau eux-mêmes, contrairement à la géotechnique. Elle lui est néanmoins indispensable pour lui donner des modèles réalistes de réservoirs et de conduites.

► **La paléontologie**

La paléontologie s’est en partie détachée des géosciences pour se rapprocher des sciences de la vie ; sans abandonner tout à fait son rôle initial de chronographe géologique relatif, elle est progressivement devenue la science des archives de la biologie et un des supports de la théorie de l’évolution. La géotechnique y a très rarement un recours direct.

2.1.1.2 La physique

La géotechnique est très proche de la physique en ce qu’elle aussi modélise mathématiquement les objets et phénomènes réels qu’elle étudie ; on peut la considérer comme le prolongement normal de la physique macroscopique appliquée qui s’intéresse à la matière élémentaire, dans le domaine de la matière complexe qu’est le géomatériau. En géotechnique comme en physique macroscopique, on étudie ou on utilise la métrologie, la pesanteur (gravité, géomécanique), la mécanique vibratoire (sismique), la mécanique des fluides (hydraulique souterraine) la chaleur (géothermie), l’électromagnétisme et la radioactivité. La géomécanique est un chapitre de la mécanique (rhéologie, résistance des matériaux) ; toutes ses théories et méthodes en sont directement issues ; ses théoriciens sont des mécaniciens et ses praticiens sont des ingénieurs.

Les disciplines physiques de la géotechnique, géophysique, géomécanique et hydraulique souterraine, permettent d’affiner la connaissance d’un site, acquise au moyen des techniques de la géologie qui concernent le visible et l’accessible. Elles considèrent que le géomatériau est le siège de champs de forces naturels ou induits, permanents ou transitoires. Elles en étudient la répartition et l’évolution naturelles ou artificielles ; elles postulent que les équipotentielles de

ces champs à la surface du sol, sont directement liées à la nature et à la structure locales du matériau invisible et inaccessible qui constitue le sous-sol d'un site.

Selon ce que l'on veut étudier du site, le choix du champ et de son paramètre caractéristique est possible en géophysique ; il ne l'est pas en géomécanique qui ne concerne que la gravité, le couple contrainte/déformation et sa relation biunivoque.

L'interprétation des mesures est indirecte ; elle est d'abord objective quand on mesure les variations du potentiel du champ depuis la surface ; elle est ensuite déjà subjective pour calculer la forme tridimensionnelle du champ à partir des équipotentielles de surface, et devient enfin très subjective pour relier cette forme à la structure du sous-sol du site.

Le géomatériau n'est pas homogène et isotrope comme le voudrait la théorie ; le potentiel local y dépend d'un grand nombre de caractères géométriques et physiques, souvent mal identifiés : on ne peut donc pas résoudre l'équation du champ et calculer le potentiel réel d'un point quelconque du sous-sol. On essaie de s'en approcher en introduisant dans les calculs d'intégration, des hypothèses simplificatrices, forme du volume, distribution du matériau dans le volume, conditions aux limites du volume... simples. Mais ces hypothèses sont éloignées de la réalité ; et même, en raison du grand nombre de mesures que cela imposerait, on ne sait pas tracer avec précision la carte du potentiel à la surface du sol ; on ne peut donc pas connaître la valeur ponctuelle réelle du paramètre. Les résultats auxquels on arrive, ne rendent compte que très imparfaitement de la distribution tridimensionnelle du potentiel et donc, de la structure du matériau du volume.

Pour qu'une technique soit utilisable dans un site donné, il faut que l'équation du champ utilisé puisse être intégrée sans qu'il soit nécessaire d'adopter un trop grand nombre d'hypothèses simplificatrices, que les variations significatives du potentiel soient suffisamment grandes à l'échelle du site étudié pour que les instruments de mesures puissent les mettre en évidence, que ces variations se distinguent suffisamment d'éventuelles variations parasites et surtout, qu'elles ne soient pas aléatoires.

On peut ainsi affiner le modèle du site proposé par la géologie mais non en établir un.

► **Cristallographie et minéralogie**

La cristallographie étudie les cristaux composés d'atomes organisés en réseaux. À l'origine branche géométrique de la minéralogie, elle est devenue une branche de la physique du solide ; elle est à la base de la création de matériaux nouveaux pour l'industrie.

La minéralogie étudie les minéraux, formes directement observables des cristaux, isolés ou plus généralement éléments de roches. Historiquement la plus ancienne, elle s'est depuis longtemps séparée de la géologie qui l'avait quelque temps absorbée ; elle est maintenant considérée comme une science physique, car elle s'intéresse plus à la structure et aux propriétés de la matière minérale qu'à sa morphologie.

► La géophysique

La géophysique est la discipline qui étudie les propriétés physiques du géomatériau, ainsi que les phénomènes physiques qui l'affectent à l'échelle de la Terre ou d'un site ; elle concerne les mêmes matières que la physique mais la géophysique a fait l'objet d'un développement indépendant.

Sur le fond, les préoccupations de la physique et de la géophysique sont très proches. Seulement la matière étudiée par la géophysique est beaucoup plus complexe et hétérogène que celle étudiée par la physique ; il s'agit de roches et non de corps simples. De plus, à l'exception de celle des échantillons étudiés en géomécanique, cette matière n'est pas à la disposition de l'expérimentateur dans un laboratoire et doit être étudiée *in situ* et même seulement à partir de la surface de la Terre, puisque ce qui est en profondeur est à peu près inaccessible.

En géotechnique, le rôle essentiel de la géophysique est de préciser les données géologiques et de valider et simplifier les modèles de la géomécanique. Pour l'étude du risque sismique, elle a évidemment un rôle spécifique.

► La géomécanique

La géomécanique est une discipline nécessaire mais insuffisante de la géotechnique.

La séparation de la mécanique des sols et de la mécanique des roches est conventionnelle ; avec l'hydraulique souterraine, elles constituent en fait une seule discipline, la géomécanique. Celle-ci concerne la déformation ou le déplacement de géomatériau, sol, roche ou eau, sous l'action de la gravité à laquelle peuvent se superposer des contraintes induites. Elle manipule des modèles très schématiques, issus de conditions aux limites simplistes qu'impose l'intégration d'équations de champs très complexes. Elle mesure très ponctuellement divers paramètres, sur échantillons ou *in situ* et prétend les extrapoler à l'ensemble du site ; cela pose un problème théorique insoluble, artificiellement résolu par l'introduction de mystérieux coefficients de formes dans les formules. Le passage correct des échantillons au site ne peut pas être réalisé par la géomécanique ; elle a besoin de la géologie et de la géophysique pour y parvenir ; ses modèles doivent être compatibles avec la structure réelle du site étudié, ou bien demeurent des objets d'exercices scolaires.

La géomécanique réduit le géomatériau à être plus ou moins résistant, compressible et perméable ; elle réduit l'action à une contrainte qui produit un déplacement, une déformation instantanée pouvant aller jusqu'à la rupture, ou un écoulement. La pente naturelle d'un versant ou plus communément l'ouverture d'une excavation, pose le problème de la stabilité d'un talus et d'un éventuel soutènement ; les fondations d'un ouvrage posent le problème de la stabilité à la rupture qui est un problème analogue au précédent, et le problème du tassement, qui est totalement différent ; le puisage ou l'épuisement d'eau souterraine pose le problème de la relation débit/rabattement. C'est tout, essentiel mais nettement insuffisant pour résoudre tous les problèmes géotechniques que posent la conception et la construction des organes géotechniques d'un ouvrage.

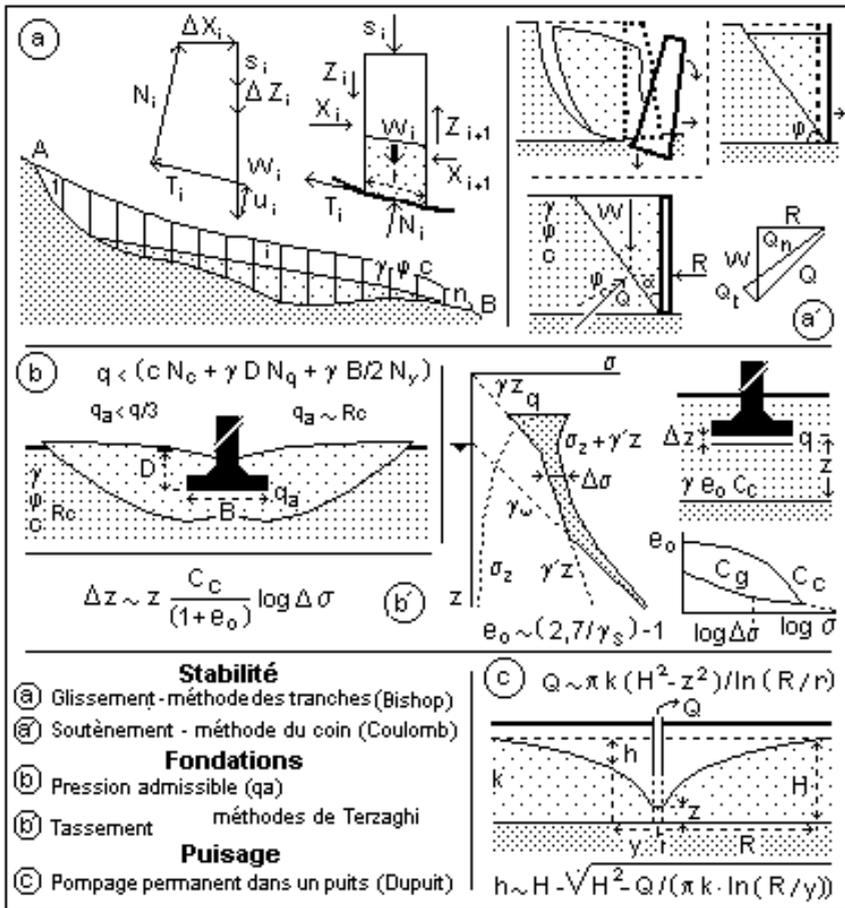


Figure 2.1.1.2.3 – Principaux problèmes de géomécanique

Pour résoudre les problèmes géotechniques, la géomécanique, strictement déterministe, limite son étude à l'action des ouvrages sur le géomatériau, ramenée au comportement d'un massif homogène et semi-infini, soumis à une action extérieure : à toute action, correspond une réaction spécifique ; deux variables, l'une connue représentant la cause et l'autre inconnue représentant l'effet, sont combinées dans des équations, généralement biunivoques, avec des constantes représentant le géomatériau et caractérisant plus ou moins les limites du phénomène ; les constantes ayant été déterminées directement ou indirectement par des mesures ou des estimations, à chaque valeur de la variable cause correspond une et une seule valeur de la variable effet. Toute formule de géomécanique, si apparemment compliquée soit-elle, est de ce type ; et quand on constate comme Skempton et tout géotechnicien lucide, que ces formules conduisent à des résultats qui, à l'expérience, ne s'avèrent pas, on met en cause la qualité des mesures des constantes, afin de préserver la formule. Pour préserver la théorie déterministe, on dit que le nombre des constantes dans la

formule est insuffisant pour bien décrire le matériau et le phénomène ; on dit même que ce nombre serait tel qu'un ordinateur ultra-puissant ne pourrait pas manipuler la formule qui les intégrerait ; en bon théoricien, on néglige alors d'indiquer le temps qu'il faudrait pour identifier et mesurer toutes ces constantes et ainsi, de montrer l'irréalisme de cette position. On oublie aussi que tout problème de géomécanique consiste à extrapoler des résultats d'expérience à l'échelle de l'échantillon, pour prévoir le comportement d'un massif. Cela implique un changement d'échelle qui a pour corollaire que l'on adopte un point de vue probabiliste d'indétermination ; à une échelle différente de celle pour laquelle ils sont conçus, nos méthodes et nos moyens d'observation et de mesures habituels, introduisent des erreurs systématiques irréductibles, de sorte qu'un fait expérimental à une échelle donnée, ne peut être que plus ou moins indéterminé à une échelle différente tant d'ordre supérieur qu'inférieur.

L'hydraulique souterraine concerne la mathématisation de l'écoulement de l'eau dans le sous-sol, naturellement sous l'action de la gravité ou artificiellement, par pompage. Elle a besoin de modèles de réservoirs et de conduites issus de l'hydrogéologie ; on leur préfère souvent ceux issus de calculs complexes comme les réflexions d'ondes aux limites ; la précision des résultats que l'on en obtient est dérisoire ; c'est alors la plus décevante des disciplines qu'utilise la géotechnique. Il est pourtant indispensable d'y avoir recours, avec prudence, à partir de modèles réalistes.

La géophysique et la géomécanique ont été en grande partie développées par des physiciens et des ingénieurs ; elles n'ont que des rapports de principe avec la géologie ; pourtant leurs modèles doivent être calqués sur ceux de la géologie, discipline fédératrice de la géotechnique : tout résultat de géophysique ou de géomécanique, incompatible avec une observation géologique, est inacceptable en géotechnique. Il est donc curieux de constater à quel point elles ont pu devenir abstraites en traitant d'un sujet aussi concret que le géomatériau : l'hydraulique souterraine n'a pratiquement aucun lien avec l'hydrogéologie, ni la géomécanique avec la géodynamique... C'est sans doute parce que l'hydrogéologue primitif était un sourcier tel que le représentait Agricola (*cf.* 2.2.1), une fourche de coudrier entre les mains, loin des spéculations déductives ; on verra plus loin que des pratiques proches de celles des sourciers, se montrent encore sur la scène géotechnique.

2.1.1.3 La chimie

La géotechnique emprunte à la chimie et à la chimie minérale en particulier, des données descriptives et dynamiques relatives aux corps simples, à leurs affinités et à leurs arrangements dans certaines conditions de milieu, ainsi que des méthodes d'analyse.

2.1.1.4 Les mathématiques

Comme la plupart des sciences et des techniques quantitatives, la géotechnique emprunte aux mathématiques appliquées, une partie de leur langage, ainsi que

des méthodes et des données plus ou moins générales. Elle les utilise habituellement sous des formes relativement simples ; la plupart des problèmes mathématisés de la géotechnique s'appliquent à des valeurs des données mesurées sur des objets ou au cours de l'évolution de phénomènes ; ils s'expriment par des fonctions de points, s'étudient par le calcul infinitésimal, trigonométrie et/ou numérique et se résolvent au moyen de formules simples ou de manipulations statistiques appliquées à des variables généralement dépendantes et plus rarement aléatoires. Il n'est pas toujours nécessaire de mathématiser un problème géotechnique pour le poser et le résoudre.

2.1.2 La géotechnique

Science naturelle et physique, technique multiforme, la géotechnique est difficile à caractériser et à classer dans le groupe des géosciences auquel elle appartient évidemment.

Elle étudie l'ensemble constitué par un site et un projet puis un ouvrage. Elle doit décrire cet ensemble puis en prévoir l'évolution dans l'espace et dans le temps. Selon le cas, cette étude peut être réalisée à diverses échelles de dimensions (atome, cristal, roche, formation, massif, région, province...) et de temps (temps géologique, temps de l'humanité technique, temps de l'individu humain...). Science d'objets, elle est essentiellement descriptive ; elle s'intéresse à la description statique du géomatériau. Science de phénomènes, elle est à la fois descriptive et prédictive ; elle s'intéresse aux transformations passées et présentes du géomatériau, tant naturelles qu'artificielles, pour en tirer des types de comportement propres à en prévoir les transformations futures dans des circonstances données.

Les objets comme les phénomènes peuvent être envisagés soit sous leur aspect naturaliste, essentiellement qualitatif, soit sous leur aspect physique, quantitatif. Dans la plupart des cas, la considération indépendante de ces deux aspects conduit à scinder artificiellement leur étude et par là même, à accroître le risque de la rendre incomplète. En géotechnique, ces deux aspects doivent toujours être considérés simultanément ; l'un ne doit pas être subordonné à l'autre puisqu'ils sont complémentaires.

Les sciences naturelles sont prédisposées à la systématisation, c'est-à-dire à la définition et à la description de types d'objets ou de phénomènes, à leur classement par affinités et à la comparaison d'individus à ces types. Leurs modes de raisonnement sont plutôt fondés sur l'analogie et l'induction. Les sciences physiques sont prédisposées à la schématisation, c'est-à-dire au dénombrement, à la mesure et à la manipulation axiomatique de données au moyen de modèles ; leurs modes de raisonnement sont plutôt fondés sur la déduction ; on retiendra que ces sciences ne peuvent concerner que des objets ou des phénomènes préalablement définis et caractérisés, c'est-à-dire qu'elles sont issues des sciences d'origine naturaliste et en sont devenues complémentaires. Ainsi, en ayant successivement recours au mode de raisonnement de chacune de ces sciences, on est fort logiquement amené à raisonner en géotech-

nique, d'abord par analogie, puis éventuellement et très prudemment par induction et enfin par déduction (cf. 2.3.2).

2.1.2.1 Les objets

La géotechnique étudie la nature, la géométrie et la paramétrie du site et des matériaux qui le composent. De ce point de vue, les notions de projet et d'ouvrage sont relativement accessoires car les caractères de ces objets sont intrinsèques, et elle ne fait qu'emprunter à certaines géosciences, les données et les méthodes dont elle a besoin pour comparer les objets étudiés aux types qu'elles définissent.

Les disciplines interviennent ici selon l'échelle de dimensions de l'objet ; à chaque échelle correspondent une ou plusieurs sciences naturelles s'intéressant à la nature de l'objet et à son aspect, et une ou plusieurs sciences physiques s'intéressant à ses caractères géométriques, chimiques, physiques, mécaniques...

La cristallographie étudie les cristaux, formes élémentaires de la matière minérale.

La minéralogie étudie les cristaux naturels composant les roches, généralement à l'échelle microscopique.

La pétrographie s'intéresse aux associations de minéraux ou de corps organiques simples que sont les roches, formes extrêmement diverses et généralement très complexes du géomatériau à l'échelle qui nous est la plus accessible, celle de l'échantillon qui est en fait celle des objets directement sensibles ; c'est une science naturelle dont les homologues de mathématisation sont nombreux. Parmi ces derniers la physico-chimie, l'hydraulique et la géomécanique, permettent de définir et de mesurer les paramètres caractéristiques d'un échantillon de roche, comme sa résistivité électrique, sa composition chimique et minéralogique, sa perméabilité, sa résistance mécanique...

L'échelle du lieu nous est moins bien adaptée. Un endroit, un paysage sont directement observables dans leur ensemble mais pas toujours facilement dans leurs détails. À cette échelle, une certaine schématisation graphique ou numérique est nécessaire pour étudier un endroit qui, malgré l'hétérogénéité importante du géomatériau, peut encore être défini et décrit avec une précision très acceptable pour le géotechnicien. Parmi les sciences naturelles, la géomorphologie s'intéresse à l'état actuel de la surface de la Terre et sa forme de mathématisation directe est la topographie. Les observations de géologie structurale, de stratigraphie tectonique, sont géométriquement traduites par les cartes et coupes géologiques, éventuellement numérisées. Les sciences physiques qui peuvent intervenir à cette échelle sont les mêmes qu'à l'échelle précédente, mais les valeurs des paramètres qu'elles permettent de définir et de mesurer ne peuvent plus être considérées comme étant individuellement représentatives de l'endroit décrit. Seules des valeurs moyennes, susceptibles de varier dans certaines limites, peuvent prétendre à cette représentativité, mais leur utilisation pratique serait imprudente, car ce sont les valeurs minimales qui en caractérisent les zones dangereuses.

Aux échelles suivantes qui sont celles de territoires et de volumes de géomatériaux de plus en plus vastes jusqu'à l'ensemble du globe terrestre, les lieux ne peuvent plus, même dans leur ensemble, être directement perçus par l'homme à moins qu'il ne soit astronaute ce qui, pour l'instant du moins, est fort limitatif. Pour en réaliser l'étude, il est donc nécessaire d'utiliser des documents produits à grands frais pour des raisons plutôt stratégiques et commerciales que scientifiques, comme les clichés de satellites et les résultats des grandes campagnes océanographiques (observations en plongée, profils topographiques, sismiques, magnétiques, sondages mécaniques...), de les schématiser de plus en plus, sous forme de cartes et de coupes topographiques et géologiques dressées à des échelles de plus en plus petites et de moins en moins détaillées.

2.1.2.2 Les phénomènes

La géotechnique étudie les phénomènes naturels et induits dont le géomatériau d'un site de construction est ou sera le siège ou l'élément. La notion d'ouvrage en relation avec le géomatériau, c'est-à-dire la notion de site, devient alors prépondérante. C'est en fait comme science de phénomènes et en particulier de phénomènes induits, que la géotechnique s'individualise le mieux dans le groupe des géosciences.

Ces phénomènes font intervenir des champs de forces dont les effets pratiques sur le géomatériau sont de deux sortes extrêmement différentes, ce qui entraîne généralement une grave confusion de méthode dans la conception géotechnique de leurs relations. Certains ont essentiellement un rôle d'agent de transformation du site comme la gravité, alors que d'autres n'ont qu'un rôle pratique d'agent de renseignements sur l'état du site comme la géophysique électrique. Sur le plan spéculatif, cette distinction ne se justifie pas et les disciplines qui étudient ces phénomènes comme la géomécanique ou la géophysique, doivent être considérées comme des parties de la physique du globe, qui n'est elle-même que la forme mathématisée de la géodynamique. L'intérêt pratique de ces rôles est pourtant loin d'être négligeable pour le géotechnicien qui doit donc le considérer pour classer les phénomènes qu'il étudie.

Il est essentiel aussi que le géotechnicien distingue les phénomènes naturels qu'il ne peut que constater, des phénomènes induits que l'on peut provoquer. Il faut encore, comme pour les objets, qu'il retienne comme élément de classification, l'échelle de dimension du site dans lequel se produisent les phénomènes et enfin, qu'il tienne aussi compte de l'échelle de temps à laquelle ils se produisent.

► Agents de transformation

Les disciplines qui étudient les phénomènes naturels qui sont des agents de transformation du géomatériau, peuvent être classées selon l'échelle chronologique.

À l'échelle du temps géologique, celle de l'évolution générale de la Terre, la géologie historique étudie les phénomènes passés qui ont affecté le géomatériau. Ses éléments sont la stratigraphie et la tectonique causale qui

s'intéressent à certains aspects essentiels de ces phénomènes tandis que la paléogéographie tente de reconstituer les états antérieurs successifs d'une région donnée et à des époques données, de façon à préciser l'évolution de cette région dans le temps. Ces phénomènes ne sont évidemment pas observables ni reproductibles. Les disciplines qui les étudient ne peuvent procéder que par observation d'états résultants quand il s'agit de les définir, par comparaison et par spéculation quand il s'agit de les expliquer ; ce sont des sciences naturelles, même si leurs données de base ont un caractère nettement physique. Dans l'état actuel de nos connaissances, elles sont très difficiles à mathématiser, à partir de bases théoriques extrêmement hypothétiques. Dans leurs grandes lignes, on peut effectivement expliquer la mobilité des plaques, la tectogénèse ou le métamorphisme par des considérations de thermodynamique, de mécanique, de chimie, de radioactivité... ; on est encore loin de pouvoir calculer ou même de dire si cela a un sens, l'instant auquel l'Inde ne poussera plus la Chine vers le NE, ou la hauteur maximum qu'a atteint ou atteindra le mont Blanc.

À l'échelle du Quaternaire, dernière période relativement très courte de l'histoire de la Terre, la géodynamique étudie les phénomènes qui ont récemment affecté et qui affectent encore le géomatériau. Dans leurs phases paroxystiques, c'est-à-dire à l'échelle de l'individu humain, qui est plus particulièrement celle de la géotechnique, la plupart de ces phénomènes, comme une éruption volcanique ou un écroulement de falaise, sont observables. Certains même, peuvent être reproductibles dans leurs grandes lignes mais généralement involontairement, comme l'écroulement d'un talus de déblai. Parmi ces phénomènes, le géotechnicien s'intéresse plus particulièrement à ceux qui transforment le milieu en le dégradant, c'est-à-dire en affectant ses qualités techniques et qui sont étudiés par la géodynamique externe ; ce sont ceux qui mettent directement en cause la possibilité d'exécution d'un ouvrage puis sa pérennité. Les phénomènes qui transforment le milieu sans le dégrader mais plutôt en le modifiant et qui sont étudiés par la géodynamique interne, n'intéressent le géotechnicien que pour prévenir leurs effets catastrophiques. Ils ne se manifestent en effet de façon courante qu'en profondeur (métamorphisme) ou seulement très temporairement et très localement en surface (éruption volcanique, secousse sismique).

On doit maintenant faire intervenir une classification secondaire des sciences de phénomènes, dont la base est de nouveau l'échelle de dimensions.

À l'échelle de l'échantillon, le phénomène qui dégrade le géomatériau est l'altération et, à l'échelle du paysage, l'érosion. Ces phénomènes se manifestent au contact de ce matériau et de l'atmosphère qui agit sur lui soit chimiquement, soit thermiquement, soit mécaniquement. Ici, l'imbrication des sciences naturelles et des sciences physiques est totale.

L'altération s'étudie sur des bases physico-chimiques et intervient surtout à l'échelle du minéral et de la roche. Parmi les sciences naturelles, elle est donc un objet de la minéralogie et de la pétrographie : l'instabilité plus ou moins grande en présence d'eau de la structure cristalline de certains minéraux argileux comme les smectites, est à l'origine des mouvements saisonniers de gonflement/retrait de certains géomatériaux argileux.

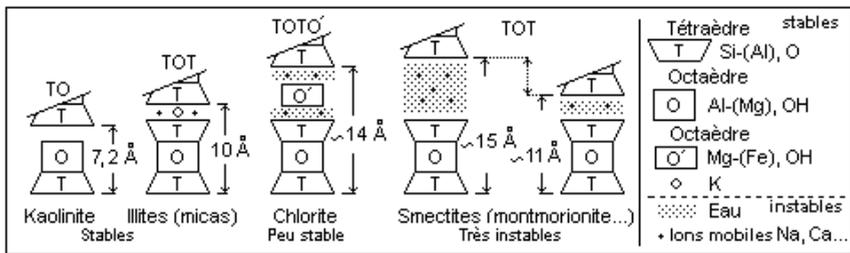


Figure 2.1.2.2.1 – Structures cristallines de minéraux argileux

Parmi les sciences physiques, elle concerne principalement la mécanique et la thermodynamique qui peuvent intervenir seules ou ensemble. Physiquement en effet, le géomatériau se désagrège en se fissurant pour de multiples causes dont l'étude ne peut être détaillée ici ; ce peut être un phénomène agissant sur le matériau lui-même, comme l'effet de la dilatation thermique du matériau exposé aux variations de température de l'atmosphère ou bien l'effet de la relaxation des tensions internes naturelles que subit tout massif rocheux qui s'érode ou dans lequel on effectue des terrassements superficiels ou souterrains. Ce peut être encore un phénomène dans lequel l'eau est un matériau actif comme la dissolution, les variations de teneur en eau d'un matériau argileux ou l'action mécanique de l'eau qui gèle dans les fissures déjà formées et qui les agrandit jusqu'à la désagrégation de la roche. Du côté de la chimie, il s'agit de réactions tendant à faire acquérir aux combinaisons d'éléments chimiques constituant les minéraux ou les roches, un état plus stable que leur état initial, au contact de l'atmosphère. C'est ainsi que les micas se chloritisent, que les feldspaths se kaolinisent, que les sulfures se transforment en sulfates... Ce sont toujours des oxydations ou des hydrolyses.

L'érosion est un phénomène complexe à l'échelle du massif, de la province ou du continent, qui est étudié du point de vue naturaliste par la géodynamique externe et qui peut se mathématiser sur des bases physiques et plus particulièrement mécaniques. La chimie n'intéresse guère que l'un de ces types, l'érosion karstique qui affecte les massifs calcaires dont les fissures sont parcourues par de l'eau chargée de gaz carbonique. La gravité est plus ou moins directement à l'origine de la plupart des autres types d'érosion, soit directement (glissements, éboulements...) soit par l'intermédiaire d'agents de transport comme l'eau courante. Les phénomènes d'érosion directement liés à la gravité sont mathématiquement étudiés par la géomécanique qui s'intéresse entre autres aux équilibres et aux mouvements du géomatériau soumis à des contraintes dérivées de la gravité. Si la gravité a une origine seulement naturelle et par là même pratiquement inaccessible à l'action humaine, les phénomènes qui lui sont liés peuvent résulter d'une cause naturelle, érosion d'un pied de falaise entraînant un écoulement ou d'une cause artificielle, ouverture d'un déblai dont le talus glisse, qui ont pour effet de modifier l'état des contraintes dans le massif et de mobiliser le champ gravitaire.

Parmi les phénomènes naturels issus de la gravité mais ne transformant pas à proprement parler le milieu naturel tout en assurant son évolution permanente,

on doit citer ceux concernant l'eau souterraine dite gravifique, terme qui marque précisément les relations de cette eau avec la gravité. L'eau souterraine gravifique peut en effet être considérée comme une roche mobile. Elle circule dans les vides d'un massif rocheux, solide immobile à l'échelle de son déplacement. L'hydrogéologie est une science naturelle qui, en raison de son origine géologique, s'intéresse au matériau aquifère, c'est-à-dire au réservoir, à la tuyauterie et au robinet, tandis que l'hydraulique souterraine est une science physique qui s'intéresse au fluide et plus particulièrement à ses mouvements. Les préoccupations de ces deux disciplines sont donc en fait complémentaires puisque seule la première permet par exemple, de préciser la nature d'un milieu aquifère et notamment la légitimité de le considérer comme homogène ou bien de définir les conditions aux limites d'un écoulement. On peut bien entendu obtenir certaines de ces données par le calcul, en analysant par exemple les résultats de mesures effectuées lors d'un essai de pompage dans une nappe aquifère puis en les comparant à des résultats de simulation pour y repérer d'éventuelles anomalies dans la propagation des ondes perturbant l'état initial de la nappe, et enfin tenter de les expliquer. Cette démarche est en réalité beaucoup plus difficile à réaliser qu'à présenter ; elle conduit souvent à des résultats douteux ou même fantaisistes. Aussi est-il souvent beaucoup plus simple et plus sûr d'obtenir directement ces précisions par une analyse du milieu en géologue, quitte à recourir ensuite pour vérification à la méthode mathématique qui sera alors nettement plus facile à mettre en œuvre et à exploiter.

Tout ce qui précède, s'applique aussi aux relations de la géodynamique externe et de la géomécanique ou de la géologie structurale et de la géophysique et illustre bien la complémentarité des sciences naturelles et des sciences physiques s'intéressant aux mêmes objets ou aux mêmes phénomènes naturels.

► Agents de renseignement

À l'échelle du massif, la géophysique étudie des phénomènes naturels induits qui, du point de vue géotechnique, ont essentiellement une valeur d'agent de renseignements quantitatifs d'ordre structural sur le géomatériau ; elle peut ainsi être mise en parallèle avec la géologie structurale et la géomorphologie dont elle permet de préciser les renseignements géométriques ; accessoirement, elle permet la mesure de certains paramètres concernant les matériaux du massif (vitesse sismique, résistivité électrique...) et dont l'utilisation géotechnique directe est plus ou moins intéressante. Les matériaux sont considérés comme des milieux, sièges de phénomènes physiques ; ces phénomènes sont soit des phénomènes naturels et leur étude ressortit aux géophysiques théorique et appliquée, la première s'intéressant au phénomène en lui-même et la deuxième, aux anomalies du phénomène pour apprécier l'état du milieu (géothermie, sismologie, électricité tellurique, magnétisme, gravité, radioactivité...) soit des phénomènes induits et leur étude ressortit alors à la géophysique appliquée (sondages électriques, traînés et diagraphies électriques, sondages sismiques, diagraphies diverses) pour préciser l'état du milieu et mesurer divers paramètres.

À l'échelle de la province, du continent ou de la Terre et à l'exception des effets sismiques des essais nucléaires, il n'est actuellement possible d'étudier que des

phénomènes naturels pour préciser la composition et la structure profondes de ces domaines. C'est l'un des objets de la physique du globe.

2.2 Les écoles géotechniques

La géotechnique subit toujours l'influence d'une indéniable origine occulte ; on peut même dire sans exagérer qu'elle n'a pas encore tout à fait éliminé la connaissance spontanée des phénomènes naturels et même l'occultisme. Les relations équivoques à peine plus rationnelles des géologues et des géomécaniciens entraînent encore de vaines querelles d'écoles.

2.2.1 Les sourciers

Il persiste une tendance indéniable de la géotechnique à l'occultisme ; on ne peut évidemment pas considérer qu'elle structure une école comme la géologie et la géomécanique, mais elle demeure sans doute la forme la plus connue du grand public et elle n'est pas explicitement écartée par beaucoup d'utilisateurs.

Cette tendance groupe certains autodidactes, les amateurs et les occultistes, ceux qui prétendent faire de la géotechnique sans la connaître, en se fiant à leur expérience, à leur bon sens ou à leurs dons, pour résoudre sans y penser des problèmes qu'ils ne se posent pas. En effet, humble devant la plupart des sciences, des techniques et des arts, lequel d'entre nous ne se sent-il pas capable d'appréhender intuitivement la Terre et ses phénomènes, familier qu'il est des pierres et des paysages qui l'entourent ?



Le sourcier d'Agricola

Il est à ce propos significatif de constater que, comme la médecine, les géosciences sont pratiquement les dernières des véritables sciences à être couramment exercées de façon ésotérique par une partie notable des acteurs, les sourciers. Actuellement en France, le chiffre d'affaires des sourciers et des travaux qu'ils font entreprendre, est nettement supérieur à celui de l'hydrogéologie classique, et, malheureusement, les sourciers se mêlent aussi de bien d'autres choses que de recherche d'eau.

Quel géotechnicien, empêtré dans la résolution d'un difficile problème avec lequel il était confronté, n'a-t-il pas eu à affronter l'attitude condescendante ou ironique d'un architecte, d'un ingénieur de travaux, d'un chef de chantier, d'équipe, d'un terrassier..., qui estimait en savoir plus que lui parce qu'il avait acquis sa connaissance sur le tas ? Dans de telles circonstances, il est tout à fait ahurissant de constater que certains d'entre eux, souvent dotés d'une solide formation scientifique, attribuent des vertus tassantes ou glissantes à certains terrains qu'ils mettent en œuvre, et voient parfois dans l'eau qui envahit leur fouille, la manifestation d'une mystérieuse rivière souterraine qui descend de la montagne située à 300 km de là, pour aller se jeter à la mer tout aussi éloignée. Et malheur au géotechnicien qui essaierait de leur expliquer simplement la chose ; mieux vaut parfois agir comme si lui aussi possédait la science infuse ; l'efficacité technique doit toujours prendre le pas sur la vaine discussion et qu'importe après tout au constructeur, la provenance de l'eau, si sa fouille est asséchée.

Il est évident que la géotechnique ne pourra vraiment être considérée comme une science sérieuse qu'à partir du moment où cette tendance aura sinon disparu, du moins perdu toute influence. On peut malheureusement considérer qu'elle en est encore loin : en effet, Y. Rocard, physicien renommé et se voulant peu conformiste, n'a-t-il pas consacré la fin de sa carrière d'enseignant dans l'une des grandes écoles scientifiques françaises, puis sa retraite, à la sourcellerie ? Il a alors publié plusieurs ouvrages et articles apparemment fort objectifs et très convaincants mais en réalité assez extravagants. Ceux qui, comme l'on dit, y croient ou bien, plus grave, ceux qui se fient à sa réputation de savant, par ailleurs incontestable, ne manquent pas de s'y référer sans y avoir compris grand-chose. Et naguère, une revue professionnelle sérieuse, insérait régulièrement la publicité d'un sourcier-prospecteur qui avançait de nombreuses références d'administrations pour sa méthode d'étude du sous-sol qu'il qualifiait d'intuitive et qu'il prétendait infailible. Pire, en mai 2006, un grand quotidien national réputé pour son sérieux, a publié un « reportage » élogieux sur la sourcellerie et quelques sourciers dont il vantait les « résultats garantis » : à cet endroit, tant de m³/h à telle profondeur ! Sans vouloir entreprendre une discussion qui n'a pas sa place ici, de l'efficacité des sourciers, je peux affirmer que chaque fois que j'ai eu affaire avec l'un d'eux, j'ai constaté que ses indications étaient soit évidentes, soit fantaisistes.

Ce n'est donc pas demain que l'on verra disparaître l'irrationnel qui se voile parfois de curieuses démarches pseudo-scientifiques, car la géotechnique n'a pas le privilège de telles aberrations ; souvenez-vous de la mémoire de l'eau, de la fusion froide... ; vers la fin des années 70, une compagnie pétrolière française a expérimenté des avions-renifleurs de prospection qui n'ont pas eu le nez assez

fin pour sentir une matière à l'odeur pourtant marquante. Plus récemment, on a investi d'importants fonds publics pour financer la validation de la méthode Van, « infallible » procédé électrique de détection des séismes qui, à l'usage, s'est révélée aussi efficace que la grenouille et son échelle pour les prévisions météorologiques.

2.2.2 Les écoles rationnelles

La géotechnique utilise le langage, les théories, les méthodes et souvent même le personnel des disciplines classiques auxquelles elle est apparentée. De nombreuses écoles se sont ainsi développées indépendamment et simultanément, selon les origines de leurs protagonistes.

On peut ranger les écoles géotechniques, en deux grandes familles, l'une d'origine naturaliste liée à la géologie scientifique traditionnelle, c'est-à-dire aux premiers praticiens, l'autre d'origine physicienne, liée à l'art de l'ingénieur, c'est-à-dire aux utilisateurs. Cette double origine fait de la géotechnique une discipline ambiguë, relativement exacte de forme et expérimentale de fond, ce qui entretient dans l'esprit de ses praticiens eux-mêmes, une confusion certaine bien que généralement inconsciente.

Bien qu'un seul mot la désigne, elle n'a encore jamais été envisagée comme un système cohérent et homogène. Les praticiens qui sont pour la plupart des spécialistes dont l'activité est généralement limitée à une partie de la géotechnique, travaillent souvent sans coordination et même sans contact en dehors de leur propre spécialité. Ils sont groupés en de nombreuses associations spécialisées soit par rubriques scientifiques, géologie de l'ingénieur, géophysique, mécanique des sols, mécanique des roches, hydrogéologie... soit par familles techniques, bâtiment, génie civil, grands barrages, travaux souterrains... qui ont peu ou pas de rapports de travail.

Cette situation est la cause de nombreux malentendus et même d'une incompréhension fondamentale, volontaire ou non, entre géotechniciens de formations différentes ; en subordonnant les naturalistes aux physiciens, elle s'est transformée en de stériles querelles d'écoles mais elle pourrait aussi devenir féconde, si l'on montrait aux uns et aux autres qu'ils sont également indispensables à la géotechnique.

La somme des acquisitions de la géotechnique est ainsi dispersée de façon hétéroclite dans un grand nombre de publications d'affinités et d'origines très diverses ; elle ne peut donc être aisément assemblée et utilisée.

2.2.2.1 L'école naturaliste

Formée à la manipulation des idées générales et familière des vastes synthèses parfois hasardeuses comme il est arrivé à la géologie fondamentale d'en produire, l'école naturaliste a dominé les débuts hésitants de la géotechnique. Elle lui a fait acquérir une réputation d'obscurité qui n'est pas encore tout à fait dissipée, à cause de l'incompréhension qui présidait aux rapports des interlocu-

teurs, les utilisateurs exigeant une précision de renseignements que ne pouvaient objectivement pas leur donner des consultants qui n'étaient pas des spécialistes. Cette école avait au moins le mérite d'assurer une certaine unité à la géotechnique, à cause de son souci atavique de synthèse. Ne la distinguant pas de la géologie appliquée, elle la considérait comme l'une de ses annexes et ne lui accordait pas d'existence autonome.

Mais ses praticiens, peu familiers du langage mathématique, ont rarement assimilé les préoccupations techniques de la géotechnique qui les intéresse peu et essaient plutôt de recueillir au moyen des onéreux travaux de terrain que toute étude géotechnique impose, des renseignements plus propres à faire avancer leurs recherches théoriques qu'à résoudre des problèmes concrets ; ils ont été progressivement dépassés par le développement de la branche physique de la géotechnique en constante évolution, qui s'est de plus en plus mathématisée en agrandissant son champ d'action, sous l'influence de nouveaux praticiens proches des ingénieurs utilisateurs.

2.2.2.2 L'école physicienne

Les géologues ont peu à peu disparu de la scène géotechnique, sous la pression des géomécaniciens auxquels les utilisateurs de la géotechnique qui assument le rôle déterminant de financiers, accordent une préférence fondée parfois sur la camaraderie et plus généralement sur la similitude de leurs formes de raisonnement et sur l'identité de leurs connaissances de base. Cela explique que la plupart des géotechniciens actuels sont des ingénieurs de formation généraliste qui souvent à leur insu, n'ont pas la vue d'ensemble de la géotechnique qui leur permettrait de travailler rationnellement ; ils doivent résoudre tant bien que mal les problèmes qu'on leur pose, au seul moyen des règles qu'ils savent manipuler. Ces derniers ont été naturellement amenés à utiliser de façon de plus en plus fréquente, des notions scientifiques et techniques très nombreuses, variées et complexes, généralement formulées en langage mathématique, plus apte à faciliter l'analyse que la synthèse. Or, un point de vue d'analyste conduit souvent à l'éclatement en spécialités d'une discipline. C'est bien ce qui s'est passé avec l'école physicienne qui domine actuellement la géotechnique et dont les protagonistes perçoivent mal ce qui lie la géophysique, la mécanique des sols, la mécanique des roches et l'hydraulique souterraine. Trouvant des terrains d'études apparemment neufs, ils ont créé des disciplines autonomes, sans tenir compte des acquisitions de l'école naturaliste.

Les règles pratiques de la géomécanique ont des formes mathématiques apparemment rigoureuses et satisfont ainsi l'esprit de méthode de leurs interlocuteurs ; cela renforce leur succès. Elles sont en fait issues des idées et des travaux des géologues, que les physiciens ont mathématisés pour tenter de les assimiler. Ils y sont rarement parvenus tout à fait, car ils devraient pour cela avoir cette vue d'ensemble de la géotechnique qu'ils ne possèdent pas toujours, parce qu'un géomécanicien acquiert difficilement par ses propres moyens, la façon de raisonner d'un géologue ; il a alors tendance à se montrer plus soucieux de chiffrer que de comprendre et d'expliquer, dans la mesure où il lui faudrait pour cela adopter un comportement de géologue.

Un système apparemment cohérent mais limité à leur propre spécialité et reposant sur les postulats plus que discutables que sont les conditions particulières d'intégration d'équations différentielles, ainsi qu'un langage ésotérique, leur permettent en toute bonne foi de se dissimuler leurs limites et de les dissimuler aux autres. Ils contribuent ainsi à rendre la géotechnique incohérente pour qui n'y regarde pas de près et n'essaie pas d'en lier logiquement les diverses parties.

Les tenants de l'école physicienne, le plus souvent ingénieurs généralistes répartis en de nombreuses classes de spécialités, essaient de résoudre les problèmes qu'on leur pose dans les limites strictes de leurs spécialités, sans essayer d'aller chercher ailleurs des données ou des résultats qu'il leur serait pourtant plus facile d'obtenir ainsi. De nombreux géomécaniciens ne se préoccupent que très sommairement du cadre géologique de leurs études, ce qui est compréhensible bien qu'anormal ; mais plus paradoxalement ils refusent aussi de prendre en considération les renseignements que peuvent leur apporter les autres formes mathématisées de la géotechnique comme la géophysique et ils retiennent seulement de l'hydraulique souterraine la notion de sous-pression ou de pression interstitielle, sans doute parce qu'elle seule permet de traduire en forces, dont ils se préoccupent exclusivement, la présence d'eau gravifique dans les sites qu'ils étudient.

C'est évidemment en oubliant ces stériles querelles d'écoles pour faire la synthèse de ces deux tendances que l'on créera une école géotechnique unitaire, propre à donner à cette discipline la doctrine homogène dont elle a besoin et à la faire évoluer de façon permanente et rationnelle.

Quelles que soient leur formation et leur fonction, les constructeurs ne se posent pas ce genre de problème : ils veulent obtenir des géotechniciens qu'ils consultent, les données nécessaires et suffisantes à l'étude et à la construction de l'ouvrage qu'ils projettent.

2.3 Langage et raisonnement

Comme science, la géotechnique est mal définie et son contenu est fluctuant, car elle ne dispose pas de principes cohérents et admis par l'ensemble des géotechniciens, géologues et géomécaniciens, qui en ont des approches différentes et rarement compatibles ; comme technique, elle est pratiquée de près ou de loin par la plupart des intervenants dans l'acte de construire, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvres, ingénieurs, assureurs, juristes... dont les principes sont radicalement différents, voire discordants. Les langages et les raisonnements des uns et des autres sont difficiles à concilier, mais grâce à l'usage généralisé de l'ordinateur, ne devraient plus être inconciliables, plutôt par obligation que par consensus.

2.3.1 Le langage

Le langage scientifique est fait de mots, de nombres, de formules, de modèles analogiques et numériques ; cette diversité est techniquement nécessaire à

l'expression forcément variée d'une science. Les sciences établies ont un langage cohérent, car un de leurs moyens d'expression est généralement dominant. En géotechnique, ces moyens sont tous à peu près de même niveau ; malheureusement, ceux qui les utilisent ne le pensent pas toujours ; les géologues préfèrent les mots et les modèles analogiques, les géomécaniciens, les formules et les modèles numériques. Ainsi, il semble toujours qu'une réunion de géotechniciens se tienne sur la tour de Babel, sans doute par habitude de constructeurs ; l'épilogue du mythe montre à quel point une telle situation peut devenir dangereuse. Il est donc nécessaire de critiquer le langage géotechnique.

2.3.1.1 Les mots

La description verbale d'un objet ou d'un fait pose divers problèmes de langage. Tant du point de vue de celui qui énonce que de celui qui écoute, il s'agit de définir d'abord les composants de cet objet ou de ce fait, puis de savoir si à chacun d'eux correspond un et un seul concept du mot ; il faut enfin préciser si l'un et l'autre attribuent les mêmes composants au même objet ou au même fait et s'ils leur font correspondre les mêmes concepts. Plus généralement donc, il s'agit d'abord de bâtir un langage commun entre personnes ayant des préoccupations scientifiques ou techniques communes ou proches, puis de définir la valeur absolue et la valeur relative de ce langage.

Même pour une science de longue tradition, le problème n'est pas aussi simple à résoudre que cela peut paraître ; les commissions de terminologie qui se réunissent lors de tout congrès scientifique d'une certaine importance, n'auraient autrement aucune raison d'être. Pour qu'il existe un véritable langage commun, il ne suffit pas de parvenir à une forme commune, c'est-à-dire à s'entendre sur le sens des mots, ce qui, avec un peu de bonne volonté réciproque, est toujours possible ; il faut surtout s'assurer que les modes de pensée et d'expression des interlocuteurs sont analogues, ce qui n'est jamais très évident. On appelle familièrement langage de sourds, une conversation au cours de laquelle les interlocuteurs utilisent la même langue sans parvenir à se comprendre et bien souvent, sans vouloir essayer d'y parvenir ; il fleurit particulièrement dans les congrès, quand différentes thèses s'affrontent ; cela permet aux neutres, toujours curieusement polyglottes, de passer agréablement le temps en des lieux où se manifestent surtout le somnolent mutisme de l'ennui ou le délire verbal de la passion.

À ma connaissance, Bourbaki est la seule école scientifique qui ait d'abord eu le souci de définir son langage. Cela n'a malheureusement pas été fait en géotechnique, sans doute parce que plusieurs écoles s'y côtoient sans vraiment communiquer.

► Granite

Pour apprécier la valeur très relative du langage géologique, il suffit de rappeler ce que représente un mot aussi courant que le mot *granit(e)* d'abord pour un non-spécialiste puis pour des géologues différents, même spécialisés en pétrographie cristalline.

L'orthographe fluctuante de ce mot caractérise l'imprécision de son sens. Venant de l'italien où il désigne à la fois une roche particulière et toutes les pierres ornementales grenues, il a normalement perdu son o final pour devenir le granit des marbriers et des anciens géologues, pierre ornementale quelconque pour les premiers et roche particulière pour les seconds. Mais comment pouvait-on concevoir en France qu'un ouvrier et un savant aient le même langage, à une époque où rares sont les géologues qui vont encore rendre visite aux carrières ; les premiers préfèrent maintenant demeurer au laboratoire tandis que les seconds sont souvent transformés en impersonnels foreuses, excavatrices, concasseurs et cribles. Cela ne facilite évidemment pas comme jadis, les conversations amicales au cours desquelles le géologue savait parler le langage du carrier et recueillir ainsi renseignements, échantillons et fossiles comme on dit ne plus pouvoir en trouver. La race des tailleurs de pierres, amoureux de leur métier et amis des géologues, qui a permis de constituer la plupart des belles collections de nos musées, n'existe pratiquement plus, décimée par le béton ou l'indifférence. Et notre granit(e) est demeuré un mot de pur français, sans le e final, pour désigner certaines pierres ornementales, granits qui ne sont pas toujours des granites, tandis que devenu savant et un peu snob, il a récupéré un e final chez les anglo-saxons pour désigner une roche particulière. Roche particulière le granite ? Voire ! Dire que ce mot représente une roche grenue, contenant comme minéraux essentiels du quartz, un mica et un feldspath ou un feldspathoïde alcalin n'est pas suffisant ; certaines arkoses présentent les mêmes caractères. Mais contrairement à l'arkose, le granite n'est pas une roche sédimentaire, ce qui en l'occurrence permet de lever l'indétermination en retenant l'origine de la roche comme l'un des concepts du mot granite. Quelle est donc l'origine du granite ? Est-ce une roche magmatique ou une roche métamorphique, si tant est que cette distinction ait encore un sens ? Son origine magmatique est loin d'être universellement admise. Et alors, si l'on ne retient que l'origine métamorphique ou bien si l'on admet même les deux, qu'est-ce qui permet de distinguer un granite d'un gneiss. La structure de la roche ? La forme des cristaux qui la constituent ? Il est en effet possible d'utiliser ces critères dans la plupart des cas mais pas toujours. Même en faisant appel à l'analyse modale, qu'est-ce qui distingue finalement un granite gneissique d'un gneiss granitisé sinon l'opinion personnelle du spécialiste qui le définit, sur l'origine d'une certaine roche, opinion qui n'est pas nécessairement partagée par tous ses confrères. On peut, à ce propos souligner que naguère, 25 échantillons d'un même granite, adressés pour identification à autant de laboratoires de pétrographie répandus à travers le monde, ont été identifiés de la façon suivante : granite, 19 fois ; gneiss, 6 fois ; orthogneiss, 3 fois ; granodiorite, 3 fois ; gneiss siénitique, 2 fois ; gneiss migmatitique, 2 fois ; brèche cataclastique, 1 fois. Le fait que l'on ait plus de réponses que d'échantillons montre que dans différents services de mêmes laboratoires, le même échantillon a reçu des appellations différentes.

Mon propos n'est évidemment pas de débattre de l'origine du granite qui importe peu du point de vue géotechnique ; je laisse ce soin aux spécialistes qui s'affronteront encore longtemps à ce sujet. Par cet exemple, je voulais seulement souligner que, si le langage d'un groupe de spécialistes d'une même discipline est loin d'être rigoureux, celui d'un groupe de spécialistes de disciplines différentes est certainement très imprécis ; dans le cas d'une équipe pluri-

disciplinaire étudiant puis construisant un ouvrage, cela peut entraîner de dangereuses confusions.

► Le langage géotechnique

Le langage naturaliste et le langage technique traitent généralement d'objets concrets tandis que le langage physico-mathématique traite essentiellement de sujets abstraits : le langage géotechnique, fait de concret et d'abstrait, est donc complexe. Cela n'apparaît pas toujours en première analyse, car chacun est persuadé de la clarté et de la précision de son propre langage. Mais sans aller jusqu'à prétendre que l'actuel langage de la géotechnique conduise nécessairement à des dialogues de sourds, ce que l'expérience tendrait pourtant bien souvent à justifier, on doit souligner le danger qu'il y aurait à l'employer sans discernement, c'est-à-dire sans préoccupation sémantique. Cette préoccupation est déjà nécessaire quand des spécialistes de disciplines différentes interviennent lors d'une même étude ; elle devient indispensable quand il s'agit de traduire en langage accessible aux non-initiés, les résultats d'une étude géotechnique, pour les rendre intelligibles aux responsables de la conception de l'ouvrage et utilisables pour ceux qui le construiront.

Cette traduction est une forme de vulgarisation de la géotechnique. Le terme n'a rien de péjoratif, employé pour une opération qui en l'occurrence, n'est pas critiquable mais plutôt nécessaire. Quand il traduit des résultats, le langage géotechnique doit en effet être parfaitement compris par tout non-initié concerné à quel titre que ce soit par le projet.

Or, il n'en est sûrement pas ainsi actuellement ; soit que le géotechnicien utilise des termes scientifiques apparemment dénués de sens pratique et alors jugés pédants ou inutiles ; soit qu'il ne donne pas exactement le sens commun à certains mots du langage courant ; soit que, mal assuré dans ses propos, il essaie plus ou moins consciemment de se valoriser en utilisant un vocabulaire hermétique ; soit enfin qu'il ne soit pas capable de présenter clairement une pensée nébuleuse. Comme le géotechnicien ne prend pas toujours la peine de s'en expliquer franchement, les non-initiés risquent de commettre des contresens qui peuvent conduire à une interprétation erronée des conclusions d'une étude géotechnique ; cela peut être très dangereux pour l'étude technique du projet et pour le comportement de l'ouvrage.

Son langage hermétique est ainsi en partie responsable du manque d'intérêt que manifeste pour la géotechnique la plupart de ceux qui en sont les utilisateurs. Il ne peut être question ici de le démontrer de façon rigoureuse ni surtout de poser les bases d'une sémantique de la géotechnique. Il est toutefois nécessaire d'évoquer ce problème qu'il faudra résoudre pour que le discours géotechnique soit compris et bénéficie d'une très large audience. Et à ce propos, il faut souligner que divers essais de normalisation de langages spécialisés des géosciences auxquels se sont employés certains organismes, paraissent trop restreints car ils visaient essentiellement à donner un langage commun à des spécialistes qui ainsi reconnaissaient implicitement ne pas en avoir, alors qu'il aurait fallu aussi rendre ces langages accessibles à des non-spécialistes.

► Sol et roche

Pour nous convaincre de l'importance de ce problème, essayons d'analyser rapidement les concepts que représentent les mots de sol et de roche (*Fig. 4.5.2.1*) apparemment les moins discutables de la géotechnique, pour un géologue, pour un géomécanicien, pour un constructeur et pour un juriste, personnages géotechniques essentiels.

Le géologue y voit une masse minérale de composition, de structure et d'origine identiques. Pour lui, une roche est aussi bien un basalte qu'une argile ou un cailloutis alluvial. Il va même jusqu'à parler de roche liquide ou gazeuse à propos de l'eau et des hydrocarbures naturels.

Le géomécanicien établit lui une distinction entre sol et roche qui ne s'accorde ni avec le sens commun, pour lequel le sol est la surface de la Terre, ni avec la pédologie pour laquelle le sol est la couche organique superficielle d'un lieu. Pour le mécanicien, un sol est un géomatériau meuble dont les paramètres mécaniques ont des valeurs faibles ; ce peut être une grave alluviale aussi bien qu'un granite arénisé. Il donne par contre au mot roche un sens beaucoup plus proche du sens commun en appelant roche un géomatériau dur, dont les paramètres ont des valeurs élevées. Cette distinction, finalement fondée sur un jugement subjectif de l'aspect instantané d'un géomatériau, est très délicate à faire dans certains cas ; que sont en effet la plupart des matériaux des formations argileuses dont les paramètres mécaniques, et en particulier la cohésion qui détermine leur aspect instantané, ont des valeurs qui varient rapidement dans le temps en fonction de la teneur en eau ? Une telle formation, initialement déficitaire en eau, serait en effet une roche qui deviendrait un sol après avoir absorbé de l'eau et qui redeviendrait une roche après avoir perdu cette eau. De telles transformations paraissent des vues de l'esprit ; elles se produisent pourtant ; si l'on effectue un déblai dans une formation marneuse sèche et dure et si l'on est ensuite amené à stabiliser par drainage et protection superficielle, les talus qui se dégradent plus ou moins rapidement sous l'action de l'eau atmosphérique en produisant des coulées boueuses et même des glissements. L'argile, matériau typique des mécaniciens du sol, sert à fabriquer des briques ; les briques crues, séchées au soleil, sont des roches dont la diagénèse est sommaire ; par altération, elles redeviennent de l'argile en se réhumidifiant ; les briques cuites ont subi un début de véritable métamorphisme ; elles sont devenues des roches plus stables qui s'altèrent difficilement.

Pour le constructeur, c'est-à-dire dans le sens commun, une roche est une masse minérale compacte et dure, qui se terrasse à l'explosif et sur laquelle on peut fonder un ouvrage sans risque. Un gros banc de cailloutis cimenté dans une masse alluviale meuble est alors une roche pour un terrassier mais une masse de gypse très altéré ou une masse de calcaire très fragmenté ne sont pas des roches pour un architecte ; du reste, ce dernier appelle sol la surface, et sous-sol ce qui est dessous, tant dans la nature que dans ses ouvrages.

Selon l'article 1792 CC (Code civil), le juriste peut accuser le sol d'être vicieux ; pour lui, le sol est n'importe quel matériau terrestre, sol *ss* ou roche, qui supporte un ouvrage, ainsi que le lieu où il se trouve.

En fait, chacun a raison dans la mesure où il analyse les concepts des mots sol et roche selon ses propres critères, pour répondre à ses propres préoccupations. Normaliser le langage géotechnique reviendrait donc à leur montrer que leurs critères et leurs préoccupations ne sont pas aussi différents les uns des autres qu'ils en ont l'air.

2.3.1.2 Les nombres

La précision rarement contestée du langage chiffré, est en fait tout aussi illusoire : la définition numérique des mots *argile*, *limon (silt)*, *sable*, dépend du paramètre choisi, granulométrie, plasticité... ; remarquons au passage que les matériaux ainsi définis sont des entités granulométriques ou plastiques sans rapport entre elles, mais surtout, sans rapport avec les matériaux naturels de mêmes noms communs et/ou géologiques. L'analyse granulométrique permet de quantifier la composition des matériaux meubles ou ameublis par concassage, considérés comme des mélanges d'argile, de limon, de sable, de gravier, de cailloux et de blocs. Cette analyse est étroitement codifiée bien qu'il existe plusieurs codes ; elle fournit des résultats peu critiquables : deux opérateurs obtiendront à peu près les mêmes, ce qui n'est pas toujours le cas pour ceux d'autres essais de sol ; on présente généralement ces résultats sous formes de diagrammes triangulaires ou de courbes qui, pour un même matériau, varient selon le système de coordonnées adopté. Si l'on veut ensuite utiliser ces résultats pour définir le matériau selon ses proportions relatives d'argile, limon, sable, gravier..., on dispose d'une vingtaine de classifications dont plusieurs sont recommandées ou imposées par divers organismes officiels ou technico-scientifiques parfaitement honorables et d'égales réputations. De l'une à l'autre, la limite argile/limon varie de 0,002 à 0,01 mm, limon/sable de 0,02 à 0,1 mm, sable/gravier de 1 à 5 mm, gravier/cailloux de 20 à 70 mm ; certaines n'adoptent même pas des appellations identiques, établissant des regroupements ou des subdivisions..., de sorte qu'il est parfaitement impossible de dire avec la précision que l'on pourrait attendre de chiffres objectifs, ce qu'est une argile, un limon, un sable, un gravier granulométriques... La définition par la plasticité des matériaux fins, sans relation avec les précédentes, est moins angoissante : la classification de Casagrande est la seule utilisée ; selon son IP et sa LL rapportés à une carte découpée en plages plus ou moins étendues, le matériau est une argile, un limon, un sable plus ou moins mêlés et plus ou moins organiques, sans proportions définies, mais désignés par des sigles, CL, SF, MI, OH... Casagrande et d'autres sont allés plus loin en associant granulométrie et plasticité pour définir des groupes désignés par d'autres sigles, GW, SP..., A1a, A2.6, A5...

On pourrait espérer plus de précision à partir d'une analyse chimique simple pour établir la proportion de CO_3Ca dans une roche ; on a bien de l'argile avec moins de 15 % et du calcaire avec plus de 85 %, mais entre les deux on peut avoir de la marne entre 40 et 60 %, de l'argile marneuse entre 10 et 50 %, de la marne argileuse entre 50 et 90 %, du calcaire marneux entre 60 et 90 %. Sans se référer à la composition chimique, sans mesurer W ou R_c , on appelle aussi *marne argileuse* ou *argile marneuse* un matériau argileux plus ou moins humide et donc plus ou moins consistant, selon ses seuls aspects visuel et tactile !

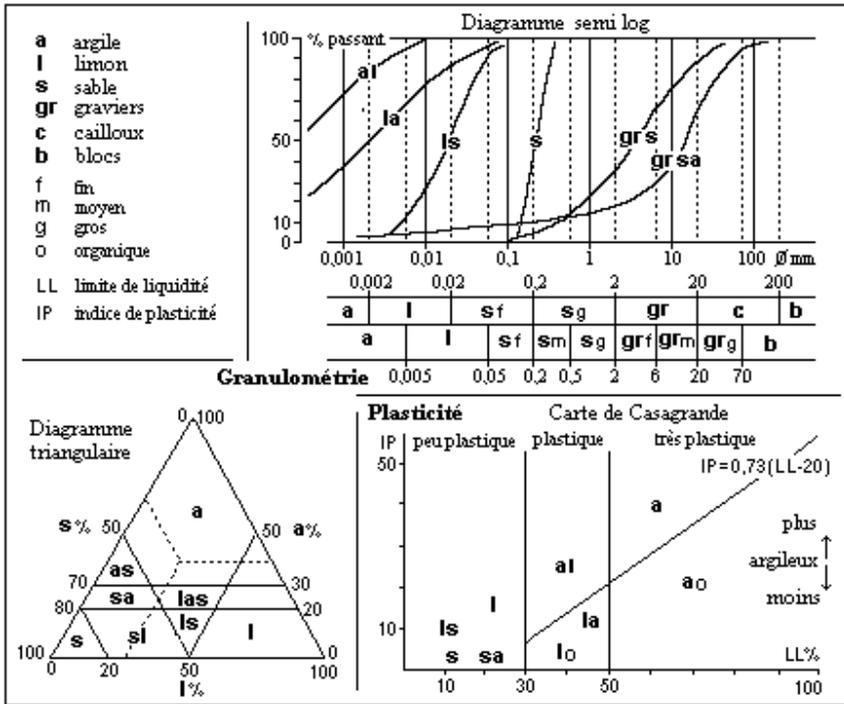


Figure 2.3.1.2- Granulométrie – Plasticité

On n'est donc pas prêt de voir sur les coupes de sondages et dans les rapports d'études géotechniques, ces chiffres remplacer les traditionnels *argile peu limoneuse très plastique, sable très argileux, cailloutis sableux légèrement argileux, marne argileuse, calcaire marneux...* et autres expressions combinant tous ces mots de toutes les façons possibles avec toutes les nuances de *peu, plus ou moins, très* et autres adverbess, généralement utilisés par des gens qui ignorent et/ou ne tiennent pas compte d'une granulométrie, d'un indice de plasticité, d'une analyse chimique.

Bien entendu, des géomatériaux totalement différents d'un même site ou de sites différents, peuvent être caractérisés par des valeurs égales de paramètres, résistance, consolidation, perméabilité... ; dans des circonstances analogues, ils n'auront pas forcément des comportements identiques, ni même analogues.

2.3.1.3 Les formules

Je n'ai évoqué ici que les langages verbal et chiffré apparemment les plus faciles à manier, et nous avons vu que leur maniement géotechnique était en fait beaucoup moins aisé qu'on pourrait le penser. Que dire alors du langage mathématique qui malgré un évident souci actuel de rationalisation, s'exprime encore en plusieurs langues, arithmétique, géométrie, algèbre et autres, ayant chacune

son vocabulaire et sa syntaxe. Seulement accessible à ceux qui ont reçu une formation spécialisée, faite à la fois de l'étude de ces langues et d'entraînement à l'abstraction, son maniement se révèle encore plus délicat en géotechnique où se confrontent des pensées concrètes de naturalistes et des pensées abstraites de physiciens ; plutôt que des dialogues de sourds au cours desquels on pourrait avec un peu de bonne volonté, arriver à s'entendre, ces confrontations deviennent alors des monologues simultanés au cours desquels tout échange de vues devient impossible.

Que veut dire le mot stabilité, appliqué à un ouvrage, suivant qu'il désigne le résultat d'un calcul ou celui d'une observation ? Le calcul montre que tel talus est stable ; l'observation amène à en douter. Le talus demeure stable, parfois fort longtemps : le calcul avait raison ; il glisse à la suite d'un violent orage : l'observation n'était pas trompeuse. Au moment du glissement, la cohésion du géomatériau n'était plus celle du calcul, et la formule ne permettait pas d'intégrer la variabilité naturelle de cette constante mathématique.

En fait, les formules ne représentent pas le comportement du géomatériau mais notre façon de nous le représenter ; elles sont les images que nous nous en faisons.

2.3.1.4 Les logiciels

La plupart des logiciels qu'utilisent les géotechniciens ne sont que des traductions informatiques de méthodes de calculs géomécaniques classiques, de simples calculateurs puissants, rapides et fidèles ; on leur donne des valeurs de paramètres obtenus par ailleurs et ils fournissent les résultats attendus selon les formules utilisées.

Les logiciels d'applications techniques peuvent être dangereux par plusieurs de leurs aspects. Ils sont généralement écrits à partir de formules dont l'utilisation impose de bien définir le contexte, ce qu'ils ne savent pas faire, même quand ils sont conviviaux. Ceux qui les ont conçus, ont pu mal analyser les problèmes à résoudre ou leur donner des solutions peu réalistes ; ceux qui les ont écrits ont pu se permettre des facilités informatiques au détriment de la rigueur géotechnique ; et surtout, ceux qui les utilisent, peuvent n'être que des pupitreurs évolués, ignorant à peu près tout ce qui est derrière leur écran, se contentant de nourrir le programme des valeurs de paramètres qu'il demande, puis de recueillir religieusement le résultat qu'il assène péremptoirement.

L'élaboration de bases de données informatiques spécialisées, aurait pu imposer entre autres, une normalisation du langage géotechnique, permettant de fixer le vocabulaire, d'explicitier les relations sémantiques des mots et de définir les affectations caractères/valeurs. Aucun accord préalable n'étant intervenu entre tous ceux qui en avaient besoin, on a vu surgir, élaborés par différents groupes de spécialistes, plusieurs de ces fichiers, fondés sur des systèmes variés, présentant des structures et utilisant des langages incompatibles, de sorte qu'au lieu d'arriver enfin par ce moyen à la clarté d'expression dont la géotechnique a besoin pour se développer, on a accru la confusion dans laquelle elle se développe.

2.3.2 Le raisonnement

Notre façon de raisonner dépend de notre culture, de notre savoir, de nos expériences, de nos moyens, de nos habitudes... ; l'informatique passe souvent pour l'un de ces moyens car les modèles qu'elle permet de bâtir et de manipuler, nous aident à caractériser, décrire, expliquer, prévoir..., c'est-à-dire à raisonner.

2.3.2.1 Les géotechniciens

La principale difficulté d'expression de la géotechnique tient à ce que ses praticiens de culture naturaliste, les géologues, ou de culture physicienne, les géomécaniciens, ne raisonnent pas vraiment de la même façon. Terzaghi, lui-même mécanicien, décrivait le géotechnicien idéal comme un géologue mécanicien et non l'inverse ; il exprimait ainsi qu'en géotechnique, le naturel prime sur le physique et le réel prime sur le modèle.

► Les géologues

En principe, le naturaliste observe sans idée préconçue, raisonne plutôt par induction à partir de faits d'observations ou d'expériences, sans contrainte, en essayant de tenir compte de tout ; il est finalement amené à douter souvent ; il considère que nous faisons partie de la nature et que, vis-à-vis de nous, elle est tout à fait neutre, ni indifférente, ni hostile, ni favorable qui sont des concepts animistes ; il essaie donc de la comprendre, afin de la modifier en l'adaptant, pour l'utiliser tout en vivant en harmonie avec elle. Naturaliste, le géotechnicien géologue travaille essentiellement sur le terrain, d'abord en observant, ensuite en mesurant, enfin en contrôlant : parmi les données ainsi recueillies qu'il peut ordonner selon la morphologie du site étudié, il choisit et utilise celles qui apporteront des solutions convenables au problème posé ; la plupart de ces données ne sont pas mathématiquement utilisables et les solutions retenues résultent plus de l'expérience que de la déduction ; elles doivent être confrontées et critiquées pour en réduire le nombre et garder le meilleur de chacune, mais ainsi il n'obtiendra jamais une solution unique indiscutable. Cette démarche peut alors paraître trop subjective et ses conclusions, mal fondées et donc suspectes à qui oublie que les bases de la science et de la technique sont pragmatiques et que le scepticisme y est de rigueur ; la bonne qualité du résultat qu'il obtient lui apporte souvent la même considération que l'on accorde au rebouteux qui a massé efficacement une luxation du poignet.

► Les géomécaniciens

Par contre, le physicien raisonne par déduction en manipulant des modèles, mesure selon des règles établies un nombre limité de paramètres et calcule dans le cadre érigé d'un système axiomatique ; il obtient finalement une solution dont la qualité n'est pas supérieure à celle du modèle utilisé. Physicien de la géotechnique, le géomécanicien procède d'abord à des mesures de paramètres choisis pour être manipulés dans un modèle existant plus ou moins bien adapté au cas étudié, car les cas sont innombrables et spécifiques et les modèles disponibles sont peu nombreux et génériques ; pour ordonner ces données souvent

inextricables, il recourt parfois à des manipulations statistiques rarement justifiées en raison de leur petit nombre ; cela le conduit à une solution unique, en principe certaine, mais qu'il serait toujours nécessaire de critiquer pour aboutir à une solution pratique du problème posé ; il s'en dispense le plus souvent. Sa démarche semble ainsi objective et ses conclusions indiscutables puisqu'issues de calculs rigoureux ; il oublie alors toutes les simplifications qu'il lui a fallu utiliser pour passer du cas réel au modèle bâti pour cela ou choisi dans un catalogue, et il ignore la référence au site qui seule permet le nécessaire retour du modèle au cas réel. Le recours à l'ordinateur permet maintenant de multiplier les solutions issues de modèles, de paramètres et de mesures différents ; le problème qui se pose ensuite est le choix de la solution utilisable, car elles ont toutes la même valeur objective ; là encore, il faut s'en référer au site : le géomécenic ne peut jamais se dispenser de géologie.

En fait donc, le géotechnicien doit savoir qu'il n'y a pas une mais des solutions à tout problème qui lui est posé ; il doit réduire autant que possible l'imprécision de celle qui sera retenue en les confrontant à l'observation et à l'expérience ; ainsi, il doit raisonner à la foi comme géologue et géomécenic, librement quand il observe, rigoureusement quand il mesure et calcule, prudemment quand il conclue.

2.3.2.2 Les autres intervenants

Chacun des intervenants dans l'acte de construire raisonne spécifiquement, sans trop se préoccuper de la façon dont raisonnent les autres : le maître d'ouvrage attend l'ouvrage correspondant à son programme ; le maître d'œuvre attend les éléments techniques dont il a besoin ; les techniciens qui les lui fournissent, agissent dans des cadres généralement normalisés dont ils ne peuvent pas s'écarter ; les assureurs encaissent des primes sans trop se préoccuper des risques éventuellement pris par les précédents puis incidemment discutent âprement le coût des dommages et la répartition des responsabilités avec éventuellement l'aide de juristes et d'experts. Dans des circonstances et à des titres différents, le géotechnicien intervient auprès de chacun d'eux ; tous attendent de lui des réponses claires et précises à leurs problèmes particuliers qui ne sont pas toujours les mêmes, alors qu'il ne peut leur donner que des réponses approximatives fondées sur des résultats qui ne sont que des ordres de grandeur ; et éventuellement, seul contre tous, comment peut-il faire admettre que l'ouvrage est endommagé, non parce que le résultat d'un calcul n'est pas « exact », parce que le sol est « vicieux »..., mais parce que l'ouvrage était vulnérable, mal étudié, mal construit, mal adapté aux particularités naturelles du site ? La rigueur technique, économique et juridique s'accommode mal de l'incertitude naturelle.

2.3.2.3 L'ordinateur

La manipulation de modèles informatiques n'est évidemment pas un mode mais un auxiliaire de raisonnement ; l'ordinateur ne fait qu'optimiser le traitement de données numériques dans un cadre préétabli ; il permet d'accumuler des données et de les traiter mathématiquement, ce qui est sensé accroître la

précision de la solution cherchée : les colonnes de chiffres et les images passant directement de la machine au rapport, incompréhensibles pour les non-spécialistes mais pas toujours nécessaires aux spécialistes, garantiraient ainsi la qualité d'une étude.

Mais cette accumulation n'est possible que si l'on peut recueillir ces données à bon compte ; on ne peut le faire que très rarement en géotechnique, en raison de la durée et du coût élevé des sondages et essais qu'elle imposerait. Et même, le seul fait de disposer de données abondantes ne garantit pas la qualité du résultat final que fournira l'ordinateur ; il est aussi nécessaire que les données et la manière de les traiter soient spécifiques du problème posé ; un logiciel ne fait que traiter de façon convenue les données qu'on lui fournit ; il ne sait pas les critiquer pour ne retenir que les plus convenables. Pour pouvoir le faire en s'appuyant sur l'expérience, il manquera toujours à l'informatique d'être aussi douée d'imagination, d'inspiration et d'intuition, c'est-à-dire d'être capable de sortir opportunément des sentiers battus, des systèmes axiomatiques et de leur programmation. Le danger de l'utilisation inattentive de l'ordinateur réside donc dans le fait que l'on peut affecter au résultat issu d'une méthode de traitement de données réputée, à juste titre, impartiale et rigoureuse, une force de conviction supérieure aux qualités objectives de ce résultat ; ces qualités ne sont bien entendu pas supérieures à celles des données et de la façon de les traiter. Pour schématiser à l'extrême, on peut dire qu'un ordinateur n'est pas capable de transformer des informations erronées en résultats acceptables ; il ordonne mais ne transforme pas ; je rappelle à ce propos le professeur de Prévert qui comptait correctement des lièvres faux.

Au moyen de longues séances de calculs à l'ordinateur, le traitement d'un problème par une méthode numérique donne des solutions que l'intégration analytique ne permet pas d'atteindre. Mais, afin que la solution ainsi obtenue soit acceptable, il faut que l'on ne schématise pas trop le problème pour rendre possible le traitement, en fait pour écrire le logiciel. Et quand on utilise ensuite cette solution, on ne doit jamais perdre de vue l'influence de cette schématisation sur sa valeur intrinsèque.

La mise en œuvre de cette méthode de traitement de données qui, sauf dans sa phase de préparation, ne peut donc pas être considérée comme un mode de raisonnement ainsi que l'on aurait plus ou moins tendance à le faire, n'est rentable que si un même type de problèmes peut être étudié et résolu selon un schéma général unique. Contrairement aux apparences, ce n'est que rarement le cas en géotechnique où tout problème réel est nouveau et unique et où la collecte de données nécessaires à sa résolution, est lente et onéreuse. Néanmoins, le dégrossissage de la plupart des problèmes génériques de géomécanique se prête bien à la simulation numérique

Ainsi, celui très courant que pose la stabilité des talus de déblais ou de remblais au glissement rotationnel ne se traite plus que par l'informatique : en fait, pour un talus de hauteur et de pente données, taillé dans un matériau que l'on définit par sa densité, sa cohésion et son angle de frottement interne, selon le niveau de la nappe aquifère... le logiciel ne fait que préciser la position du centre du cercle le plus critique et donner la valeur correspondante du coefficient de sécurité par rapport à la rupture, d'après une des méthodes classiques de la mécanique des

sols, Fellenius-Bishop en général. Il n'est du reste pas tout à fait certain qu'il fasse cela plus vite et mieux qu'un géotechnicien ayant l'habitude de traiter ce genre de problème, pour peu que l'on considère que pour que l'ordinateur commence à fonctionner, il faut l'avoir intelligemment nourri ce qui prend un temps non négligeable et que, quand il a fini de fonctionner, il faut interpréter les résultats obtenus, ce que l'on ne peut faire qu'en changeant de mode de raisonnement.

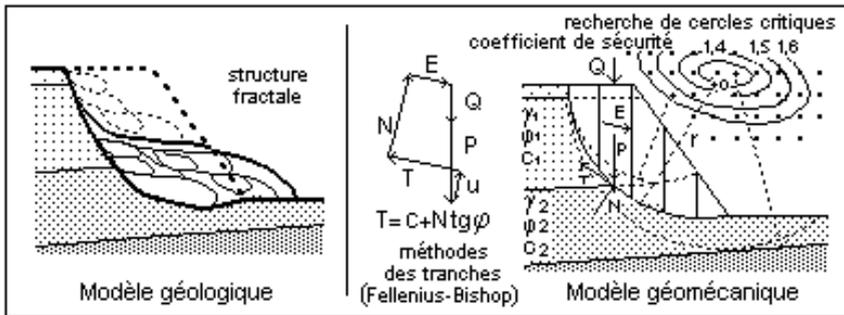


Figure 2.3.2.3 – Stabilité d'un talus

Mais là n'est pas la question ; l'ordinateur calcule plus vite cent cercles et cent coefficients qu'un homme, bien que trois ou quatre cercles soient amplement suffisants pour qu'un homme familier du problème arrive au même résultat que lui. La question est de savoir ce que sont en fait ces cercles et ces coefficients : ils représentent uniquement la phase finale du traitement d'un nombre très limité de paramètres géotechniques, conventionnellement considérés comme les plus influents du phénomène de glissement dans le cadre étroit d'une méthode de calcul imposant des conditions aux limites arbitraires au milieu et au phénomène. On peut être assuré que ces conditions ne correspondent à rien de réel et les coefficients ainsi calculés, tant par l'ordinateur que par l'homme, ont la même valeur objective, très relative par rapport à la réalité. Seulement le technicien qui calcule ses cercles, perd rarement la notion du réel car il participe physiquement à l'élaboration de la solution du problème posé ; il est constamment conscient de l'influence de chaque facteur d'imprécision de la méthode et en tient justement compte dans la critique du résultat final. Tandis que celui qui se contente de nourrir l'ordinateur et de recueillir sa sentence, peut avoir inconsciemment oublié le caractère abstrait de la méthode qui est à la base du logiciel. Il peut même pratiquement tout ignorer de la méthode ou n'en avoir aucune expérience pratique ; il sera ainsi tout à fait incapable de critiquer le résultat fourni par la machine, l'acceptera sûrement comme tel ; plus grave encore, il le présentera comme issu d'un calcul rigoureux au non-spécialiste qui considérera que son talus sera parfaitement stable et ne lui causera aucun ennui parce que l'ordinateur a dit que la valeur du coefficient de sécurité atteignait par exemple 1,84. Il aura ensuite quelques chances de constater l'inexactitude pratique du résultat rigoureux d'un excellent calcul théorique et pourra, s'il veut s'éviter ultérieurement de tels déboires, méditer sur le fait que cette valeur

n'était finalement pas issue de l'ordinateur, mais de la méthode des tranches de Fellenius-Bishop dont les résultats, évidemment essentiels à connaître, sont pourtant loin de pouvoir être pris au pied de la lettre.

L'intégration informatique complète des phases successives de l'étude d'un ouvrage, depuis la prise de mesures sur le terrain jusqu'à la solution pratique, pente de talus, pression de service de fondation, débit de fouille..., est un souhait irréaliste qui permettrait aux constructeurs de se passer de géotechniciens. Une des rares que l'on peut citer est le calcul des pieux flottants par la méthode du pénétromètre statique : la résistance de pointe et le frottement latéral localisé sont directement enregistrés et un logiciel permet d'obtenir les caractéristiques du pieu à partir de l'enregistrement ; il s'agit bien évidemment d'une possibilité très spécifique, qui ne peut être mise en œuvre que par un géotechnicien avisé, dans certaines zones urbaines dont le sous-sol est très bien connu, comme celui des Pays-Bas où elle a été mise au point. On prétend pouvoir faire à peu près la même chose, n'importe où, avec les enregistrements d'essais pressiométriques enregistrés puis interprétés à l'ordinateur sur le terrain, pour tous types de fondations ; il serait très imprudent de le faire habituellement, sans contrôle ni surtout sans critique.

Le pilotage automatique de machines de chantier à partir de mesures de terrain n'est pas près d'être possible, en dehors de grands chantiers dans des sites aux structures très simples, pour des opérations séquentielles et répétitives, au moyen d'appareils extrêmement complexes : pour de grands ouvrages quasi-industriels comme les parois moulées ancrées par tirants, les injections, les tunneliers, les tirs d'abattage... on exécute automatiquement de très nombreux sondages mécaniques dont on enregistre numériquement les paramètres mécaniques ; au moyen de logiciels spécifiques, on tire de ces enregistrements, des valeurs de paramètres censés représenter le sous-sol du site ; on introduit ces valeurs dans des logiciels de conception et d'exécution ; on dit enfin aux machines de faire ce que le logiciel de pilotage issu des précédents, leur dit de faire. Cela marche souvent parce qu'à chaque niveau, on a introduit de confortables coefficients de sécurité dont les effets se sont ajoutés, et surtout, parce que de temps en temps, un homme averti y a regardé de près : et à la fin, il y a toujours un pilote dans la machine ! C'est alors la définition du mot économie qui peut être différente pour l'entrepreneur et pour le maître d'ouvrage.

En fait, le seul travail intellectuellement profitable dans l'usage de l'ordinateur est celui de la conception de logiciels spécifiques. Celui qui l'entreprend doit être à la fois un géotechnicien expérimenté et un bon informaticien, capable d'aborder successivement l'analyse et la synthèse du problème posé. Ce travail consiste à caractériser le phénomène considéré, à définir ses paramètres les plus influents et leurs corrélations, à analyser le problème posé, à lui trouver une solution mathématique, à la traduire en langage assimilable par la machine, et à trouver un enchaînement logique d'opérations susceptibles d'être effectuées par elle pour obtenir le résultat cherché. Malheureusement, ce travail est en général trop abstrait pour que beaucoup l'entreprennent et pour qu'il soit profitable au plus grand nombre ; ceux qui ensuite, utilisent les logiciels ainsi obtenus, n'essaient même plus de savoir comment ils l'ont été.

2.4 Le site et l'ouvrage

Un site géotechnique est une infime portion de l'écorce terrestre sur laquelle un ouvrage est construit ou va l'être. La construction de n'importe quel ouvrage, même normalisé comme un pont courant d'autoroute, est originale car son site est unique ; du point de vue géotechnique, tout ouvrage est donc un prototype. La construction induit des phénomènes qui modifient l'état naturel du site et donc son comportement, ce qui peut altérer sa stabilité et donc celle de l'ouvrage jusqu'à le détruire.

2.4.1 Étudier le site

Comme toute science, la géotechnique est un cadre qui nous permet d'étudier certains aspects de la nature pour les schématiser, afin d'en faciliter la compréhension et d'en permettre l'utilisation. En première analyse, il peut sembler relativement facile d'y parvenir, pour peu que l'on emploie les moyens nécessaires, tant matériels qu'intellectuels. Les orateurs de congrès, symposiums et autres réunions, les traités, articles et autres publications spécialisés, expriment une parfaite connaissance de toutes les formes et tous les comportements du géomatériau : on ne peut qu'en éprouver une grande admiration ; on est ensuite très ennuyé de constater sur le terrain que bien souvent, ce matériau, entre temps réduit à un milieu, refuse de se comporter comme on voudrait qu'il le fasse. Un tel manque de bonne volonté de sa part concrétise le fait que la nature et l'esprit humain ne paraissent pas procéder de la même logique ; ou plutôt que, s'il semble bien exister une logique humaine, rien ne permet de penser qu'il existe une logique naturelle. Contrairement à l'image que nous nous en faisons, la nature n'est pas une belle construction, issue du puissant cerveau d'un grand architecte ; s'il en était ainsi, tout serait dit une fois pour toutes, la recherche scientifique serait sans objet et la vie manquerait de sel. Les lois scientifiques ne sont pas les Lois de la Nature mais de commodes artefacts traduisant nos connaissances du moment et d'astucieux instruments de travail, utilisables dans un contexte particulier pour résoudre un problème spécifique.

On ne peut prétendre connaître ou comprendre que ce que l'on sait reproduire ou fabriquer ; il n'est donc pas possible qu'un jour, nous connaissions et comprenions tout à fait la nature. N'en étant qu'une infime partie, nous ne l'appréhenderons jamais globalement ; nous pourrons tout au plus la comprendre de mieux en mieux sans jamais vraiment la connaître. S'il est possible sinon vraisemblable qu'à certaines échelles d'espace et de temps qui ne nous sont pas accessibles, les phénomènes naturels soient déterminés, il est certain que l'on ne saura jamais faire l'inventaire complet des processus et des paramètres qui régissent chacun d'eux et nous les font paraître chaotiques. À mesure que l'on entre dans les détails d'un objet ou d'un phénomène naturel, si apparemment simple soit-il, on bute sur son extrême complexité ; après de laborieux efforts, on doit se contenter de l'appréhender dans ses grandes lignes, en ordres de grandeurs.

La connaissance du géomatériau ne peut donc être que très imparfaite et surtout, sa traduction en langage humain ne peut être que très imprécise. Pour un observateur averti, l'adaptation exacte de la nature à nos besoins ne peut être que très fragmentaire, pour ne pas dire presque impossible ; et même, l'adaptation de nos besoins à la nature ne peut être que très approximative. Si en effet, nous avons besoin de la nature et ne pouvons pas nous passer d'elle, la nature se suffit à elle-même et peut très bien se passer de nous ; elle l'a fait très longtemps avant que nous apparaissions sur la Terre ; elle le fera sans doute très longtemps après que nous en aurons disparu.

Mais nous nous opposons toujours à la nature en essayant de nous placer hors d'elle, pour nous attribuer le droit de nous l'approprier en la dominant pour vivre à ses dépens. Cette attitude agressive nous a souvent conduit à d'amères désillusions : l'exploitation politique dont la nécessité de sauvegarder l'environnement est actuellement l'objet, montre bien que nous nous rendons parfois compte de ses limites, ce qui ne nous empêche pas de les transgresser sans cesse. Même si nous ne voulons pas le reconnaître, nous sommes constamment contraints de composer avec la nature ; elle ne nous accepte qu'autant que nous ne la dérangions pas trop et même, que nous nous plions à ce que nous appelons improprement mais lucidement ses lois. Selon Épicure inspiré par Démocrite et paraphrasé par Francis Bacon « Il ne faut pas forcer la nature mais la persuader » ; nous l'oublions malheureusement trop souvent ; pourtant, cette attitude pas très brillante mais très rationnelle conduit généralement à des résultats écologiques sûrs et durables.

2.4.2 Construire l'ouvrage

Déterminer les contraintes naturelles pour bâtir une stratégie cohérente, permet dans chaque cas, d'adopter une tactique propre à faire accepter la construction de l'ouvrage projeté par la nature ; cela revient à concevoir un ensemble site/ouvrage cohérent, dont le comportement soit tel que la pérennité du second ne puisse pas être compromise par les réactions du premier. Si l'on est tenté de juger cela un peu trop animiste, on se souviendra que le site est fondamentalement instable ; il réagit aux sollicitations extérieures selon un processus qui lui est propre et qu'il nous appartient d'essayer de comprendre, même si ses réactions ne paraissent pas procéder de la même logique que la notre.

La construction d'un ouvrage qui est, entre autres aboutissements, celui d'une étude géotechnique, est une provocation à la nature ; elle modifie un quasi-équilibre naturel préexistant qui va inéluctablement tendre à se rétablir. Cette provocation est fondée sur les résultats discutables d'une étude théorique et sur les enseignements d'une expérience incomplète. Il s'agit donc chaque fois d'un passage original de la théorie à la pratique ; et si la science paraît parfois apporter la certitude, la technique se heurte constamment au contingent ; le problème posé est chaque fois différent ; ce passage est donc très dangereux. On a mal observé la nature ; on l'a mal comprise ; les équations n'en sont que de grossières images ; l'expérience sur laquelle on croit pouvoir s'appuyer, est très incomplète. L'imperfection de l'étude que l'on a voulue théoriquement parfaite, n'apparaîtra qu'en

cours de réalisation et de façon plus ou moins frappante suivant l'importance de cette imperfection. Ce peut être à la suite d'un accident ; fort heureusement, elle apparaît généralement de façon moins évidente, à la faveur d'indices divers, plus ou moins apparents, que l'on ne remarque qu'à condition d'être attentif. Il faut donc constamment chercher parmi ces indices, ceux que l'on estime être les plus importants, faire la part de l'inconnu, qui est toujours plus grande qu'on le voudrait, et enfin faire des choix que l'on ne peut jamais considérer comme définitifs, en prenant des risques que l'on essaie de calculer au plus juste. En effet, la découverte de tels indices infirme en partie le modèle théorique bâti lors de l'étude ; elle impose donc de modifier en permanence la conception du site, celle du projet et ensuite même, de plus ou moins retoucher l'ouvrage. Il serait bien étonnant qu'il en puisse être autrement puisqu'on doit considérer tout ouvrage comme un prototype ; et l'on ne connaît pas de prototypes, fussent-ils de technique très courante comme ceux d'automobiles, dont la mise au point n'ait imposé de nombreuses retouches tant au bureau d'études qu'à l'atelier, puis de nombreux essais de comportement, y compris destructifs.

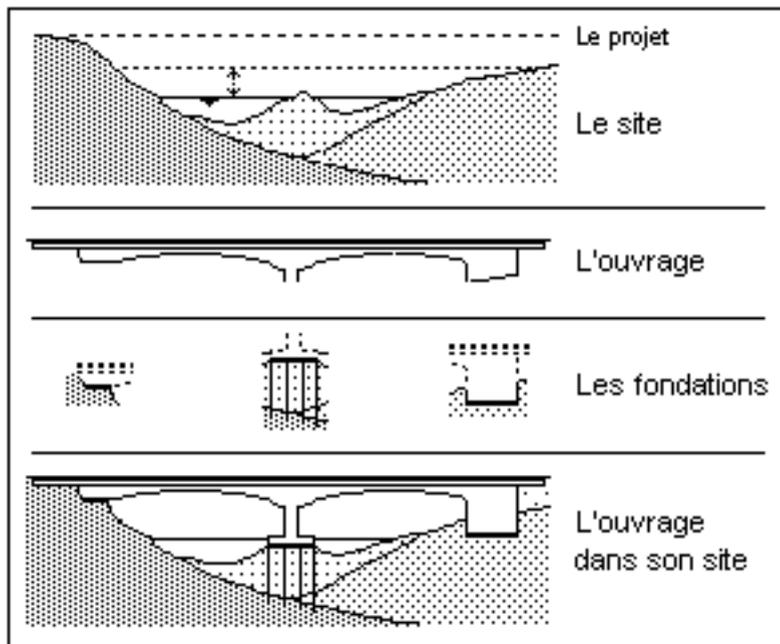


Figure 2.4.2 – Le projet, le site et l'ouvrage

2.4.3 Retarder la ruine

On réalise, à un moment donné, un ouvrage donné, répondant à un besoin donné, d'une façon que l'on essaie de rendre la plus sûre et la plus économique. Aucun ouvrage ne peut être raisonnablement construit pour l'éternité ; la vanité

humaine voudrait pouvoir infirmer cette règle pour les monuments religieux, funéraires ou commémoratifs ; en fait, très peu, parmi les plus antiques d'entre eux, demeurent ; la disparition de ceux qui restent n'est sans doute qu'une question de temps malgré l'entretien et les restaurations dont certains sont l'objet. Tout ouvrage s'use et se ruine ou est détruit ; au temps de la splendeur qui est aussi celui de l'utilisation, succède le temps du souvenir qui est celui des belles ruines, puis le temps de l'oubli qui est celui des indices que seul un archéologue averti peut reconnaître. Le paysage lui-même évolue de façon naturelle par l'érosion ; il tend vers sa destruction qui est seulement trop lente à l'échelle humaine, pour être communément perçue ; le relief de la Bretagne a été jadis aussi tourmenté que celui des Alpes actuelles.

La bonne conception, l'exécution correcte et l'entretien soigneux d'un ouvrage sont donc des obligations qui retardent sa ruine mais ne l'évitent pas. On entretient plus ou moins soigneusement un ouvrage dont l'usage se perd ou change ; il se dégrade plus ou moins rapidement selon la façon dont il a été construit, les matériaux utilisés pour sa construction et l'usage secondaire que l'on en fait. C'est ainsi qu'en France, de nombreuses chapelles rurales médiévales, transformées depuis souvent fort longtemps en granges ou entrepôts, ont pu être restaurées ; cet usage secondaire les a préservées de la ruine complète qui a été le lot de celles dont la situation ou la structure n'avait pas permis la transformation. Il serait absurde de prétendre construire un ouvrage qu'il ne serait pas nécessaire d'entretenir et ce, quelles que soient les précautions prises au cours de son exécution et la dépense initiale que l'on y ait consacrée. La géotechnique doit donc également permettre d'assurer à un ouvrage une durée de vie analogue à la durée que l'on pense pouvoir ou devoir être celle de son utilisation.

Pour cela, il est nécessaire de lui attribuer un rôle permanent, d'abord dans l'étude du projet, puis au cours de la réalisation de l'ouvrage et enfin, après sa mise en service, durant toute sa vie. On doit regretter qu'actuellement ce rôle soit généralement limité à l'étude du projet, quand toutefois on accepte de lui en attribuer un.

2.4.4 Éviter les catastrophes

Les phénomènes naturels susceptibles de provoquer des dommages aux ouvrages et qui peuvent affecter les personnes et les biens, sont maintenant assez bien connus ; dans une certaine mesure, leurs effets peuvent être prévenus, les personnes peuvent être protégées et les dommages aux biens peuvent être limités. Il n'en a pas toujours été ainsi ; les anciens avaient déifié la plupart d'entre eux ; ils attribuaient leurs effets catastrophiques, à la colère d'un dieu qu'il fallait apaiser par des sacrifices. Malgré les explications et les moyens d'interventions que nous ont procurés la science et la technique, il en est resté que l'on qualifie toujours les catastrophes de « naturelles » et le sol de « vicieux » ; ce sont là des survivances de croyances animistes. Les phénomènes sont naturels, pas les catastrophes ; le sol est neutre, pas vicieux ; à

l'homme d'éviter d'être là quand un phénomène naturel est susceptible de l'affecter, et de construire ses ouvrages en tenant compte des risques du sol.

La connaissance des phénomènes naturels a été le but de la science, puis des sciences physiques et enfin des géosciences. La manière de les étudier a successivement été indirecte par l'observation de leurs effets, empirique par extrapolation et conjecture, pratique par l'observation directe, théorique par l'analyse et la synthèse ; on est ainsi passé des effets aux causes, ce qui donne en principe la possibilité d'intervenir par la prévision, la prévention et la protection.

Pour la plupart des phénomènes naturels éventuellement destructeurs, on sait à peu près répondre aux questions essentielles, où ?, comment ?, avec quelle intensité ?, dont les réponses conduisent à la prévention et à la protection ; on ne sait par contre pas répondre à la question fondamentale, quand ?, qui permettrait la prévision et donc d'éviter les accidents et les catastrophes humains.

Dans un site donné, la géotechnique permet de faire l'inventaire des risques potentiels que pourrait faire peser sur lui, la manifestation intempestive d'un phénomène naturel ; il est alors possible d'y adapter l'ouvrage ou de renoncer à le construire là. Et si le site a été occupé avant que l'on ait appris à le faire, ce qui est le cas général dans les vieux pays, elle aide à organiser des procédures et des moyens d'intervention ; en cas d'expression du risque, ils limiteront les dégâts et permettront de revenir rapidement à une situation normale

2.5 Le géotechnicien

Étudier et construire un ouvrage est un acte complexe qui présente des aspects géographique, technique, sociologique, financier, administratifs et juridique étroitement imbriqués ; il concerne de nombreuses personnes physiques ou morales qui, à des titres divers, y participent directement ou indirectement, en totalité ou partiellement. Le géotechnicien est l'un d'entre eux, indispensable mais souvent négligé voire oublié, car son rôle dans l'acte de construire est mal défini et parce que la plupart des autres acteurs de la construction ignorent la spécificité de sa démarche.

2.5.1 Les acteurs de la construction

Le législateur et l'administration définissent et font respecter les règles publiques de construction.

Le maître d'ouvrage détermine les caractéristiques générales de son projet, choisit le site, finance les études et la construction puis demeure propriétaire de l'ouvrage et l'exploite ou bien le vend.

Le maître d'œuvre étudie le projet et en surveille l'exécution pour le compte du maître d'ouvrage.

Divers techniciens, généralement ingénieurs, indépendants ou faisant partie d'un bureau d'études, collaborent avec le maître d'œuvre à l'étude et éventuel-

lement à la surveillance de l'exécution des parties d'ouvrage qui relèvent de leurs spécialités ; ce n'est pas toujours le cas du géotechnicien.

Des organismes d'agrément technique définissent certaines méthodes d'étude et certains procédés de construction, choisissent certains matériaux et certains appareils et même agréent certains techniciens, pour le compte d'un maître d'ouvrage public ou pour les assureurs, selon des critères qui leur sont propres.

Un organisme de contrôle veille au respect de règles et de normes de calcul et d'exécution pour le compte du maître d'ouvrage et des assureurs ; elles sont établies par lui-même ou par un organisme d'agrément technique ; leur application est réputée devoir garantir la solidité de l'ouvrage.

Les entrepreneurs exécutent les travaux définis par les prescriptions de marchés passés avec le maître d'ouvrage, selon les instructions qu'ils reçoivent du maître d'œuvre et qu'ils acceptent, avec ou sans réserves, avec l'accord éventuel d'autres participants.

Les assureurs se substituant civilement à chacun des participants en ce qui le concerne, garantissent contractuellement l'ensemble ou une partie des conséquences pécuniaires des dommages subis par le chantier et/ou par l'ouvrage et, éventuellement, par des tiers et/ou par leurs biens, du fait du chantier ou de l'ouvrage.

Un magistrat peut avoir à connaître des litiges survenant entre tout ou partie des précédents et/ou vis à vis de tiers, généralement à la suite d'accidents de chantier et/ou de dommage à l'ouvrage et/ou à des tiers ; il se fait généralement assister par un expert inscrit sur une liste d'agrément.

Le maître d'œuvre, certains techniciens et les entrepreneurs sont les « constructeurs » de l'ouvrage au sens de la loi du 04/01/78 (cf. 7.2) ; ils doivent la « garantie décennale » au maître d'ouvrage ; le géotechnicien n'est un constructeur au sens de la loi que s'il intervient à toutes les étapes de conception et de construction d'un ouvrage et s'il peut contrôler et éventuellement modifier l'usage que les autres font de son étude et de ses recommandations.

Quand l'administration est maître d'ouvrage, il est fréquent que l'État, à travers certains de ses services, assume lui-même plusieurs de ces fonctions. Dans certains cas aussi, le maître d'ouvrage peut, directement ou par l'intermédiaire de collaborateurs ou de filiales, assumer les fonctions de bureau d'étude, d'entrepreneur...

2.5.2 Le géotechnicien

Le géotechnicien est un ingénieur-conseil, une société d'ingénierie, un organisme... qui procède habituellement à des études et/ou des expertises géotechniques commerciales ; ce peut aussi être un enseignant et/ou un chercheur qui, en dehors de sa fonction propre, agit sporadiquement comme consultant ou expert ; par contre, un ingénieur de sondages, de fondations spéciales, un laborantin d'essais de sols... ne sont pas des géotechniciens ou

n'en sont plus s'ils l'ont été auparavant : faire seulement des sondages et des essais n'est pas faire une étude géotechnique.

Les bureaux d'études techniques spécialisés en géotechnique s'appellent bureaux d'études de sols ; l'appellation de *bureau d'études géotechniques* aurait été préférable ; elle ne devrait pas être utilisée génériquement car elle est la marque commerciale de l'un des plus anciens d'entre eux, que j'ai imaginée à une époque où la géotechnique appliquée au BTP n'existait pratiquement pas.

La mission du géotechnicien est d'étudier un site pour recueillir, interpréter et utiliser les éléments géotechniques nécessaires à la construction d'un ouvrage, à une étape que fixent le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre et qui dépasse rarement celle de l'avant-projet-détaillé (APD – cf. 5.4.2.2). S'il en a les moyens, il peut mettre en œuvre lui-même l'ensemble des techniques qui lui sont nécessaires ; sinon, il peut confier à divers spécialistes la mise en œuvre de tout ou partie des autres. Mais en tous cas, il assure l'organisation générale de l'étude, la coordination de l'ensemble des techniques et assume la responsabilité de l'interprétation des résultats obtenus. C'est par contre généralement au maître d'œuvre et aux techniciens de structure d'assumer la responsabilité de l'utilisation des résultats qu'il leur fournit ; n'ayant le plus souvent qu'une mission limitée aux étapes initiales de l'étude d'un projet, faisabilité, APS, APD, et intervenant rarement sur l'ouvrage lors de sa construction, il n'est pas forcément un « constructeur », comme les autres acteurs de la construction voudraient qu'il soit toujours. Mais il peut éventuellement agir comme collaborateur direct du maître d'œuvre pour l'ensemble de sa mission, des études préliminaires à la réception de l'ouvrage achevé, ou lui-même comme maître d'œuvre pour non seulement étudier mais aussi diriger et contrôler, l'exécution d'ouvrages ou de parties d'ouvrages directement liés à sa spécialité comme les barrages en terre, les grands remblais, les fondations dites spéciales... Dans ces cas, il en assume évidemment toutes les responsabilités d'un constructeur.

L'activité de sondeur et/ou de laborantin d'essais est une activité d'entreprise qui est souvent la seule dont certains constructeurs prétendent avoir besoin ; certains géotechniciens les satisfont et entretiennent la confusion qui leur est commercialement profitable et sans risque juridique.

2.5.2.1 Démarche

La démarche du géotechnicien est très différente de celle des ingénieurs-constructeurs, utilisateurs directs des résultats d'une étude géotechnique ; il en résulte des risques d'incompréhension, d'interprétation erronée, d'usage abusif... de leur part, débouchant sur des défauts à l'ouvrage susceptibles d'entraîner des dommages que les experts généralistes proches des ingénieurs-constructeurs mettent souvent à la charge du géotechnicien en considérant que leurs démarches sont analogues ; on va voir qu'il n'en est rien.

Les méthodes de dimensionnement des structures et d'estimation des charges qui leurs sont appliquées, employées par les ingénieurs-constructeurs pour concevoir et calculer leurs ouvrages dont toutes les caractéristiques généralement plus ou moins standardisées sont déterminées, reposent sur des disciplines, règles,

normes, spécifications et matériaux clairement définis et utilisés de la même façon partout et par tous – résistance des matériaux, DTU... – matériaux artificiels, béton, acier, bois..., dont les propriétés physico-chimiques et en particulier mécaniques, sont normalisées, sévèrement contrôlées sur les chantiers et stables à long terme ; leurs applications sont transparentes et leur respect garanti en principe la solidité de l'ouvrage qui ne peut être compromise que par une grossière erreur de conception ou d'exécution, relativement faciles à éviter par des contrôles eux aussi rigoureusement codifiés ou vite trouvés et expliqués par les experts. La démarche des ingénieurs de structure est donc strictement encadrée ; leur degré de liberté pour exprimer leur expérience, leur savoir-faire et montrer leur efficacité est relativement faible. Par analogie, tous les acteurs de la construction considèrent qu'il en va de même pour les géotechniciens.

Or, la démarche du géotechnicien est très différente de celle des autres ingénieurs : l'eurocode 7 de « calculs *géotechniques* » (cf. 5.2.3.6) normalise bien les calculs *géomécaniques*, mais la méthode d'étude géotechnique n'est pas normalisée et ne peut pas l'être, car elle dépend étroitement du contexte qui varie au cas par cas selon le site, l'ouvrage, l'expérience du géotechnicien, le temps et les moyens mis à sa disposition... Il n'existe pas de modèle normalisé de site géotechnique de construction ; dans chaque cas, le géotechnicien doit en bâtir un et le modifier à la demande, à mesure que son travail progresse ; il ne sera validé qu'en fin de travaux par leur conformité aux spécifications du projet et même parfois invalidé plus ou moins longtemps après elle, par un dommage. Les matériaux naturels qui constituent le sous-sol du site lui sont imposés par la nature ; ils ne sont évidemment pas normalisés et il doit déterminer spécifiquement leurs propriétés au moyen d'essais nombreux et variés dont la procédure est normalisée mais dont le choix, l'utilisation et l'évaluation de la précision de leurs résultats sont laissés à son appréciation ; de plus, elles peuvent plus ou moins varier pour de nombreuses raisons plus ou moins bien connues, dans des proportions et à terme indéterminés : les méthodes de calcul dont il dispose sont plus ou moins normalisées, mais la méthode de l'étude ne l'est pas... Presque toujours sur le chemin critique de l'étude générale du projet, on lui impose une intervention rapide, le plus souvent limitée à l'APD, peu compatible avec un recueil de données de terrain et de laboratoire suffisamment nombreuses et fiables qui imposerait qu'il intervienne en relation permanente avec les constructeurs du début de l'étude du projet à la fin des travaux de chantier mettant en œuvre le sous-sol du site ; or, il ne connaît généralement que les grandes lignes du projet, intervient rarement sur le chantier et ne contrôle pratiquement jamais la façon dont les résultats de son étude sont utilisés ; il est rarement suivi quand il conseille de modifier un projet pour adapter l'ouvrage au site ; on préfère s'adresser à un confrère plus accommodant. La qualité de l'étude géotechnique dont il est chargé repose donc sur les moyens qu'on lui donne pour la réaliser et sur son expérience, pas sur le respect de règles et normes.

2.5.2.2 Attitude

Le géotechnicien se mesure à la nature ; quelle que soit son expérience, il entreprend un combat inégal qu'il ne peut pas gagner mais au cours duquel il doit s'efforcer d'acquérir le maximum d'avantages. La meilleure attitude qu'il

puisse donc adopter est une humilité attentive, sans préjugé ni *a priori* ; il doit essayer de la comprendre et peut être certain qu'il n'y parviendra jamais bien. Il doit savoir l'observer, les sens constamment en éveil, l'esprit libre de tout préjugé et de toute idée préconçue ; il doit la découvrir constamment et savoir qu'il n'aura jamais raison contre elle.

Il doit pouvoir faire abandonner tout ou partie d'un projet, ou les faire modifier par les constructeurs dès que les renseignements qu'il recueille montrent qu'elles sont défectueuses et que les conserver pourrait conduire qu'à des déboires ou même à des dommages plus ou moins graves.

À la fois chercheur et vulgarisateur, même s'il trouve quelque agrément à bâtir de belles théories et à en débattre entre spécialistes, son rôle plus ingrat consiste à résoudre des problèmes concrets et à mettre ses connaissances à la disposition de non-spécialistes qui font rarement l'effort de le comprendre.

2.5.2.3 Formation

L'exercice de la géotechnique est affaire de spécialistes expérimentés ; c'est un tout qui implique la possibilité et l'éventualité de mettre en œuvre de nombreuses méthodes et techniques proprement géotechniques et d'en appliquer les résultats à des ouvrages extrêmement variés, implantés dans des sites très différents. N'importe quel géologue ou n'importe quel ingénieur du BTP ne peut devenir géotechnicien du jour au lendemain ; et même le spécialiste d'une technique géotechnique n'est pas toujours un bon géotechnicien.

Terzaghi décrivait le géotechnicien idéal comme un géologue qui serait aussi mécanicien du sol ; Cambefort ajoutait qu'il devrait en plus, être ingénieur de génie civil et ingénieur de sondage ; on peut compléter par hydraulicien, géophysicien, informaticien et même juriste et commerçant.

Une double formation de géologue et d'ingénieur lui est donc nécessaire. Sa formation de base doit être celle d'un géologue, habitué à l'action, à l'autonomie et à l'incertitude des résultats, car la géotechnique est une branche des géosciences que l'enseignement secondaire maltraite, de sorte que ceux qui n'en acquièrent pas ensuite les formes d'action et de raisonnement très particuliers, ne l'obtiennent pratiquement jamais. Sa formation secondaire est celle d'un ingénieur, d'abord pour comprendre les préoccupations de ses interlocuteurs et satisfaire au mieux leurs besoins, ensuite pour organiser et réaliser la mise en œuvre des méthodes et matériels géotechniques de collectes de données sur le terrain et au laboratoire, enfin pour exploiter ces données au bureau et justifier les résultats de son étude ; ce doit être un ingénieur de génie civil, familier des chantiers où le pragmatisme et l'expérience sont nécessaires, plutôt qu'un ingénieur de structure, cantonné dans un bureau pour y appliquer des règles impératives censées garantir la sécurité de l'ouvrage futur.

Cette double formation s'acquiert en grande partie sur le tas car aucun enseignement ne la dispense, en dehors des rares écoles d'ingénieurs spécialisées en géologie comme l'ENSG.

Les écoles d'ingénieurs généralistes enseignent à des mécaniciens que le géomatériau est un matériau et un élément de structure comme d'autres, peut-être un peu fantasque. Ils y apprennent à utiliser des machines, à effectuer des mesures, à les manipuler au moyen de formules et de logiciels qui leur rendent des résultats réputés indiscutables. Il leur est ainsi très difficile de remettre en question une démarche aussi claire et rassurante.

Les universités forment des géologues, éventuellement spécialisés en fin de *cursum*. Ils assimilent mal la démarche des ingénieurs, habitués qu'ils sont à considérer que tout site est un objet d'étude en lui-même à travers le temps et l'espace pour expliquer pourquoi et comment il est ce qu'il est, là où il est, alors qu'en l'occurrence, il faudrait seulement dire ce qu'il est et ce qui va se passer là où il est.

Reste, et c'est l'essentiel, sa formation personnelle : compétence acquise sur le terrain par la pratique, l'accumulation d'expériences toujours différentes dans des situations évolutives voire instables, parfois à risques et alors très difficiles à gérer.

2.5.2.4 Une équipe

Les méthodes et les moyens de la géotechnique sont extrêmement nombreux et répondent à des besoins et à des préoccupations très variés. Un seul homme ne peut pas tous les connaître ni surtout bien les mettre en œuvre.

L'exercice de la géotechnique des grands ouvrages n'est donc plus concevable que par une équipe de spécialistes avertis entourant un chef de projet, capable de l'animer, de préparer et de synthétiser ses travaux. Ses membres doivent travailler de façon concertée pour obtenir les renseignements spécifiques nécessaires à la résolution globale du problème posé et non essayer de résoudre ce problème isolément et dans les limites généralement trop étroites de leur spécialité.

Ce n'est hélas pas de cette façon qu'opèrent encore sans doctrine bien définie, certaines équipes très cloisonnées dans lesquelles chaque spécialiste a un rôle restreint et limité : géologue, géophysicien, sondeur, laborantin, mécanicien des sols ou des roches spécialisé dans les études de terrassements, mécanicien des sols spécialisé dans celles de fondations, géotechnicien dans le sens de technicien des sols routiers, éventuellement hydrogéologue et hydraulicien. Il est courant de voir les membres de telles équipes intervenir successivement sur un même site et pour un même projet, en exécutant chaque fois une série de travaux à peu près analogues pour arriver à retrouver en partie ce que d'autres savaient déjà et finalement, dire la même chose sous des formes différentes sans qu'au total on en sache plus. L'absence de coordination générale rend les interventions de telles équipes longues et onéreuses tout en demeurant généralement incomplètes et empêche que les résultats obtenus soient présentés aux utilisateurs sous une forme directement utilisable.

La coordination d'une étude géotechnique et la synthèse de ses résultats ne peuvent être faites que par un chef de projet, vrai géotechnicien, seul responsable en dernier ressort, des travaux de son équipe ; ce n'est pas aux utilisateurs

d'assumer ce rôle. À propos de théâtre, Jean Vilar disait que rien ne pouvait être fait sans une équipe et un patron ; il semble que le jeu géotechnique doive aussi obéir à cette règle.

2.5.2.5 Organisation professionnelle

Le géotechnicien peut être un ingénieur-conseil libéral, un bureau d'étude de sol en société commerciale, un organisme public ou semi-public, le bureau d'étude d'une grande entreprise généraliste ou spécialisée en fondations spéciales, un enseignant... Comme personne physique, il est son propre patron dans le premier cas, salarié dans tous les autres. Il résulte de tout cela une grande confusion technique, commerciale et juridique dans l'exercice et l'organisation de la profession.

Les personnes physiques adhèrent souvent à des sociétés savantes généralistes ou technico-scientifiques spécialisées en géotechnique ou en types d'ouvrages. Elles organisent des réunions, des congrès, publient des articles et des revues, qui permettent à leurs adhérents de se tenir au courant de l'évolution de leur spécialité ; elles ont des commissions techniques qui s'intéressent à certains aspects de leur spécialité.

Certains ingénieurs-conseils et bureaux d'études de sols adhèrent à des organismes professionnels à caractère syndical, généralistes ou spécialisés en géotechnique qui défendent les intérêts professionnels de leurs adhérents en intervenant auprès des pouvoirs publics, des assureurs ; ils organisent des réunions, publient des informations... L'un d'entre eux, l'Union syndicale géotechnique (USG), essaie d'organiser la profession, de clarifier et de normaliser les rapports de ses adhérents et de leurs clients, notamment sur le plan juridique qui est le plus préoccupant dans l'exercice de la géotechnique (cf. 7.2) : le géotechnicien est souvent mis en cause à la suite d'un dommage à l'ouvrage au même titre que les constructeurs qui y ont intérêt pour diluer leur responsabilité, alors que le dommage n'est manifestement pas géotechnique ou que sa mission limitée n'en fait pas un constructeur. En principe, ces géotechniciens sont qualifiés par un organisme syndical, l'OPQIBI, dont toute une grille de spécialités a été consacrée à la géotechnique par un des membres-fondateurs qui était géotechnicien. La plupart des utilisateurs de la géotechnique n'utilisent que très accessoirement ces qualifications pour étayer leurs choix ; rarement exigées, elles ne sont souvent même pas évoquées dans les appels d'offres publics, ou bien elles servent souvent à disqualifier un concurrent sous le fallacieux prétexte qu'il n'a pas une qualification exigée mais secondaire, peu répandue, rarement utilisée et éventuellement facile à acquérir, au profit d'un favori qui peut lui-même ne pas en avoir d'autres exigées, souvent plus importantes, ce que l'on ne relève évidemment pas.

On peut classer les théories géotechniques en deux groupes qui ont des formes de raisonnement et des langages différents. Au premier, appartiennent celles qui sont issues de la géologie ; elles ont un fond essentiellement naturaliste ; elles s'expriment avant tout par des mots et des figures, cartes, coupes... Au second, appartiennent celles qui s'apparentent à la physique ; elles s'expriment surtout par des données numériques et des modèles mathématiques, courbes, formules, logiciels.

Les théories géologiques de la géotechnique sont celles de la géologie générale : en grande partie issues d'une longue pratique de l'observation, elles sont à peu près stables ; à toutes les échelles d'espace et de temps, les modèles de formes et de comportements du système terrestre et/ou de n'importe lequel de ses éléments, de la plaque au cristal, sont éprouvés, cohérents et compatibles ; admis et utilisés par presque tous les spécialistes, ce sont en général des modèles analogiques qui évoluent peu, partiellement et lentement.

Ses théories géomécaniques sont en fait des hypothèses de comportements simplifiés et artificiellement isolés de milieux schématiques, issues du traitement mathématique de données expérimentales obtenues suivant des processus convenus ; les plus simples modèles de comportements sont des formules mathématiques, généralement obtenues par intégration analytique de systèmes d'équations liant plus ou moins arbitrairement un nombre aussi réduit que possible de paramètres supposés déterminants ; éventuellement corrigées par empirisme au moyen de mystérieux coefficients, strictement déterministes, elles fournissent toujours une seule et même valeur de paramètre effet à partir d'une valeur de paramètre cause ; compte tenu des innombrables restrictions et simplifications imposées par cette démarche qui éloignent de plus en plus le modèle de la réalité, on obtient ainsi des résultats qui ne sont que des ordres de grandeur que l'usage ne valide pas toujours ; les modèles de formes jamais proches de la réalité, sont alors définis par les conditions aux limites du milieu, imposées par les procédés de calcul. Les modèles informatiques de formes et de comportements ne sont que des paraphrases plus ou moins compliquées des précédents qui fournissent des résultats apparemment plus précis, mais pas forcément meilleurs. La plupart de ces modèles évoluent continuellement, largement et rapidement, au gré des besoins, des modes et/ou des échecs ; dans ces conditions, la plupart des spécialistes ont des opinions divergentes sur la façon de les considérer et de les utiliser : il y a près d'une dizaine de façon de calculer la pression de service d'une même fondation superficielle, au moyen de formules et de paramètres différents, selon le type de géomatériau d'ancrage, l'appareil d'essai utilisé au laboratoire ou *in situ* et la méthode de calcul qui peut être spécifique de l'appareil, de l'auteur de la méthode ou générale !

3.1 La prospective

À partir d'événements passés et/ou présents et dans certaines circonstances, on essaie d'esquisser la tendance selon laquelle évoluera un phénomène, une situation, un ouvrage ; c'est le but de la prospective. Pour expliquer la forme et prévoir le comportement d'un système modélisant un certain aspect isolé et simplifié du réel à partir d'observations et d'expériences, on propose une hypothèse que de nouvelles observations et expériences valident ou non ; une hypothèse ainsi validée et généralisée à des systèmes de formes et comportements semblables devient une théorie qui s'exprime souvent par une loi. Mais aucune théorie géotechnique n'est stable, car les événements remarquables et signifiants sont incertains, rares et d'interprétation délicate, souvent variable ; ils se produisent dans des circonstances plus ou moins confuses, ne se déroulent pratiquement jamais de la même façon, comme prévu, et ont des effets généralement inattendus : la prospective géotechnique est un art difficile dont les fruits sont souvent ambigus et parfois douteux.

La prospective relève de la logique si elle est intuitive et repose sur peu de données ; elle relève de la science si elle repose sur des séries de nombreuses données cohérentes, probabiliste si la série est complexe, difficile à analyser, déterministe si elle est simple et structurée, et c'est seulement alors qu'en principe on obtient la certitude.

La prédiction est la déclaration de ce qui doit nécessairement et exactement arriver en un lieu et à un moment précis, généralement dans le proche avenir ; appuyée à une croyance, échafaudée sur des impressions, elle tient à l'occultisme ; fondée sur l'identité du passé, du présent et de l'avenir, produit du temps stationnaire ou cyclique, elle ressortit au déterminisme pour des événements simples. La prévision, estimation anticipée de ce qui est seulement susceptible d'arriver à terme plus ou moins lointain, est possible pour de tels événements, proches du réel, par la probabilité et la statistique sur de longues séries structurées de données numériques ; elle est fondée sur l'analogie plus vraisemblable mais aussi plus ou moins incertaine du passé, du présent et de l'avenir ; le temps sagittal lui suffit.

Les circonstances déterminent les événements naturels susceptibles d'affecter un ensemble indissociable site/ouvrage alors que sa forme et son comportement imposent des contraintes, des limites, à son évolution qui n'est jamais quelconque : il n'arrive jamais n'importe quoi, n'importe où, n'importe comment. Si l'événement est rare et ses effets imparables quel que soit l'ouvrage, on en fait le fruit du hasard ; c'est en fait un événement fortuit ; si les contraintes sont faibles et les circonstances variables, les effets d'événements analogues et fréquents peuvent être étudiés statistiquement ; si les contraintes sont fortes et les circonstances stables, l'événement est déterminé et on admet qu'il produira inévitablement des effets identiques. La principale difficulté de la prospective géotechnique est de tracer au cas par cas la limite entre le déterminisme et la probabilité, entre le général qui ressortit aux lois et le particulier qui ressortit au contingent, entre le prédictible et le prévisible.

Les phénomènes « simples », généraux et génériques, sont plus ou moins stationnaires sinon intemporels et règlent l'évolution universelle, comme la gravité ; ils ressortissent à la physique classique. Déterminés par des causes générales et des circonstances particulières, leurs effets sont invariables et inévitables ; ils sont décrits par des lois et exprimés par des formules. Mais rien n'est simple en géotechnique : deux essais géomécaniques réalisés sur le même géomatériau avec le même appareil, par le même opérateur, ne donnent jamais le même résultat parce que deux échantillons, si proches qu'aient été leurs points de prélèvement, ne sont jamais strictement identiques ; pourtant, les procédures d'essais sont fondés sur des lois simples, « linéaires », Hooke, Coulomb, Darcy.... En fait, il existe autant de paramètres d'un même géomatériau que d'appareils et de procédures pour les mesurer et autant de valeurs plus ou moins différentes du même paramètre que de mesures lors d'un même essai.

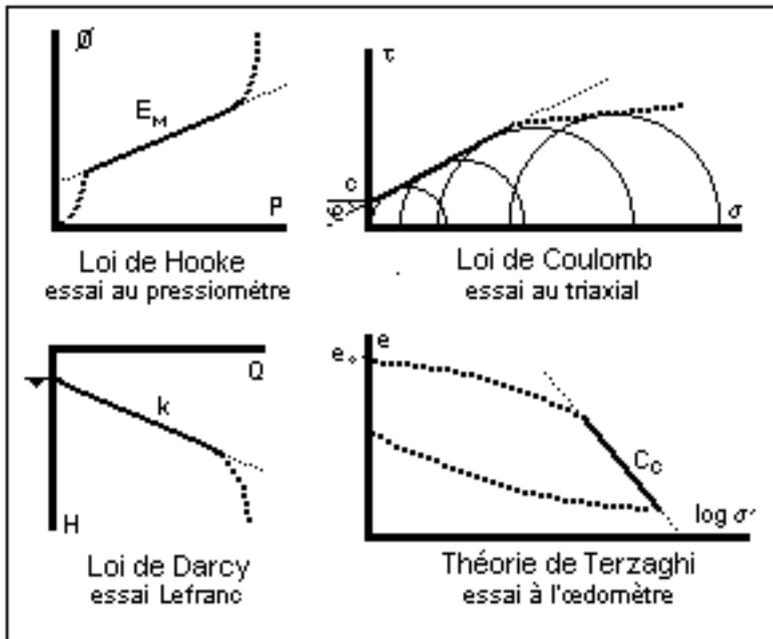


Figure 3.1 – Lois fondamentales de la géomécanique

La plupart des phénomènes naturels sont complexes, particuliers et spécifiques. Leurs manifestations paraissent plus ou moins aléatoires mais dépendent en fait d'événements passés et du contexte présent ; leurs effets sont connus mais variables en grandeur, position et instant. On les exprime statistiquement par des intervalles de définition et des probabilités de production. Mais les valeurs des paramètres que l'on considère comme représentatifs d'un phénomène naturel, mesurées lors de chaque événement ou estimées d'après les archives, ne constituent jamais une véritable série statistique, soit parce qu'elles sont peu

nombreuses, soit parce qu'elles proviennent d'événements qui n'ont que l'apparence de l'analogie, soit pour ces deux raisons et même quelques autres.

On ne peut rien dire de phénomènes naturels inconnus à propos desquels on pourrait effectivement évoquer le hasard géotechnique ; dans l'état de notre connaissance de la Terre, il n'y en a pratiquement plus. Les phénomènes mal connus sont identifiés, parfois expliqués, mais leurs manifestations paraissent aléatoires et les relations de causes à effets, indéterminées ; aucune représentation mathématique ne peut en être faite : l'éventualité de leur réalisation et leur intensité ne sont pas prévisibles. Les phénomènes connus peuvent l'être de façon plus ou moins précise ; cela dépend de l'intérêt qu'on leur porte et de leurs caractères propres, c'est-à-dire de la nocivité et de la probabilité de leurs manifestations dommageables.

3.1.1 L'irrationnel

La peur, l'indécision, la négligence, l'insouciance, l'excès de confiance, de pessimisme ou d'optimisme... sont les attitudes irrationnelles les plus courantes face au risque ou même au danger géotechniques ; il importe donc de bien séparer le rationnel de l'irrationnel, car les événements naturels dommageables sont souvent abordés par la peur que suscite leur évocation et par leur probabilité de réalisation présentée comme une quasi-certitude ; or la peur est subjective, souvent imaginaire, et peut être parfois inconsidérément déclenchée par une opinion ou une action involontaire ou irresponsable : elle est donc généralement irrationnelle comme le seraient les risques qu'ils entraînent.

Pour la plupart d'entre nous, les phénomènes naturels paraissent mystérieux, leurs évolutions désordonnées et leurs événements marquants, aléatoires. Ainsi, bien qu'ils soient scientifiquement explicables, leurs événements intempestifs sont abusivement qualifiés de fatals, c'est-à-dire certains car inscrits dans une évolution strictement réglée dès l'origine, ou de hasardeux, c'est-à-dire incertains mais possibles car résultant d'une évolution fluctuant selon les circonstances ; ils sont souvent redoutés par ceux qui n'y sont pas exposés et négligés par ceux qui pourraient l'être ; certains demeurent les objets redoutés de croyances ou de superstition, qu'ils sont depuis la nuit des temps.

Les positions irrationnelles extrêmes sont que tout est risqué, fatal, ou au contraire que rien ne l'est, car tout est déterminé : pour se prémunir du risque, il ne resterait alors que l'inspiration divine ou la magie qui ont largement montré leur inefficacité, ou la science qui naguère encore, promettait la prédiction. Les faits l'ont obligé à être plus réservée, et elle est actuellement un peu revenue de cette prétention.

Néanmoins, le principal mythe de notre temps est celui du puissant pouvoir de la science : ce que l'on ne sait pas faire, on le saura demain : il suffit de s'en (faire) donner les moyens. Quel que soit le phénomène en cause, après l'échec d'une méthode de prédiction présentée comme infaillible, il se trouve toujours quelqu'un pour en proposer une autre bien meilleure qui révélera ses limites la fois suivante ; entre-temps, elle aura consommé de l'énergie et des crédits en

pure perte. Ce n'est donc pas demain que l'on verra disparaître l'irrationnel géotechnique.

3.1.1.1 La fatalité

La fatalité est la force occulte réglant d'avance et de façon irrévocable le processus qui conduit à un événement malheureux inhabituel, contraignant et insurmontable, éventuellement prévu mais inévitable ; en fait, rien n'est fatal. Pourtant, débarrassée de l'occultisme mais régie par un déterminisme implacable et vue comme un enchaînement réglé de circonstances entraînant un tel événement, la fatalité paraît acceptable, mais elle ne saurait l'être quand il s'agit d'un accident géotechnique, car aucun n'est vraiment inévitable : l'événement naturel l'est effectivement, mais pas ses conséquences qui dépendent de la vulnérabilité de l'ouvrage et donc, sont humaines.

Mais malheureusement, la persistance de l'irrationnel entraîne que l'on attribue toujours plus ou moins à la fatalité un accident géotechnique ; les décideurs impliqués dans un tel accident n'en étaient pas mécontents, car la fatalité leur maintenait ouverte une porte de sortie peu honorable mais sûre ; en effet, son équivalent juridique, le cas fortuit et de force majeure empêche l'exécution d'une obligation et donc libère l'obligé : il n'y a pas de responsable. Cela est en train de changer.

3.1.1.2 Le hasard

Au sens commun, le hasard est la cause inconnue voire imaginaire parfois minime mais aux effets considérables d'un éventuel événement intempetif, soudain, fortuit, imprévu et/ou inexplicable ; il traduirait notre méconnaissance du passé et l'imprévisibilité de l'avenir, et concrétiserait donc les limites de notre entendement. Plus précisément, il serait la cause de ce qui arrive sans raison apparente ou explicable, sans pouvoir être empêché ou prévu, généralement à la suite d'un concours de circonstances inattendues, à la fin d'un processus produisant un événement qui aurait pu ne pas advenir.

Le hasard ne saurait être le seul facteur de l'évolution du monde, car alors aucun principe ne pourrait s'en dégager et par conséquent, elle ne serait pas compréhensible ; cela aurait pour corollaire la vanité et même l'inexistence de la science qui explique à peu près bien la plupart des phénomènes naturels et permet de prévoir en gros leurs évolutions ; mais si le hasard seul conduit au désordre total, à l'imprévision absolue, le déterminisme ne conduit à rien : avec lui tout est figé, il ne se crée rien, il ne se passe rien mais on peut tout prévoir, ce que l'expérience infirme ; aussi, pour expliquer le déroulement des phénomènes naturels, l'évolution, on associe le hasard, la contingence, à la nécessité, la contrainte ; on peut y ajouter les circonstances et sans doute bien d'autres choses que l'on connaît mal ou que l'on ignore ; *le hasard et la nécessité* sont donc les éléments déterminants et complémentaires de l'évolution : le hasard peut plus ou moins en modifier le cours, mais la nécessité l'empêche de faire n'importe quoi. Sous le double aspect de l'aléa empirique et de la probabilité mathématique, le hasard exprimerait alors notre incapacité de prévoir les détails

du déroulement contraint d'un phénomène complexe connu, au cours duquel tout n'est pas possible.

On pourrait ainsi expliquer les graves conséquences inattendues d'un événement fortuit, sans relation avec la cause supposée, d'un événement de type connu, mais brutal et exceptionnellement intense, du violent effet d'une faible cause aux effets habituellement anodins, d'une exceptionnelle concordance de phases lors d'évolutions habituellement déphasées de phénomènes contemporains mais indépendants... Aucun événement naturel n'a qu'une seule cause strictement déterminée ; s'il y en a plusieurs et s'il en manque une, différente à chaque fois, ou si l'une d'elles n'est pas rigoureusement invariable, l'événement ne se produit jamais de la même façon, régulièrement, et son effet n'est jamais le même : il semble ressortir au hasard ; il en va de même du résultat incompréhensible de l'exploitation statistique d'une longue série d'observations temporelles ou de mesures incohérentes.

La méconnaissance des propriétés de certains éléments d'un ensemble en cours d'évolution ou celle d'éléments qui pourraient avoir certaines propriétés peut conduire à des interprétations hasardeuses ; de même, la modification ou le changement d'un élément *a priori* pas nécessairement influent peut transformer l'ensemble et/ou le faire évoluer de façon importante et imprévue, et donc hasardeuse. Le hasard traduirait alors le plafond de notre connaissance ou, pour être plus optimiste, l'état actuel de notre documentation et de notre capacité d'investigation et de compréhension.

En logique déterministe, on pourrait plus simplement le définir comme l'impossibilité de prévoir l'effet d'une cause.

Le hasard mathématique résulte de la rencontre d'au moins deux séries causales indépendantes ; il ressortit aux théories des grands nombres et du chaos ; on peut le quantifier par le calcul des probabilités et le mesurer par l'entropie statistique du système concerné ; les phénomènes purement hasardeux sont alors ceux qui évoluent sans orientation particulière avec la même probabilité dans toutes les directions, ou avec une probabilité globale égale à 0. Ce hasard calculable, nécessairement fondé sur de longues séries d'observations, ne concerne donc que les événements dont l'éventualité logiquement définie et attendue dépend de situations plus ou moins simples et connues.

Ainsi en schématisant, on pourrait dire que le hasard résulte, à parts à peu près égales, de notre seuil d'ignorance et de l'indétermination des détails de l'évolution du phénomène en cause ; en intervenant dans cette évolution comme un facteur externe, il change certaines conditions, ce qui en modifie le cours sans toutefois pouvoir transgresser les limites de ses propres contraintes ; le hasard serait donc un élément non négligeable d'un accident géotechnique à l'origine duquel il y a toujours l'évolution d'un phénomène naturel, de sorte que pour l'éviter, le niveau de nos connaissances générale et spécifique serait décisif ; si besoin en était, cela justifierait l'approche exclusivement scientifique des études géotechniques qui seules, permettent d'apprivoiser ce hasard équivoque.

3.1.2 La science

Les formes et les comportements naturels sont assez caractéristiques pour que l'on puisse les distinguer, les étudier et les comprendre rationnellement afin de les expliquer et de prévoir leur évolution en bâtissant des théories ; ce sont les objets et les buts de la science.

La nature n'est ni hasardeuse ni chaotique ; si elle l'était, la science n'existerait pas. Mais la nature est extrêmement diverse, complexe et évolutive : la démarche scientifique serait inextricable et ses résultats incompréhensibles si l'on devait tenir compte de tout, en tous lieux et toutes circonstances. On la simplifie donc au cas par cas en schématisant la diversité du réel au moyen de catégories permettant d'ordonner les données en niveaux d'espace et de temps selon leurs affinités, et sa complexité au moyen de modèles génériques dans lesquels on néglige ce qui ne paraît pas indispensable à l'étude ; on ignore l'histoire, on généralise l'espace et le temps : on passe de la complexité à la complication en transformant d'innombrables variables en quelques paramètres, en fait pour les plus mathématisés en réduisant autant que possible la forme d'un modèle à un seul paramètre et son comportement à une loi globalisée, simple, susceptible de rendre compte d'un grand nombre de phénomènes génériques ; mais pour que ces modèles ne soient pas que des constructions intellectuelles et puisque *les exceptions confirment la règle*, ou du moins la précisent en montrant ses limites, on ne doit pas les négliger, voire les escamoter, les ignorer ou même les nier si elles sont gênantes : la science est une méthode utilisant les moyens matériels et intellectuels dont nous disposons à un moment donné pour accroître notre savoir et améliorer notre comportement par la connaissance rationnelle du réel : nous en obtenons des *vérités relatives* et provisoires, rarement la certitude.

Dans tous les ordres de la connaissance et plus particulièrement en géotechnique, la démarche scientifique est un moyen de la prospective, de l'étude des faits et de la recherche des causes en vue de la prévision ; plus ou moins efficace selon le cas, elle est l'expression d'une connaissance du moment, qui n'est pas celle d'hier et ne sera pas celle de demain ; essentiellement expérimentale, elle est probabiliste : elle permet temporairement de décrire de façon plus ou moins fidèle, l'état apparent d'une réalité complexe et changeante et de prévoir plus ou moins son évolution. Elle va de l'observation d'événements passés et/ou présents aux hypothèses puis à la théorie et enfin au fait, en passant par l'expérience ; ainsi, l'expérience dont on fait généralement l'élément déterminant de la démarche scientifique, n'est qu'un moyen de contrôler et/ou de valider une hypothèse, pas de l'inventer ; elle est nécessaire à la démarche mais ne lui est pas suffisante.

Entreprise pour résoudre un problème, cette démarche consiste à identifier le phénomène influent, à l'isoler, à collecter de façon d'abord empirique puis systématique, des données spécifiques au moyen d'observations et d'expériences cohérentes, structurées et reproductibles, et après les avoir ordonnées, classées et étudiées, à bâtir des hypothèses plausibles éventuellement antagonistes, à les mettre à l'épreuve et à en débattre ; on retient celle qui rend le mieux compte du plus grand nombre de résultats d'observations et/

ou d'expérience pour aboutir à une théorie vérifiable ou plutôt non réfutable, validée, permettant de les comprendre et de les exploiter.

Au cas par cas, on procède d'abord par induction, de l'effet à la cause, de l'événement au comportement, du particulier au général, par l'observation et l'expérience. Source d'axiomes et d'hypothèses mais non de théories, l'induction fait progresser le savoir en suscitant de nouvelles conceptions par l'invention ; mais en inventant, on peut se tromper : la validation de la nouveauté exige la preuve, sinon la généralisation abusive guette. L'observation est à la base de l'étude des phénomènes naturels, car leurs événements caractéristiques sont des faits uniques et très complexes que l'on ne peut reproduire ni sur le terrain, ni au laboratoire ; ainsi, l'expérimentation classique de validation est rarement possible en géotechnique ; en dehors des essais de laboratoire et/ou *in situ* qui ne sont pas à l'échelle des problèmes réels et ne portent que sur des mesures de paramètres dans des conditions artificielles de portée pratique très limitée, les seules expériences géotechniques disponibles sont les dommages aux ouvrages, des expériences ratées qui marquent les limites de notre connaissance et/ou de notre savoir-faire (cf. 1.1).

On ne peut plus observer les événements passés dommageables et on n'a pas su les prévoir ; néanmoins, s'ils sont clairement attestés par l'observation de leurs effets persistants ou par la documentation, ils demeurent des réalités et constituent donc des références ; on peut alors les expliquer et même les quantifier, mais on ne peut pas les répéter pour contrôler la pertinence de l'explication ; d'autre part, on ne peut pratiquement jamais retenir un seul événement, faire une seule observation ou imaginer une seule expérience directe ou indirecte dont l'interprétation ait une portée générale indiscutable, et valide une théorie et/ou une loi ; et enfin, rien ne permet d'affirmer qu'au cours d'une série de données ou de résultats analogues, on n'en obtiendra pas qui seront différents et marqueront ainsi un changement de tendance invalidant une hypothèse : l'induction est donc une forme de raisonnement insuffisante en géotechnique, mais parce qu'elle lui est néanmoins indispensable, il faut toujours l'utiliser avec prudence : la relation causale est une supposition initiale qu'il faudra confirmer. L'étude d'un cas peut rarement être généralisée ; certains cas se ressemblent mais ne sont jamais identiques, et une série d'événements analogues n'est jamais stable ; un modèle spécifique ne peut pas être utilisé pour résoudre tous les problèmes d'une même catégorie, mais permet de parvenir à des solutions de principe. Dans les cas simples, la déduction permet ensuite de passer du général au particulier, de la cause à l'effet, en discutant des hypothèses, jeux conjecturaux d'effets/causes interprétant plus ou moins bien les observations et les résultats d'expériences ; strictement limitée à ce qui est déjà acquis, elle ne suscite rien de nouveau ; on peut ainsi valider une théorie, enchaînement logique de règles interdépendantes, les lois, combinant les données disponibles dans les modèles de forme et de comportement d'un certain phénomène ; un modèle généralement mathématisé permet ainsi de résoudre des problèmes analogues, mais les solutions ne sont que des ordres de grandeur ; elles doivent être critiquées et précisées. Dans les cas compliqués difficiles à théoriser simplement, le recours à la statistique sur une série de données brutes est indispensable mais alors le résultat ne sera qu'une probabilité qu'il faudra estimer.

On accroît ses connaissances à mesure que la base des données d'observation et d'expérience augmente et que la compréhension se précise ; en principe, on peut ainsi améliorer une théorie jusqu'à passer à une autre que l'on espère plus efficace, mais pas toujours : à l'usage, on constate souvent que la théorie n'est plus satisfaisante en pratique. C'est parfois qu'un fait nouveau prend la théorie en défaut, que des données nouvelles n'entrent pas dans la base, ce qui conduit à la réfuter ; ce peut être plus généralement qu'à la suite d'un progrès technique, la qualité des résultats que l'on en obtient n'est plus satisfaisante. Selon le cas, la théorie doit alors être totalement ou partiellement abandonnée ou bien être simplement précisée ; il s'agit de processus normaux de la démarche scientifique, jamais régulière, rarement méthodique et toujours difficile. Mais il en est d'autres qui ne le sont pas ; parmi eux, les plus fréquents sont l'utilisation d'une théorie existante pour utiliser des données qui n'ont que de très lointains rapports avec celles sur lesquelles elle a été fondée, la généralisation abusive d'une théorie restreinte et la juxtaposition artificielle de théories restreintes plus ou moins incompatibles dans un ensemble dont la cohérence apparente est obtenue au moyen de nombreuses restrictions qui sont rarement justifiées...

Cela n'est jamais très satisfaisant. Pour rétablir un semblant de cohérence, on peut d'abord trier les données en sélectionnant celles que la théorie explique et rejeter les autres et/ou déformer les faits pour les rendre explicables ; parce que *les faits sont têtus*, cette démarche permet seulement de prolonger la vie de la théorie dépassée pour le temps nécessaire à l'adhésion de la plupart des spécialistes. On peut ensuite proposer une théorie partielle, ce qui est légitime si l'on n'essaie pas de la justifier à tout prix par la théorie générale en déformant plus ou moins l'une ou l'autre ; à terme, elle conduit évidemment à accroître l'incohérence que l'on voulait préserver. On peut enfin critiquer la théorie d'abord en elle-même puis par rapport aux faits, afin d'en définir la valeur et les limites pour bâtir un système qui soit cohérent sans être nécessairement unitaire ; cette démarche peut être permanente de sorte que le système peut évoluer sans heurt et sans contradiction en même temps que la pratique. À la fin, cela pourrait conduire à proposer une nouvelle théorie unitaire ; mais quand on sait que les théories unitaires, si parfaites apparaissent-elles quand elles sont formulées, finissent toujours par être remises en question, on peut se demander s'il est bien nécessaire d'en produire : en géomécanique, les lois fondamentales de Hooke, de Coulomb et de Darcy, les théories de Terzaghi, Ménard... (Fig. 3.1) ne s'appliquent qu'à des comportements limités à une partie linéaire, spécifiques de milieux réduits à un ou deux paramètres, différents dans chaque cas ; elles peuvent être prudemment juxtaposées avec plus ou moins de difficultés, mais pas synthétisées par une théorie unitaire.

Confrontée à la diversité, à la complexité et à la durée des phénomènes naturels et selon notre niveau de perception du monde, c'est-à-dire selon nos connaissances et nos moyens du moment, la démarche géotechnique procède par paliers, au moyen de changements d'échelles d'espace et de temps, et de progrès de conception ; elle consiste d'abord à dénommer, classer et cataloguer les phénomènes, ensuite à en retracer le cours s'ils sont durables, continus et indivisibles : *érosion*..., ou à les ranger et répertorier en catégories génériques s'ils sont brefs et faciles à distinguer clairement et définitivement : *mouvements de pente*... ; elle les réduit ensuite à des systèmes complexes, c'est-à-dire

composés d'éléments schématiques plus ou moins liés, tels que si l'un manque ou est altéré, l'ensemble est dénaturé : *glissements*... ; enfin, elle transforme souvent certains d'entre eux en modèles apparemment simples, mais dont l'élaboration a été en fait très compliquée, pour ne pas dire confuse, embrouillée, difficile à comprendre, généralement afin de leur faire subir un traitement mathématique qui exige qu'on les schématise à l'excès : *glissement « rotationnel »*... ; le milieu compliqué décrit par quelques paramètres constants, cohésion, angle de frottement... liés par des relations formelles, loi de Coulomb, méthode de Fellenius... (Fig. 1.3.1.4) y est substitué au matériau naturel complexe qui implique un nombre inconnu d'éléments plus ou moins variables, dont les liens sont plus ou moins inextricables. Devenus des abstractions déterministes, ces modèles décrivent rarement une réalité trop complexe, de sorte que leur capacité prospective est limitée, voire illusoire, mais leur utilité didactique et pratique est réelle.

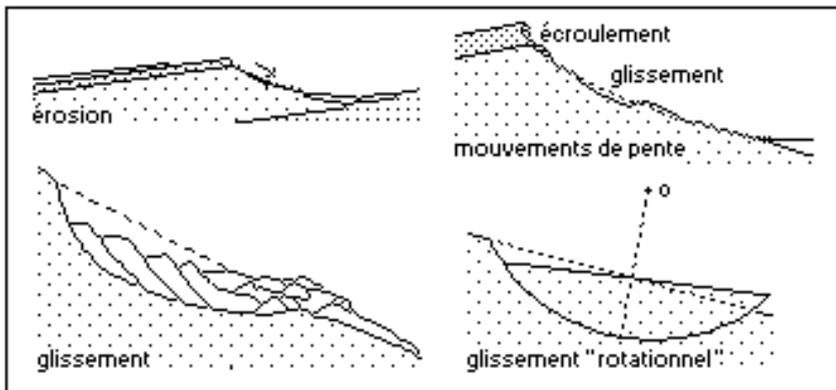


Figure 3.1.2 – Changements d'échelles

L'évolution d'un système dépend du nombre de degrés de liberté dont il bénéficie ; elle paraît simple et déterminée pour un degré, modérément complexe et probabiliste pour deux, de plus en plus complexe et finalement chaotique à partir de trois. Elle peut être modélisée par une fonction linéaire, périodique permanente ou amortie... ; un système simple, stationnaire ou qui se comporte à peu près de la même façon au cours d'un laps de temps assez long – déterministe – peut être figuré par une constante, une fonction biunivoque ou monopériodique ; un système modérément complexe qui évolue rapidement d'un état à un autre modérément différent – probabiliste – peut être figuré par une fonction à deux ou trois périodes ; un système très complexe qui évolue lentement d'un état à un autre radicalement différent et inattendu – chaotique – peut être figuré par une fonction à plus de trois périodes dont l'analyse est inextricable. Mais pratiquement aucun phénomène naturel n'est périodique au sens mathématique et on ne peut traiter ainsi qu'une évolution de courte durée, plus ou moins schématisée autant que possible linéairement, dont l'extrapolation à long terme est presque toujours hasardeuse ; en fait, l'évolution de tout

système physique non linéaire ou non périodique est plus ou moins imprévisible.

Toute démarche doit être structurée pour réussir ; privilégiant les expériences de laboratoire, les quantifications, les manipulations de modèles qui réduisent le réel à quelques paramètres synthétiques, et les preuves mathématiques, la démarche géotechnique actuelle se cantonne à la relation déterministe une cause/un effet, invariable dans l'espace et dans le temps, qui débouche sur une illusoire prédiction ; ignorant le doute, elle prétend atteindre la vérité absolue, la certitude, en oubliant la forme et l'histoire comme si tous les événements se produisaient à volonté n'importe où, n'importe quand et n'importe comment, et en négligeant l'évolution.

3.1.2.1 Réductionnisme ou holisme ?

La résistance d'une chaîne est au plus égale à celle de son maillon le plus faible et la probabilité de défaillance de la chaîne dans des circonstances données est égale au produit des probabilités de défaillance de chacun de ses maillons, semblables mais jamais identiques ; il importe donc de bien caractériser chaque maillon pour pouvoir étudier le comportement de la chaîne quand on l'utilisera. Cette façon pragmatique et efficace de raisonner qui, pour l'étudier, décompose un système en ses éléments considérés comme fondamentaux, est dite réductionniste : l'ensemble est constitué d'éléments indépendants, constitués eux-mêmes d'éléments... ; à chaque niveau, la description et l'étude de chaque élément permettent de décrire, étudier et comprendre le comportement de l'ensemble réduit en dernier ressort à un système de lois « naturelles », universelles, invariables dans l'espace et dans le temps, indépendantes de l'histoire ; c'est en fait la démarche scientifique qui résout la complexité par l'analyse et la modélise par la synthèse. Elle diffère de la démarche systémique qu'adopte le holisme, pour l'étude des systèmes complexes : le tout ($\tau\acute{o}$ $\delta\lambda\omicron\nu\nu$) est plus que la partie, l'ensemble est fondamental ; ce n'est pas un simple assemblage d'éléments indépendants auxquels il se réduirait ; il prévaut sur eux ; on ne peut les appréhender qu'à travers lui. Réciproquement, en assemblant des éléments indépendants, on obtient généralement des ensembles originaux qui peuvent avoir des propriétés et des comportements imprévus. L'approche holistique est globale, synthétique dès le départ, en se référant plus ou moins à propos à la théorie du chaos ; le réductionnisme serait ainsi totalement dépassé, à peine bon à l'étude des systèmes simples, strictement déterministes. Cette approche est sans doute en grande partie adaptée à l'étude de la plupart des phénomènes naturels complexes. Elle ne paraît pas l'être exclusivement à celle de systèmes matériels susceptibles de modéliser efficacement les objets et les comportements géotechniques. La méthode de l'analyse et de la synthèse a au moins l'avantage de la clarté d'exposition et de compréhension ; elle utilise un langage usuel et permet dans la plupart des cas, d'expliquer simplement pourquoi on pense que ceci pourrait être plus ou moins la cause de cela ; cela n'implique évidemment pas d'oublier la complexité du réel et donc de négliger certains aspects de la démarche holistique : la géotechnique examine en premier lieu et indépendamment le site et l'ouvrage, mais finalement considère indissociablement l'ensemble site/ouvrage.

3.1.2.2 Le déterminisme

Le but implicite de la science est la prédiction : par la mécanique rationnelle, la plus mathématisée des sciences physiques, quand on connaît à un instant donné, l'état d'un système, on peut déterminer son état à tout autre instant ; ce mécanisme universel pour lequel l'expression d'une loi ne dépend pas de son référentiel en mouvement rectiligne et uniforme, a conduit à considérer que le déterminisme est l'expression parfaite de la science. Depuis, même si cette confusion subsiste plus ou moins, on s'est rendu compte que ce n'est pas si simple : les lois « naturelles » sont des métaphores de théories humaines ; la plupart ne sont acceptables que dans de petits intervalles linéaires de définition, quand l'effet est à peu près proportionnel à la cause et si l'on connaît bien la situation initiale, c'est-à-dire dans un court laps de temps après l'instant initial : la validité des observations, des expériences et des théories scientifiques est limitée dans l'espace et dans le temps ; la science ne peut donc pas reproduire la nature ; elle n'en donne que des modèles plus ou moins fidèles et c'est sur eux que l'on travaille.

Métaphores d'un monde simple, bien réglé mais imaginaire, le calcul de l'école primaire, la physique du lycée et même un peu celle du Supérieur, sont exclusivement déterministes ; les problèmes élémentaires de trains, de réservoirs et ceux, plus compliqués, des examens et des concours, de très nombreuses expériences de travaux pratiques, parfaitement reproductibles n'importe où, n'importe quand et par n'importe qui, montrent en effet que, selon ce que laisse prévoir une formule biunivoque, règle de trois plus ou moins alambiquée, tout fait a une seule et même cause qui produit toujours le même effet dans le même laps de temps. La physique élémentaire ressortit donc à ce déterminisme mécanique qui permet de prédire le comportement d'un système simple, si l'on connaît son état initial et la causalité du phénomène simple qui s'y produit ; il faut pour cela connaître précisément l'état initial du système, la nature et les dimensions des forces qui s'exercent sur lui et la loi intégrale ou différentielle du mouvement : par le calcul infinitésimal, au moyen de contraintes et circonstances schématiques, les conditions aux limites, on peut obtenir plus ou moins facilement, des formules bien adaptées à fournir des solutions uniques à des problèmes simples, en plus ou moins de temps, en n'utilisant que du papier et un crayon, et l'informatique n'a pas changé grand-chose à cela. Mais ce déterminisme, science du nécessaire, fondé sur la déduction, ne permet ni d'acquérir de nouvelles connaissances ni d'étudier ce qui n'est pas connu ; il permet seulement d'effectuer des études virtuelles, des manipulations théoriques de systèmes simples au moyen de calculs sur des valeurs données ou mesurées de paramètres synthétiques ; il n'est donc pas adapté à l'étude des phénomènes naturels qui ne sont jamais simples et bien connus.

Pourtant, on prétend souvent pouvoir atteindre la prédiction au moyen d'un ordinateur tellement puissant qu'il manipulerait en un rien de temps, un énorme système d'équations qui permettrait de traiter une quantité phénoménale de séries quasi-infinies de données ; en fin de compte, de calculs, on devrait toujours se transformer en prévisionniste pour en extraire des résultats qui ne seraient donc que des estimations subjectives.

Le déterminisme est donc un concept humain, une abstraction, fruit de la schématisation nécessaire aux mathématiques appliquées à la macrophysique : le

comportement d'un système est régi par une relation stricte de cause à effet : tout effet a une cause ; la cause est antérieure à l'effet ; les mêmes causes produisent rigoureusement les mêmes effets. Ce déterminisme mathématique déductif qui permet la prédiction est très utile en ce qu'il paraît presque toujours conduire aux valeurs moyennes des grandeurs physiques correspondantes ; si l'on ajoute à la définition mathématique du déterminisme la variabilité des conditions initiales, on passe à un déterminisme que l'on peut qualifier de physique et qui ne permet que la prévision ; mais en les confondant puis en les assimilant à un déterminisme naturel, concret, contraignant qui n'existe pas, on amalgame imprudemment les comportements d'un système, d'un modèle et de la nature : la précision mathématique est absolue car elle concerne des objets idéaux et exacts, des systèmes sur lesquels on raisonne et on calcule ; la précision physique est relative car elle concerne des artefacts plus ou moins bien construits sur lesquels on expérimente ; la précision naturelle est subjective car elle concerne la réalité que l'on observe ; au zéro mathématique correspond le presque rien physique et l'à-peu-près naturel ; les résultats successifs d'un même calcul sont toujours strictement identiques alors que ceux d'une même expérience sont semblables et que ceux d'une même observation sont plus ou moins analogues. En pratique, pour sauvegarder le déterminisme selon lequel les expériences sont rigoureusement reproductibles, les conditions expérimentales adoptées doivent être stables ou du moins peu sensibles aux effets de petites variations, afin qu'à la précision des mesures près, n'importe qui obtienne toujours n'importe où et n'importe quand le même résultat ; ce n'est pas le cas pour les essais géotechniques.

Le comportement simple d'un système simple, éventuellement strictement périodique, réduit à un seul paramètre est donc déterministe ; la cause unique a toujours, inévitablement, invariablement et nécessairement un effet unique, toujours le même, exactement prévisible ; le présent découle strictement du passé et contraint aussi strictement l'avenir ; en schématisant quelque peu, on pourrait donc dire que le temps déterministe est réduit au présent ; le déterminisme serait donc la nécessité sans le hasard, la prédiction assurée..., une belle vue de l'esprit donc !

3.1.2.3 La probabilité

Au sens commun, la probabilité est la qualité de ce qui est possible et même vraisemblable ; c'est le caractère d'un événement préoccupant, susceptible de se produire dans peu de temps... Au sens scientifique, elle est l'objet de la théorie ou loi des grands nombres, du théorème de Bernouilli et du calcul des probabilités : dans un système complexe, dont l'évolution a l'air d'un ensemble désordonné d'innombrables événements apparemment dissemblables, la probabilité mesure la fréquence de ceux auxquels on s'intéresse, dont la production est possible mais incertaine, fortuite, imprévisible sans être hasardeuse et dont on veut évaluer numériquement les chances de se produire, étant entendu que ce que l'on en retient actuellement ne sera pas contredit à mesure que progressera l'étude du phénomène en cause ; on peut alors définir la probabilité comme la limite de la fréquence de réalisation d'un événement lorsque le nombre des observations et/ou des essais dont il est l'objet croît de plus en plus. La prévision est donc une expression de la probabilité ; elle doit s'appuyer sur une

série de données sûres, nombreuses et homogènes ; comme ce n'est pas toujours le cas, elle peut être douteuse ou même se révéler fausse.

La probabilité peut s'exprimer numériquement : dans une série homogène et pour des conditions arrêtées, c'est le rapport du nombre de cas susceptibles de se produire, à celui de tous les cas possibles ; elle vaut 0 pour l'impossibilité, le hasard, l'inconnu, et 1 pour la certitude, le déterminisme, la prédiction ; entre 0 et 1, l'événement est plus ou moins prévisible. La valeur de ce rapport traduit le niveau de notre confiance dans la réalisation de l'événement.

Pour calculer cette probabilité, il suffit d'avoir décrit l'événement type, de pouvoir l'identifier, de savoir comment et en quelles circonstances il survient, et d'observer de façon plus ou moins continue durant un plus ou moins long laps de temps pour obtenir une série temporelle homogène et nombreuse ; mais il n'est pas nécessaire d'avoir décortiqué scientifiquement le phénomène qui le produit. Pour que ce calcul soit licite, il faut que l'événement appartienne à un ensemble homogène, qu'il soit fixé, strictement reproduit au cours d'épreuves définies, et que l'on ait pu en observer un grand nombre au cours de ces épreuves.

À partir de la valeur de la probabilité, on peut estimer l'éventualité qu'a un événement observé ou rapporté dans le passé, d'intensité variable dans le temps, de se produire ou non dans l'avenir, au cours d'un laps de temps donné, avec une intensité donnée. Par convention, on dit que l'intensité est décennale si la probabilité de réalisation est de 0,1, centennale si elle est de 0,01 et millennale si elle est de 0,001 et on représente cela par une droite en coordonnées semi-logarithmiques.

L'intensité d'un événement seulement probable s'exprime par une loi de répartition comme celle de Gauss ; si elle se répartit selon une classique courbe en cloche, ce qui est rarement le cas pour un phénomène naturel, elle est dite normale, c'est-à-dire purement aléatoire.

La statistique est la science qui a pour objet le décompte en séries d'événements que l'on rapproche sans les identifier, dont on ignore plus ou moins les causes et conditions spécifiques.

Elle permet d'étudier pratiquement des séquences d'événements soit complexes, semblables et mal connus, soit apparemment simples et déterminés, au moyen de longues séries d'observations et d'expériences converties en données numériques, mal comprises parce que dépendant de trop nombreux facteurs inconnus ou incontrôlés. Elle est donc tributaire de l'histoire et se réfère au passé immédiat.

Fondée sur l'induction, la statistique est l'application de la loi des grands nombres ; expression du contingent, la probabilité permet de caractériser globalement un vaste ensemble sans entrer dans les détails : en principe, on échantillonne au hasard, c'est-à-dire sans préparation ni tri, une partie de l'ensemble ; on étudie une certaine particularité de l'échantillon ramené à une longue série homogène de données numériques ; on extrapole les résultats de cette étude à l'ensemble, ce qui permet d'estimer la probabilité d'y observer la particularité. Pratiquement, le décompte d'événements complexes semblables que l'on rapproche sans les identifier, dont on ignore plus ou moins les causes et conditions spécifiques, permet de les structurer afin d'obtenir des indications

probables sur l'ensemble auquel ils pourraient appartenir : à partir d'une série temporelle homogène et nombreuse d'événements survenus dans le passé, analogues mais d'intensité variable dans le temps, dans des conditions données et en admettant que l'avenir ressemblera au passé, si l'on a très souvent constaté que des événements analogues de type B accompagnaient ou suivaient plus ou moins des événements analogues de type A, il est d'autant plus probable que $B' \approx B$ se produise si $A' \approx A$ se produit, que le nombre de constatations a été plus élevé, mais rien ne dit que cela persistera ou même arrivera. Sans tenir compte de cette dernière indétermination qui ruinerait tout l'édifice, des événements individuellement indéterminés seraient ainsi globalement déterminés par les lois de la probabilité et de la répartition, et ces lois structureraient des ensembles hasardeux d'événements déterminés en exprimant une hypothétique organisation latente ; pour cela, il paraît toutefois nécessaire que les laps de temps qui séparent A de B et A' de B' ne soient pas trop grands (Fig. 3.1.2.5) .

3.1.2.4 La semi-probabilité

Pour le calcul des structures d'ouvrages, le déterminisme est par expérience trop impératif et la probabilité est pratiquement inutilisable ; on prétend les combiner (?) dans le calcul aux états limites que l'on dit curieusement « semi-probabiliste », alors qu'il est déterministe puisque dans un cas donné, les valeurs de l'ELU (état limite ultime) et de l'ELS (état limite de service) sont obtenus au moyen de formules plus ou moins alambiquées qui combinent numériquement des « situations » (de l'ouvrage) – en cours de travaux, après la réception... – et des « actions » (extérieures) – permanentes, variables, accidentelles – dûment codifiées, réduites à des valeurs de paramètres extraites de tableaux à doubles entrées et de données ou plutôt d'estimations spécifiques. En géomécanique, on peut à la rigueur estimer ainsi la pression de service et la pression ultime d'une fondation ; mais un calcul géomécanique ne produit que des ordres de grandeur et la précision d'un résultat géotechnique dépend aussi d'autres facteurs (cf. 5.2.3.6 et 5.6.3.2).

3.1.2.5 Les ensembles flous

Si les données dont on dispose à propos d'événements naturels sont peu nombreuses, disparates, hétérogènes, imprécises voire incertaines, elles ne constituent pas une série statistique acceptable ; c'est le cas quasi général en géotechnique avec laquelle il n'est pas possible d'évaluer la très faible probabilité d'événements rares mais possibles.

La méthode des ensembles flous permet d'avoir une idée de la possibilité de réalisation de tels événements et d'estimer graphiquement leur prob ; très succinctement, on repère dans la série imparfaite dont on dispose les événements que l'on considère comme certains, d'intensité comprise entre deux valeurs moyennes observées I_2 et I_3 , dont la probabilité est estimée à 1, et ceux que l'on considère comme impossibles, d'intensité jamais observée, inférieure à I_1 et supérieure à I_4 dont la probabilité est estimée à 0 ; les événements dont l'intensité est comprise entre I_1 et I_2 ou entre I_3 et I_4 sont possibles ; au départ, il faut donc disposer d'une série d'au moins quatre valeurs que l'on pourra

compléter par la suite pour affiner le résultat. La réalisation d'un événement attendu d'intensité dangereuse I_0 sera probable (prob 1) si $I_2 < I_0 < I_3$, possible (prob n , $0 < n < 1$) si $I_3 < I_0 < I_4$, pratiquement impossible (prob 0) si $I_4 < I_0$.

3.1.2.6 Le chaos

Un phénomène complexe dont la forme et le comportement sont stochastiques, aléatoires, hasardeux, irréguliers... et qui donc paraissent « anormaux », est dit chaotique ; c'est le cas de tous les phénomènes naturels qui ne se comportent pas comme les modèles qui sont censés les représenter. En fait, ce ne sont pas les objets et/ou les phénomènes naturels qui sont chaotiques, mais les systèmes que nous imaginons pour les modéliser ; ces systèmes sont dits dynamiques non linéaires ; sur la base des lois de la physique, l'évolution d'un tel système est parfaitement déterminée mais elle aboutit à des états tellement différents selon les conditions initiales, que nous ne comprendrions pas très bien ce qui les rapproche si nous ignorons la technique et l'enchaînement des observations ou des calculs : dans un court laps de temps après l'instant initial d'une observation mesurable, tant qu'il semble linéaire, le comportement d'un tel système dont on connaît bien la situation initiale paraît déterministe ; son état est à peu près stationnaire et l'effet à peu près proportionnel à la cause est donc prédictible. Mais à mesure que la durée d'observation ou de calcul augmente, son comportement se complique de plus en plus et son évolution devient d'abord de moins en moins prévisible puis, au bout d'un certain laps de temps, de plus en plus aléatoire : la fin n'est pas prédictible même si le début est déterministe ; en fait, ces état et comportement ne sont pas si désordonnés que cela, du moins au début d'un processus ; mais ils sont instables, sensibles aux conditions initiales et à la durée du processus ; on ne peut plus les prévoir au-delà d'un certain laps de temps caractéristique du système.

En informatique, on constate facilement que si l'on modifie un peu l'état initial d'un modèle complexe en simulant son comportement, deux séances identiques de calculs comportant généralement de nombreuses itérations vont aboutir à des résultats totalement différents au bout d'un laps de temps plus ou moins long, selon le système en cause et le volume des calculs à effectuer ; les longues séances de calcul accumulent et amplifient les effets de petites imperfections inévitables, forme du modèle et conditions aux limites schématiques, formules approximatives, écarts d'arrondis, de traduction des codes internes... De plus, le même logiciel tournant sur des machines différentes ou des logiciels différents faisant la même chose sur la même machine donnent toujours des résultats plus ou moins différents. Néanmoins, l'exploitation statistique de résultats obtenus à partir de telles simulations, est généralement fructueuse en ce qu'elle permet de discerner les tendances évolutives et le seuil de prédiction au-delà duquel la dérive est excessive. Plus le taux de croissance de cette dérive est petit, plus la dérive est lente ; s'il est >1 , la dérive est exponentielle ; s'il est ≤ 1 , le système n'est pas chaotique ; le problème est de déterminer ce taux dans un cas donné. Toutefois, même si l'on ajoute à ses contraintes internes, des contraintes externes qu'exerce sur lui son environnement, un système complexe au comportement chaotique ne peut pas faire n'importe quoi selon n'importe quelles circonstances : son image spatio-temporelle évolue dans un domaine aux limites

floues mais définies ; on ne sait jamais exactement où elle se trouvera dans le domaine, mais on est sûr qu'elle n'en sortira pas.

Le temps caractéristique T d'un système chaotique est la durée au bout de laquelle l'intensité du phénomène en cause est multipliée par une constante quelconque que l'on choisit souvent égale à 10 par commodité de calcul : avec 10, pour un glissement de talus dont T serait estimé à environ 1 j, ce qui est peu, et dont la précision de repérage d'un jalon de surface serait d'environ 1 cm, l'incertitude topographique serait supérieure à 1 m au bout d'une dizaine de jours de déplacement du jalon ; elle serait très largement supérieure aux quelques millimètres que l'on constate habituellement en début de crise ; cela rendrait vaine toute observation de surveillance destinée à prévoir le moment où le glissement pourrait éventuellement se produire, et par là, toute prévision, si l'on ne prenait pas la précaution habituelle de multiplier les jalons, la fréquence des observations et aussi, d'utiliser plusieurs autres moyens de contrôle, photographie, inclinomètres, extensomètres, fissuromètres, piézomètres, sismographes... : la redondance est une technique qui permet de maîtriser une situation chaotique. Et si certains déplacements de jalons sont bien de l'ordre du mètre, il n'est plus question de prévision, mais de réalisation imminente ou en cours du glissement ; toutefois, reste toujours l'éventualité chaotique d'un renversement de tendance qui peut se produire au cours d'une phase apparemment exponentielle ; un tel renversement peut être rassurant quand on suit un phénomène dangereux ; mais rien ne dit qu'à plus long terme, un renversement inverse ne se produira pas : il est donc absolument nécessaire de continuer à l'étudier et à en suivre l'évolution.

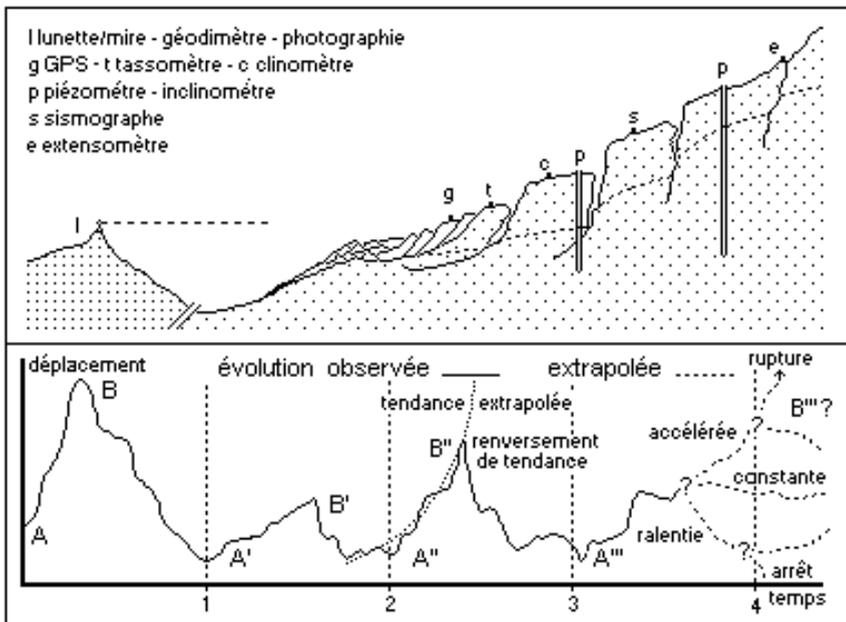


Figure 3.1.2.6 – Évolution d'un glissement de talus

Dans la plupart des cas réels, on ne sait pas déterminer T ; on sait seulement que l'imprécision du résultat final augmente d'autant plus vite que T est petit, que l'on ne s'aperçoit pas du fait que le système est chaotique si T est très grand, ce qui pourrait être la raison d'un certain déterminisme apparent du monde macroscopique, et que l'on ne peut pas savoir ce qui pourrait se passer au-delà de quelques T , car les divergences auxquelles on arriverait, n'auraient plus de sens pratique : le passé ne semblerait plus découler du présent ni l'avenir découler du présent.

Ainsi, même si nous connaissions parfaitement les lois « naturelles », nous ne pourrions pas prédire un événement naturel, car nous savons rarement situer ou même identifier les conditions initiales et les limites de sa production ; tous les événements naturels, même les plus insignifiants, ont une histoire dont l'origine se perd dans la nuit des temps et ont une influence dans un domaine dont on ignore la forme et le volume. Dans le temps sagittal, il n'existe donc pas d'états initiaux réels strictement identiques de phénomènes naturels, alors que l'on peut toujours en donner à leurs modèles. Ce qui sépare donc de façon totale le déterminisme de la réalité, c'est qu'avec elle, elles ne le sont jamais. Comme le hasard avec lequel on le confond volontiers, le chaos concrétise ainsi la limite de notre compréhension et de notre possibilité de connaissance, et confirme l'existence de bornes qui en fait, se révèlent toujours proches ; car enfin, comment se prononcer sur ce qui n'est pas encore ? On ne peut pas connaître ce qui est au-delà de notre expérience. Tout cela indique qu'il est peut-être vain d'accumuler des observations pour essayer d'accroître la précision d'un résultat lointain puisque à plus ou moins long terme, le système aura oublié son passé de sorte que son avenir ne sera pas déductible de son présent. Pour la plupart des phénomènes naturels et hors l'évolution des astres, les temps de retour d'événements remarquables comme les crues, les séismes... censés traduire des valeurs de prob, sont plus ou moins dénués de sens pratique, de simples points parmi ceux équidistants de 10 en 10 sur une abscisse logarithmique (*Fig. 3.2.1.2.2.2*) : la même crue décennale, en fait de prob 0,1, peut se produire trois ans de suite et ne plus se reproduire durant un siècle...

3.1.2.7 Les systèmes critiques auto-organisés

Un tas de sable, stable à pente limite, auquel on ajoute quelques grains, évolue peu à peu par petits glissements et coulées en demeurant dans cet état critique proche de la rupture ; si on augmente le débit de sable, il s'écroule brusquement ; sous sa nouvelle forme, il est alors superstable ; si on le réalimente, dès que la pente limite est de nouveau atteinte, il se comporte comme précédemment. Plus généralement, avant un événement qui provoque son changement d'état, un système évolutif est en équilibre instable ; après, il est en équilibre stable pour un laps de temps plus ou moins long au bout duquel il redevient instable... ; le changement d'état, de symétrie, est un passage de l'ordre au désordre traduit par un accroissement de l'entropie du système ; un tel système que l'on dit complexe adaptatif ou auto-organisé évolue d'un état à un autre en s'adaptant lui-même aux sollicitations extérieures ou à certaines phases de sa propre évolution. Il en va ainsi de la plupart des phénomènes

naturels dangereux, séismes, mouvements de terrain... qui ne le sont qu'à certains moments de leur évolution ; ils passent par des phases relativement durables de stabilité apparente et généralement rapides de perturbation : L'étude pratique d'un cas réel impose de décrire précisément le phénomène en cause, de déterminer la durée du « cycle » et la probabilité de réalisation de l'événement, ce qui est rarement simple, voire possible.

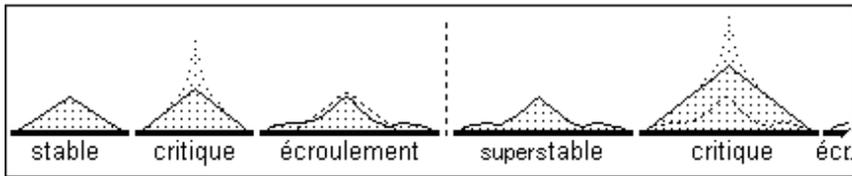


Figure 3.1.2.7 – Évolution d'un tas de sable

3.1.3 Logique géotechnique

Le problème fondamental de la géotechnique est de caractériser le phénomène en cause, de déterminer son évolution, la tournure et la probabilité de réalisation d'un éventuel événement redouté, la durée d'un « cycle » ou plutôt son temps de retour ; il est très difficile à résoudre, car les causes d'un événement sont extrêmement nombreuses. On y parvient généralement plus ou moins bien en ayant peu ou prou recours à tout ou partie de diverses méthodes de raisonnement et d'étude, selon les circonstances, le nombre et la qualité des données dont on dispose, le niveau de précision que l'on souhaite atteindre... À mesure que l'étude progresse des éléments à l'ensemble et donc se complique, l'analyse d'abord déterministe devient peu à peu probabiliste, pour éventuellement finir sur un peu de chaos ; par essence, la synthèse systématique est déterministe, mais il n'est pas interdit d'en faire une critique holistique.

Ainsi en géotechnique, les recours successifs au déterminisme, au probabilisme, au chaos et au holisme sont sinon toujours nécessaires, du moins utiles dans la plupart des cas. En principe, le déterminisme permet la modélisation mathématique et le probabilisme, la mise au point de scénarios à toutes les étapes des études de l'aléa, de la vulnérabilité, et éventuellement, de la gestion de crise et de l'assurance.

C'est donc en combinant judicieusement selon le cas, le déterminisme de la macrophysique, nécessaire à la compréhension et au calcul, l'approche chaotique de l'évolution d'un phénomène complexe pour préciser les limites spécifiques de ce déterminisme et le calcul des probabilités sur les résultats de simulations en faisant varier les conditions initiales, et si possible sur les données homogènes de longues séries d'observations, que l'on peut actuellement s'affranchir au mieux du hasard et pratiquer une prospective géotechnique efficace.

En géologie, le déterminisme prend la forme de l'uniformitarisme et le chaos, celle du catastrophisme. Selon l'uniformitarisme, les causes actuelles sont les mêmes que

les causes anciennes et ainsi le passé de la Terre peut s'expliquer par son présent ; il postule un monde en évolution graduelle, lente et continue, et même en quasi-équilibre permanent : depuis la naissance de la Terre, les mêmes phénomènes se produisent continûment, mais pas forcément toujours dans des conditions strictement identiques ; cela semble plus ou moins vrai à court terme, ce qui explique en partie son endurance ; selon l'actualisme qui en est l'aspect réducteur, les événements naturels se sont toujours produits de la même façon, avec la même intensité et au même rythme qu'actuellement ; avec eux, tout est simple, clair et ordonné sur la Terre : le passé explique le présent, ce qui est plus ou moins vrai, et l'avenir peut être strictement prévisible, ce qui est absolument faux.

À long terme, le catastrophisme paraît plus conforme à la réalité : des événements non répétitifs, rares et épisodiques du passé lointain, se seraient successivement produits lors de courtes périodes de crises extrêmement violentes, suivies de longues stases et/ou phases d'évolution lente, l'ensemble étant lissé par notre courte vue ; certains événements, au-delà des temps caractéristiques des phénomènes en cause quels qu'ils soient, se produiraient au cours de crises. Ainsi, le temps profond géologique est compartimenté, ce que traduit effectivement son découpage en ères, périodes, époques, étages... caractérisés par des événements fondateurs spécifiques, généralement rapides et épisodiques, début d'orogénèse, changements de types de sédimentation, de faunes... suivis de longues périodes de stases : la chronologie stratigraphique, tel étage est caractérisé par telle faune qui s'éteint en partie au passage à l'étage suivant, en découle directement. Il semble que l'évolution générale du système terrestre suive le même schéma : immensité des temps, contingence et unicité des événements... Le catastrophisme, évidemment non créationniste, correspond mieux à la conception actuelle de l'évolution de ce système ; avec lui, c'est plus compliqué : à première vue, tout paraît obscur et confus, le passé n'explique pas tout le présent, la prédiction est impossible et la prévision qui ressortit obligatoirement à la statistique, n'est pas assurée car les séries de données cohérentes nombreuses relatives aux événements naturels significatifs sont rares et parce que l'évolution de tout phénomène naturel est chaotique : à plus ou moins long terme, le système ignore son passé. Cela rend les études beaucoup plus difficiles et les situations de ceux qui les réalisent moins confortables, mais on ne peut y échapper ; la complexité du système terrestre est effectivement très grande comme l'est corollairement son étude et donc aussi, la géotechnique ; on sait du reste depuis longtemps, que la statistique et le calcul des probabilités sont nécessaires à l'étude d'événements aléatoires ; c'est même pour cela qu'ils ont été imaginés.

Pourtant, la géotechnique n'est pas foncièrement probabiliste. Bien que les phénomènes naturels soient très loin d'être simples, elle les schématise à l'extrême, notamment en faisant appel à de nombreuses approximations et hypothèses, en limitant strictement leurs domaines de validité et en les appliquant à des paramètres simplistes : par son outil mathématique calqué sur la mécanique rationnelle, la géomécanique avec laquelle on la confond habituellement, la plus grande partie de la géotechnique est résolument déterministe. Les milieux de la géomécanique sont des abstractions continues, homogènes, isotropes, libres et immuables ; leurs comportements sont schématiques et figés, régis par des lois transcrites en formules biunivoques de calcul ; à chaque valeur du paramètre cause, la donnée, correspond strictement une seule valeur de

l'inconnue effet, le résultat du calcul : cette fondation va rompre parce que la pression qu'elle impose au matériau de son ancrage est supérieure à la pression dite admissible ; cela est évident et indiscutable ! Ce qui ne l'est pas, c'est la valeur de cette pression admissible et même la méthode de calcul qui permet de l'obtenir. On peut dire à peu près la même chose à propos de tassement de fondation ou de remblais, de stabilité de talus ou de mur de soutènement, de débit de puits ou de fouille... On ne s'étonnera donc pas que les résultats de calculs géotechniques soient des ordres de grandeur et non des certitudes : même là où elle paraît déterminée, la géotechnique ne permet pas la prédiction.

La petite partie nécessairement probabiliste de la géotechnique, celle qui étudie les événements aléatoires dangereux, précédés et suivis de plus ou moins longues périodes de calme relatif comme les séismes, les crues..., ne dispose pas des longues séries structurées de données numériques cohérentes, nécessaires à un traitement statistique régulier : les prévisions de la géotechnique probabiliste ne sont jamais très probantes.

Pour s'affranchir du hasard, l'irrationnel est absurde, la fatalité inadmissible, l'occultisme hors sujet, le dogmatisme source intarissable d'un hasard qu'il nie. La démarche scientifique est la seule qui soit efficace, mais elle n'évite pas tout : le déterminisme rigoureux des phénomènes naturels, d'abord fondé sur la révélation de lois « naturelles » immuables puis sur la raison, semblait approprié ; il n'est adapté qu'à des cas simples que l'on rencontre très rarement dans la nature : même le comportement des astres n'est ni stable ni immédiatement et strictement explicable par le seul calcul sans le recours à des « perturbations » ou à des objets imaginaires. Les probabilités conviennent à l'étude de la plupart des cas complexes habituels dans la nature ; la théorie du chaos semble permettre de faire mieux, mais montre aussi les limites que nous imposent nos moyens et notre méconnaissance de l'histoire. Tous sont des outils rationnels de prospective, compatibles et même complémentaires malgré les apparences, mais ils ne conduisent jamais à l'exactitude : l'incertitude chaotique doit maintenant être regardée comme la limite scientifique de notre entendement, et une telle limite ne peut être approchée que de façon asymptotique : la science ne permet donc pas de s'affranchir totalement du hasard et ne le permettra sans doute jamais.

Pour s'en affranchir mathématiquement, le calcul des probabilités est moins commode que le calcul déterministe ; il faut beaucoup plus de temps, de patience, voire d'obstination notamment pour interroger le passé et effectuer de très longues séries d'observations, ainsi que beaucoup plus de papier et de mines de crayon ou de temps d'ordinateur. On peut regretter que ses résultats soient moins précis, ce qui est fondamentalement vrai, de sorte qu'il est inutile de le remarquer. Mais on peut ainsi prévoir les événements de phénomènes beaucoup plus complexes, en sachant avec quelle incertitude et cela est sans doute préférable à une fausse assurance.

3.1.4 Les théories géotechniques

Une partie des théories géologiques et la totalité de celles de la géomécanique s'expriment en langage mathématique, moyennant une schématisation, diffé-

rente dans chaque cas. Une schématisation est toujours nécessaire quand on substitue une abstraction à un objet ou à un fait par l'intermédiaire de ce langage. La mathématisation d'une science naturelle comporte deux dangers qui guettent l'utilisateur inattentif des résultats auxquels elle permet d'aboutir. Le premier concerne le géomatériau et les phénomènes que l'on abstrait ; ils prennent des aspects de plus en plus différents de la réalité. Le second s'attache aux hommes qui, disposant d'un langage mathématique, ont tendance à ne plus penser qu'en équations et finissent par attribuer inconsciemment aux matériaux et aux phénomènes naturels, les caractères des milieux et des phénomènes schématiques qu'ils ont imaginés pour pouvoir intégrer ces équations.

Or la mathématisation d'un problème géotechnique, même quand elle est réussie, ce qui n'est pas toujours le cas, ne conduit pas nécessairement de façon simple à une solution pratique. Dans l'état actuel de la géotechnique, bien des problèmes peuvent en effet se résoudre assez facilement de façon pragmatique, alors qu'il faudrait entreprendre un travail ardu d'analyse, de mise en équation et de calculs pour leur donner des solutions mathématiques. Et l'on s'exposerait même, dans certains cas, à constater que ces dernières n'auraient pas une aussi grande précision que certaines solutions pragmatiques.

Les mathématiques appliquées ne créent pas de faits nouveaux ; elles sont seulement un langage commode à l'aide duquel on peut poser et résoudre un problème de physique simple. L'artifice mathématique permet, d'abord de quantifier les observations pour les préciser, les comparer à d'autres ou à des résultats d'expériences ; cela conduit à énoncer les lois qui s'en dégagent au moyen de fonctions connues ou nouvelles. Sur ces bases, on peut ensuite traduire les données d'un problème théorique par des équations puis intégrer ces équations pour aboutir à des formules plus ou moins simples. Au moyen de ces formules, plus efficacement que par une méthode directe, il est alors facile de résoudre schématiquement un problème pratique qui, dans ses grandes lignes, se pose souvent de la même façon.

On ignore malheureusement la démarche pour n'en retenir que le résultat, forme abstraite d'une géotechnique dont les bases sont fondamentalement expérimentales et les buts, essentiellement pratiques.

3.1.4.1 Représentation des formes

Les théories géologiques s'appliquent à la description formelle du géomatériau et à la chronologie des phénomènes passés qui l'ont affecté. Elles concernent le plus souvent des concepts relativement simples, assez faciles à exprimer sous une forme mathématique primaire, comme des identités ou des différences appliquées à des éléments ou à des ensembles ou bien comme des données chronologiques ou géométriques. Pour des raisons qui n'ont pas à intervenir ici, on dit par exemple que deux roches différentes appartiennent à la même formation, ce qui leur confère entre autres, le même âge, ou bien que deux roches analogues appartiennent à des formations différentes ce qui confère un âge plus récent à celles qui appartiennent à la formation normalement superposée à l'autre. On parle d'autre part d'épaisseur ou de pendage d'une couche, d'axes de plissements, de réseaux de fracturation...

La représentation graphique du géomatériau constituant le sous-sol d'une région a la forme de cartes et de coupes, documents géométriques de base de la géotechnique, bâtis sur des canevas en x, y, z ; ils représentent historiquement les premières formes de mathématisation des géosciences. Ils traduisent schématiquement la structure d'un site en respectant certaines règles et selon la conception d'un homme ou d'une équipe ; ils ne sont donc pas tout à fait objectifs. Le seraient-ils qu'ils n'en demeureraient pas moins éloignés de la réalité par la plus ou moins grande légitimité des règles appliquées à leur élaboration. En fait, les roches analogues ne sont pas strictement identiques, une formation peut être composée de roches différentes selon l'endroit, les processus de sédimentation ne permettent pas d'attacher une trop grande rigueur à la chronologie comparée, les pentages varient autour de valeurs moyennes, les réseaux de fracturation ne sont pas strictement réguliers... D'autre part, les observations sur le terrain sont toujours plus ou moins fragmentaires en surface et pratiquement inexistantes en profondeur. La part de l'interprétation par inter ou extrapolation dans la mise au point de ces documents, est donc toujours prépondérante.

Le géologue le sait et en tient compte ; le physicien l'ignore ou en sous-estime souvent la portée pratique. C'est la raison pour laquelle, quelles que soient la forme et la valeur intrinsèque d'une carte ou d'une coupe géologiques, ces documents sont toujours mieux utilisés par un géologue que par un géomécanicien : ce dernier, quand toutefois il sait les lire, a tendance à prendre leurs indications au pied de la lettre, ce qui se révèle être toujours dangereux en pratique.

3.1.4.2 Étude des phénomènes

Les théories physiques concernent généralement l'étude des phénomènes naturels ou induits qui affectent le géomatériau. En géotechnique, il s'agit essentiellement de ceux qu'étudient la géodynamique, la géophysique, la géomécanique et l'hydraulique souterraine. Ces sciences ont été, en grande partie, accaparées par les physiciens qui parlent plutôt de comportement et leur développement théorique semble actuellement, presque détaché de toute préoccupation naturaliste ; elles n'en demeurent pas moins des formes mathématisées de géologie. L'hydraulique souterraine n'est rien d'autre vis-à-vis de l'hydrogéologie, ainsi que la géomécanique vis-à-vis de la géodynamique.

À travers l'expression de leurs développements théoriques au moyen des équations aux dérivées partielles, la parenté mathématique de toutes les sciences physiques de la géotechnique est évidente ; elle légitime les expériences analogues comme celles des modèles électriques en hydraulique souterraine tels qu'on en construisait naguère. Ces sciences étudient toutes les relations d'un champ de forces et du géomatériau à l'échelle d'un site ; la géophysique électrique étudie la forme d'un champ électrique naturel ou induit dans ce matériau, la géomécanique étudie l'action sur lui de la gravité, champ de forces naturel ; l'hydraulique souterraine étudie l'action de ce même champ sur l'eau qu'il contient.

L'équation différentielle est la forme la plus élaborée de la mathématisation de la plupart des théories physiques actuelles de la géotechnique. Notons que, compte tenu de l'énorme imprécision métrologique qui affecte généralement les valeurs mesurées des paramètres géotechniques, l'augmentation de précision mathématique qui résulte du passage de l'utilisation des accroissements finis à celle de la différentielle, est tout à fait négligeable en pratique. Tout développement théorique de géophysique, de géomécanique, d'hydraulique souterraine, de géothermie, n'est en fait qu'une série axiomatique de déductions fondées sur l'intégration d'une équation différentielle dans des cas particuliers. Ce que l'on appelle conditions dans les traités classiques sont des restrictions qui conduisent à schématiser le géomatériau pour permettre cette intégration et les calculs qui en résultent. La technique de cette intégration et de ces calculs, plus ou moins complexe selon le cas, est affaire de techniciens plus ou moins évolués des mathématiques appliquées ; le géologue n'a objectivement pas à être impressionné, comme c'est souvent le cas, par l'habileté de l'un d'entre eux car elle est une condition nécessaire de la valeur de sa technicité.

L'utilisation de telles équations comme images mathématiques de la plupart des théories physiques de la géotechnique, sous-entend que l'on applique au géomatériau et aux phénomènes naturels, les notions de vecteur représentant des forces, de fonction de point traduisant leur (cet adjectif concerne-t-il le vecteur ou la force ? Il y a déjà ambiguïté à ce niveau) répartition dans l'espace cartésien auquel on assimile le milieu, de champ dérivé d'un potentiel et de milieu continu, qui sont en fait des simplifications exorbitantes par rapport à la réalité. Comment peut-on raisonnablement considérer comme un milieu continu le granulats qui, à partir d'une certaine échelle d'observation, se révèle être n'importe quel géomatériau, meuble ou rocheux ?

Ces simplifications sont à la base de la mathématisation de la physique macroscopique ; elles font partie des postulats auxquels nous sommes habitués dans notre culture scientifique générale ; elles sont implicitement à la base du développement de toutes les théories physiques de la géotechnique. Si la mathématisation de la géotechnique piétine depuis plus de cinquante ans et piétinera sans doute encore longtemps, c'est parce qu'elle est en partie tributaire des sections parmi les plus difficiles de la physique (capillarité, élasticité, viscosité, fluage...) ; ce sont celles pour l'étude desquelles la mise en œuvre des équations aux dérivées partielles est la plus délicate et la moins efficace parce que ces sections font encore, pour une large part, appel à l'observation et à l'expérience pour résoudre leurs problèmes. Et ce n'est pas la mise en œuvre de puissants moyens de calcul informatiques qui régleront la question car en l'occurrence, il ne s'agit pas de difficultés de calcul mais de complexité de conception.

Les simplifications qui intéressent la géotechnique en particulier, concernent plutôt le milieu et les conditions du phénomène aux limites du milieu. Remarquons qu'à ce niveau d'abstraction, il n'est plus question de matériau mais de milieu. Pour légitimer l'utilisation des équations aux dérivées partielles et permettre ensuite l'intégration d'équations différentielles en géotechnique, on doit admettre dans la plupart des cas, que le milieu sur lequel on raisonne est un milieu homogène et isotrope, ou du moins qu'il est soit hétérogène de façon simple, soit anisotrope. Il est en effet théoriquement possible d'analyser mathé-

matiquement le comportement physique d'un milieu anisotrope ; quant à le faire pratiquement, c'est évidemment une autre histoire, que les difficultés d'intégration concrétisent le mieux. En géophysique ou en géomécanique, les modèles sont en principe très complexes : à chaque point du massif repéré par ses trois coordonnées spatiales, on accroche des valeurs de paramètres d'état ou de comportement $\rho, \mu, E, k...$ et l'ensemble évolue selon une fonction temporelle ; en fait, on simplifie à l'extrême en attribuant la même valeur de paramètre à l'ensemble du massif et en négligeant le temps ; on envisage souvent un milieu infini ou du moins fini de façon géométriquement simple, dans lequel sont superposées des couches ayant chacune une épaisseur constante et constituées chacune de matière homogène et isotrope ; en réalité, un tel milieu, généralement considéré comme anisotrope par les analystes, est hétérogène. Il est en effet constitué d'éléments de nature et de caractères différents, arrangés de façon discontinue de sorte qu'ils ne peuvent se confondre en un tout ; c'est donc une autre simplification de considérer que ses propriétés varient de façon continue suivant la direction selon laquelle on les évalue. En fait même, le passage de l'accroissement fini à la différentielle est parfaitement abusif dans ce cas.

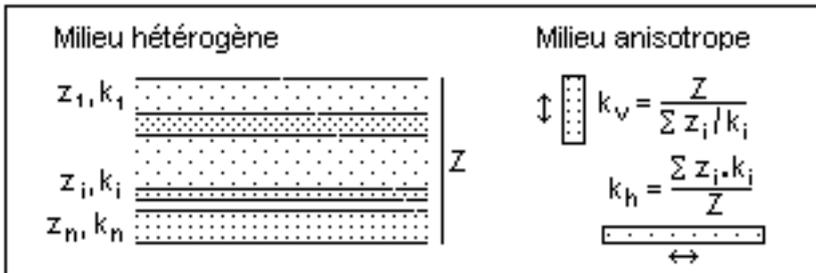


Figure 3.1.4.2 – Hétérogénéité – Anisotropie (perméabilité k)

Le physicien risque de ne pas se rendre compte à quel point toutes ces simplifications sont dénuées de sens réel car ses connaissances limitées en géologie, portent précisément sur de telles représentations schématiques du géomatériau ; elles sont très élémentaires car en fait, ce matériau est généralement hétérogène de façon compliquée, de telle sorte qu'il ne peut se résoudre à un milieu anisotrope du point de vue analytique. Plus le problème posé est particulier, plus on l'étudie en détail et plus ses composants et lui-même paraissent compliqués ; pour le mathématiser, on doit donc lui consacrer davantage de conditions simplificatrices, car la clarté ne s'obtient qu'aux dépens de l'intégrité.

En sismique, on fait intervenir un phénomène très général, l'oscillation mécanique induite d'un grand volume de géomatériau, milieu continu à cette échelle. Il suffit pour que l'on puisse calculer et ainsi obtenir un résultat mathématiquement correct, de considérer que le matériau est une superposition de couches aussi nombreuses que l'on veut mais illimitées en plan, limitées en profondeur par des surfaces planes et parallèles et constituées chacune de matière homogène et isotrope. En sismique-réflexion où la forme du phénomène

est envisagée de façon très particulière mais dont on ne peut tirer que des renseignements assez délicats à interpréter car ils sont issus de calculs compliqués, l'arrangement global de l'ensemble des couches importe assez peu. En sismique-réfraction où la forme du phénomène est plus générale mais dont la portée est plus limitée, on doit de plus admettre que les couches sont nécessairement constituées de matière dont l'élasticité croît avec la profondeur. Les calculs correspondants sont par contre très simples.

En géomécanique, s'il s'agit d'étudier la stabilité d'un talus de déblais dans laquelle intervient un phénomène particulier, la gravité se manifestant dans un espace restreint, on doit en plus des conditions habituelles concernant le milieu, supposer à la fois que le problème est à deux dimensions, c'est-à-dire que la surface de glissement est une surface réglée, que la trace plane de la surface de glissement est géométriquement simple (plan, cercle, spirale logarithmique, cycloïde... selon la méthode retenue), que l'on peut considérer comme infinie la plus grande des dimensions finies du glissement, que le massif dans lequel se produit ce glissement était primitivement en équilibre, que l'inertie n'intervient pas dans le phénomène et que la rupture est générale et instantanée. Il est possible que j'ai omis quelques conditions supplémentaires, ce qui importe peu en l'occurrence ; le nombre de celles que je viens de citer est déjà très suffisant pour illustrer mon propos. Et de toute façon, un glissement n'acquiert presque jamais instantanément sa forme définitive ; elle résulte en général de la superposition à diverses échelles dans l'espace et dans le temps, de glissements élémentaires, selon un processus compliqué dont la théorie ne peut rendre compte : tous les glissements de terrain ont une structure fractale (*Fig. 2.3.2.3*).

Les conséquences pratiques de ce long enchaînement de simplifications théoriques qu'impose l'utilisation du langage mathématique en géotechnique, ne doivent pas être négligées quand on en critique et surtout quand on en utilise le résultat.

3.2 La modélisation

Le système terrestre (*cf. 4.1.2.1*) est trop vaste, trop divers et trop complexe pour qu'on puisse le décrire, l'étudier et le comprendre directement avec efficacité, afin d'anticiper son évolution et ainsi, tenter de prévoir la réalisation d'un événement naturel ou provoqué ; en effet, le nombre d'informations, de données, dont il faut disposer pour décrire la forme et le comportement d'un site confronté à un ouvrage est énorme, quasi illimité.

La modélisation consiste à sélectionner sévèrement les informations pratiques supposées essentielles sur l'ensemble site/ouvrage, en fait facilement quantifiables, et à réduire autant que possible le nombre des données correspondantes afin de pouvoir les traiter par une méthode simple ; elle est donc extrêmement réductrice et toujours subjective : le site et l'ouvrage doivent alors être schématisés en respectant les formes et les comportements généraux, au moins dans leurs grandes lignes ; ainsi, on ne peut correctement modéliser que ce que l'on a bien observé et compris : pour résoudre un problème spécifique, utiliser ou

adapter sans discernement un modèle existant, construire trop hâtivement un modèle nouveau conduit généralement à l'échec. L'aspect du modèle varie suivant l'objet, la méthode et le but de l'étude dont il est un instrument ; s'il est validé dans ses moindres détails, il peut être descriptif, explicatif, prévisionnel, opérationnel, selon l'étape de l'étude ; il doit pouvoir être manipulé de façon spécifique pour en obtenir sans trop de peine, des renseignements fiables et facilement utilisables sur le comportement particulier de l'ensemble site/ouvrage dans des circonstances données, et pour résoudre des problèmes pratiques : que risque-t-on dans ce site, que risque cet ouvrage, à quelle échéance, comment éviter des dommages... ?

Les modèles géologiques schématisent la diversité en décrivant, nommant, classant et cataloguant les objets d'étude et en les groupant en types génériques ayant des formes et des comportements analogues. Les modèles physiques simplifient la complexité de leur comportement en le décrivant sous forme de lois et de formules ; les modèles informatiques le font sous forme de logiciels écrits à partir d'elles ; ceux que l'on utilise le plus en pratique sont pour la plupart déterministes et pour quelques autres probabilistes ; les modèles non-linéaires qui figureraient le mieux les phénomènes naturels sont difficilement maîtrisables en pratique et donc plutôt utilisés pour la recherche que pour les applications. La résolution d'un modèle dépend des échelles des mailles spatiale et temporelle sur lesquelles il est construit, mais en simplifiant pour permettre le traitement mathématique, on diminue la représentativité du modèle et la précision du résultat : on ne peut pas rendre compte de ce qui est plus petit que les mailles, mais plus on réduit les mailles d'un modèle, plus on accroît sa complication et donc le risque de comportement chaotique ; la modélisation est ainsi un moyen indispensable à la géotechnique qui faut manipuler avec discernement.

La physique s'intéresse en premier lieu et principalement au comportement du modèle, c'est-à-dire au temps-dimension des relations de causalité, peu à sa forme, c'est-à-dire à l'espace qu'elle réduit à l'état, aux conditions initiales et aux limites, très peu à son histoire, c'est-à-dire au temps qui passe et à l'évolution du modèle. Pourtant, il importe toujours de considérer indissociablement la forme, l'histoire et le comportement d'un site naturel, aménagé ou non, dont le modèle spécifique est toujours un système évolutif complexe ; les modèles d'analyse ne doivent donc ni se limiter à des formules issues de calculs de mécanique et/ou de probabilité, ni être seulement des descriptions littérales d'objets et de comportements dans lesquelles se mêlent le rationnel et l'irrationnel. Le modèle de synthèse d'un aménagement particulier est ce à quoi doit aboutir son étude spécifique ; ensemble cohérent et structuré, il n'est pas que la somme de ses parties, une simple réunion de quelques modèles analytiques tant formels que comportementaux évidemment indispensables, qui sont ses unités structurelles et fonctionnelles, indissociables et interdépendantes : en négliger une, mal les juxtaposer, mal saisir leurs relations, peut modifier le modèle géotechnique synthétique de telle sorte qu'il ne représente plus rien de réel ; mal comprendre leurs rôles respectifs ou leur faire jouer des rôles qui ne sont pas les leurs, peut conduire à des résultats aberrants, à des effets imprévus sur l'ensemble, qui ne devront rien au hasard ; c'est ce à quoi on s'expose en

confondant la géotechnique et la géomécanique. Un réductionnisme teinté d'un peu de holisme est donc nécessaire à la géotechnique.

Ainsi, la modélisation très compliquée d'un site impose que l'on construise maillon par maillon, une chaîne hiérarchisée cohérente de modèles successifs imbriqués, de plus en plus détaillés, qui doivent être parfaitement compatibles : le modèle géologique montre le cadre général de l'étude ; les modèles géomorphologique et géodynamique expliquent la forme et le comportement du site ; le modèle géomécanique permet la mathématisation de ce comportement ; les modèles d'ouvrages, terrassements, épaissement, fondations, protection contre les risques...se superposent à eux pour établir le modèle géotechnique synthétique de l'ensemble site/ouvrage que l'on pourra manipuler pour résoudre les problèmes que posera la construction et prévoir autant que faire se peut, son comportement et son évolution.

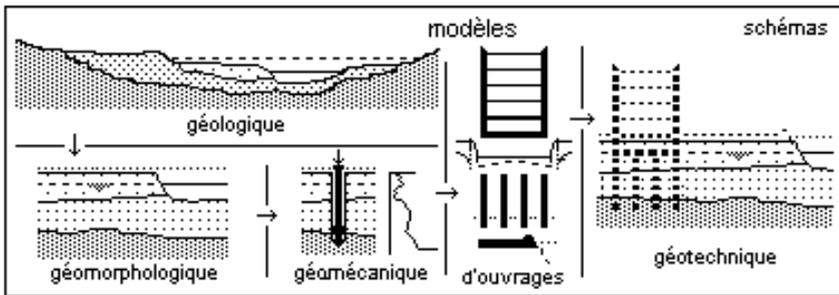


Figure 3.2 – Construction du modèle géotechnique

La modélisation géotechnique est particulièrement difficile car elle doit être abordée à plusieurs échelles d'espace et de temps, et successivement de deux façons apparemment opposées, d'abord holistique par la diversité du géomatériau traduite en descriptions, dénominations, classifications, catalogues, fondements des modèles analogiques, ensuite réductionniste par la complexité des problèmes géotechniques qui impose la simplification et le paramétrage, fondements des modèles mathématiques.

La construction et la validation d'un modèle géotechnique passent ainsi par une démarche structurée qui repose sur des considérations historiques, scientifiques et pratiques : elle est différente suivant que le but est de recherche ou d'application, qu'il s'agit de comprendre un comportement ou d'en simuler l'évolution ; quoi qu'il en soit, il faudra sélectionner les paramètres supposés influents, les juxtaposer comme les briques du modèle, effectuer des mesures qui ne produiront que des séries courtes et donc incomplètes de données imprécises voire incertaines et les intégrer dans un système graphique, analytique et/ou numérique cohérent : le recours à des méthodes probabilistes de traitement s'imposerait donc, mais en pratique, la géotechnique a rarement les moyens de les mettre en œuvre ; il faudra enfin valider le modèle en comparant des observations judicieuses malheureusement assez rares aux résultats auxquels la manipulation du modèle permet d'aboutir, ce qui n'est guère possible à l'échelle

d'un ouvrage et encore moins d'un aménagement. Un comportement, même clairement identifié et apparemment simple, peut en effet prendre divers aspects selon l'échelle de temps pertinente, les lieux et les circonstances spécifiques ; les valeurs des paramètres que l'on considère comme représentatifs du phénomène générique, mesurées à chaque occasion d'étude, ne constituent jamais de véritables séries statistiques parce qu'elles proviennent de manipulations qui n'ont que l'apparence de l'analogie : les modèles décrivent assez bien des événements qui se sont déjà produits, car c'est à partir des observations faites à leur occasion qu'on les a bâtis et validés *a posteriori* ; ils ne décrivent jamais aussi bien les événements à venir, car ces derniers ne seront sûrement pas identiques à ceux qui ont servi de référence et d'étalon ; en effet, au moins en ce qui concerne leurs relations avec le site, les installations et les ouvrages sont tous des prototypes : chacun impose ses propres conditions aux limites du modèle générique utilisé, différentes dans chaque cas, ce qui conduit à des résultats chaque fois différents. Aussi imparfaits qu'ils soient, les modèles sont néanmoins des moyens utiles sinon nécessaires d'expérimentation et d'exploration virtuelles du futur ; ce sont des instruments de travail métaphoriques, pas des portraits et encore moins des substituts ou des équivalents. Mais l'efficacité pratique d'une modélisation spécifique repose sur la pertinence des hypothèses qui ont servi à construire le modèle et à le faire fonctionner, sur la qualité des données, sur la complication et la longueur des calculs ; ses limites sont celles que lui confèrent les hypothèses sur lesquelles il est bâti, qui sont évidemment réductrices et même plus ou moins erronées voire fausses ; dans les cas maintenant habituels de résolution par itération numérique, elles peuvent produire des résultats aberrants par accumulation d'erreurs systématiques, qui amplifient les écarts réels jusqu'à les estomper voire à les escamoter.

Généralement, on teste des modèles standards aussi simples que possible qui paraissent adaptés au type d'évolution que l'on étudie, puis on compare les résultats avec les observations et les expériences pour en retenir un, quitte à en changer si la solution obtenue par son intermédiaire ne paraît pas satisfaisante. En effet, il est rare que l'on doive inventer de toutes pièces un modèle ; il en existe des types, on pourrait dire des modèles de modèles, pour tous les ordres de préoccupations que l'on peut avoir quand on procède à une étude géotechnique ; il y a des modèles standards de géomorphologie, de géodynamique, de géomécanique, d'ouvrages, de risques. On doit non seulement les utiliser individuellement et/ou conjointement, mais surtout vérifier que le modèle synthétique que l'on est en train de construire est effectivement compatible avec chacun d'eux ; si ce n'est pas le cas, on peut être assuré que l'on est en train de se tromper, à moins que la création d'un nouveau type ne s'impose.

Ainsi, quels qu'en soient l'objet et le but, la géotechnique oblige à considérer synthétiquement la forme, l'histoire et le comportement d'un ensemble indissociable site/ouvrage. La géomécanique est un moyen d'y parvenir mais ses modèles sont particulièrement réducteurs : elle géométrise la forme, ignore l'histoire et réduit le comportement complexe à une juxtaposition et/ou une succession de comportements élémentaires déterminés ; en privilégiant les techniques de calcul, elle isole des petits morceaux de réalité comportementale, elle les schématise et les manipule mathématiquement un à un, en ignorant d'autres genres de modèles plus proches du réel ; mais l'étude de la chute d'un

bloc rocheux ne se réduit pas à la détermination de la trajectoire de son centre de gravité et à l'énergie qu'il libérera à son point d'impact.

Pour construire un modèle géotechnique, on retient en principe ceux des caractères du site que l'on sait le mieux manipuler dans un cadre théorique limité et que l'on suppose directement utiles à la résolution du problème posé. Ainsi, les modèles géotechniques sont extrêmement schématiques et les résultats de leurs manipulations doivent toujours être utilisés avec de grandes précautions. On est donc amené à les valider au cas par cas ou du moins à en critiquer attentivement les valeurs et les limites plus ou moins floues sinon incertaines.

En géotechnique, on dispose de peu de données généralement insuffisantes, partielles, peu précises voire incertaines pour identifier et définir les risques éventuels, et on connaît et comprend plus ou moins bien les phénomènes en cause ; après avoir énoncé des hypothèses et construit des modèles, on ne peut les valider qu'au coup par coup, selon les circonstances et les résultats obtenus, sans pouvoir recourir à l'expérience directe : on ne peut pas surcharger un pont jusqu'à obtenir la rupture de ses fondations ; on vérifie seulement que les déformations de son tablier et le tassement de ses fondations restent dans le domaine élastique. Ainsi, la prospective géotechnique est hautement probabiliste, seulement exploratoire, et ses résultats sont approximatifs ; cela n'est pas négligeable, car il vaut mieux avoir raison approximativement, avec une bonne appréciation des ordres de grandeur que se tromper précisément, avec quelques chiffres après la virgule.

Le moins que l'on puisse dire est qu'actuellement, la modélisation géotechnique est loin d'être satisfaisante. La géologie structurale, la géomorphologie, la géodynamique, la géophysique, la géomécanique, l'hydraulique souterraine... sont les disciplines essentielles de la géotechnique ; elles se sont développées indépendamment comme des parties de la géologie et de la physique ; elles avaient entre elles des affinités, mais pas au point de pouvoir les utiliser sans adaptation. Cela a néanmoins été fait de sorte que, pour tenter de préserver une fragile cohérence à l'ensemble, on a dû multiplier les exceptions aux règles. On a ainsi obtenu des systèmes sans lien, mais aussi plus ou moins incohérents en eux-mêmes, faits de successives juxtapositions de théories restreintes n'ayant que peu d'affinités. Et même, il n'est pas très légitime d'avoir assimilé le comportement restreint de matériaux artificiels à l'échelle de l'échantillon, au comportement général du géomatériau à l'échelle du site. C'est en effet à partir d'expériences effectuées sur de tels échantillons et dans un étroit domaine de variation des paramètres en cause, que les lois de Hocke, de Coulomb et de Darcy ont été exprimées par leurs auteurs (*Fig. 3.1*).

3.2.1 Modélisation analytique

En ne s'intéressant qu'aux comportements élémentaires du géomatériau, évidemment déterminants quand on procède à une étude géomécanique, on néglige généralement les formes, cadres dans lesquels se produisent les phénomènes en cause dont la manifestation intempestive peut constituer un risque : l'étude d'un glissement réel ne ressortit pas qu'aux lois de la géomécanique

dont l'utilisation impose au phénomène des conditions aux limites fictives ; en tenant compte de la morphologie, de la structure du talus réel qu'il risque d'affecter et de l'endroit précis où il risque de se produire, on peut définir des conditions aux limites plus réalistes, mais évidemment plus difficiles à manipuler par le calcul. Et bien entendu, on néglige totalement l'histoire du site, quand, pourquoi et comment d'autres glissements s'y sont produits.

3.2.1.1 Modélisation des formes

Par forme, il faut entendre tout ce qui est matériel, relatif à l'espace, à l'état, matière, morphologie, structure... d'un objet intervenant dans l'étude, ensemble site/ouvrage, versant argileux que l'on va entailler, marécage que l'on va remblayer... Il est prudent de contrôler la forme des objets que l'on va utiliser en se référant à un modèle type ; on ne sera pas atteint par l'eau si l'on se trouve sur une butte qui domine la plaine d'inondation ; en l'occurrence, les repères de niveaux traditionnellement tracés sur certains murs par des occupants antérieurs, une carte topographique précise sont de bons modèles de forme.

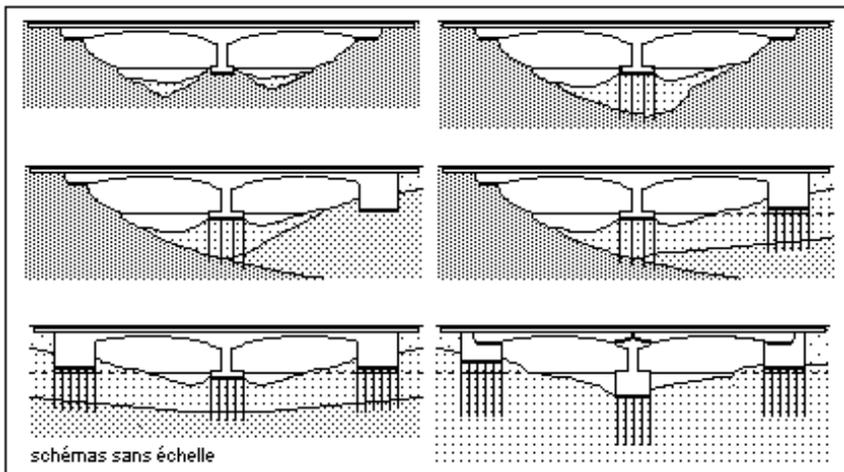


Figure 3.2.1.1 – Fondations d'un pont selon la structure du site

L'analyse formelle d'un site que l'on occupe déjà, que l'on va aménager, dans lequel on va construire un ouvrage et où l'on va peut-être prendre un risque, ne peut être effectuée qu'au moyen d'observations spécifiques selon les méthodes et moyens de la géologie ; elles sont généralement traduites par des descriptions, des plans et des coupes graphiques ou numériques représentant son état initial et synthétisées par des schémas de principes qui sont ses modèles de forme. On leur superpose des modèles d'éléments d'aménagements et/ou d'ouvrages, fondations, terrassements, écrans... de façon à obtenir un modèle de forme de l'ensemble. Les effets du tassement éventuel du sol de fondation d'un ouvrage ne seront pas les mêmes selon que la structure de ce dernier est iso- ou hyperstatique, plus ou moins tolérante ; il importe de bien la connaître car, si

elle est adaptée au comportement prévisible de ce sol, le risque n'est que d'un enfoncement et/ou d'une déformation limités, calculables, sans conséquence fonctionnelle ; si la structure est inadaptée, le dommage est presque assuré et peut aller jusqu'à rendre l'ouvrage impropre à sa destination, comme disent les juristes.

Les modèles de forme qu'utilise la géomécanique ne combinent que quelques modèles types géométriques de sites et structuraux d'ouvrages ; ils sont simplissimes car ils doivent conduire à des conditions aux limites que l'on sait manipuler mathématiquement, matériaux homogènes, isotropes..., structures régulières, ouvrages élémentaires... ; ils imposent les conditions initiales et aux limites des modèles mathématiques.

3.2.1.2 Modélisation du comportement

Relatifs au temps-dimension, les modèles mathématiques de comportements élémentaires sont beaucoup plus familiers aux géotechniciens que les modèles de formes. En effet, ils sont habitués à en établir au moyen d'expériences analytiques ou à effets séparés, essais et mesures, et à les manipuler au moyen de théories généralement condensées en formules qu'ils considèrent comme seules acceptables pour étudier un fait ou résoudre un problème de façon rigoureuse, ainsi qu'il est d'usage dans l'ensemble du *cursus* scolaire puis dans la majeure partie des activités techniques. Ces modèles sont pour la plupart des formules déterministes généralement de premier ordre, issues du calcul infinitésimal appliqué à des fonctions pas trop compliquées, dans des conditions aux limites simples, sur la base de théories dont chacune ne concerne qu'une part de réalité ; on ne peut les utiliser qu'au coup par coup, pour prévoir l'effet d'un seul événement relativement simple comme celui de l'impact sur une route, d'une pierre qui pourrait se détacher d'une falaise.

Le danger de l'usage de ce type de modèles classiques qui s'appliquent à des comportements reproductibles, déterministes et donc très rassurants parce que prédictibles, est que l'on surévalue souvent ses qualités ainsi que la réalité qu'il peut englober ; on bâtit alors des pseudo-modèles déterministes, en simplifiant le problème étudié jusqu'à le rendre squelettique, pour le forcer à ressortir à une théorie classique, mal adaptée à sa résolution. À la suite d'études conventionnelles de glissement, de tassements... on constate fréquemment que les faits observés ne correspondent pas aux résultats des calculs conformes aux modèles classiques ; on préfère alors accuser le géomatériau de ne pas être comme il faudrait pour obtenir le bon résultat, en mettant en cause la qualité des données obtenues au moyen d'essais qui sont en fait des simulations à l'échelle d'échantillons, plutôt que celle de la théorie ; pour aboutir aux résultats souhaités, on peut ainsi éliminer les données gênantes, modifier les appareils et les procédures d'essais et même certains volets de la théorie ; cela permet de continuer à considérer comme déterminés, des comportements qui ne le sont manifestement pas et de continuer à travailler selon les principes mécanistes courants.

Les modèles probabilistes ne sont guère plus familiers que les modèles de forme, car ils sont beaucoup plus difficiles à concevoir, à construire et à manipuler que les modèles déterministes et conduisent évidemment à des

résultats qui sont en principe des moyennes sur des variables plus ou moins aléatoires, imprécis par essence ; on prise rarement cela, car en technique, l'imprécision est généralement regardée comme la marque de l'incompétence, voire comme une forme dissimulatrice de l'erreur. Il est pourtant impossible de ne pas recourir à de tels modèles quand on étudie des systèmes ou des phénomènes complexes, ce qui est le cas général en géotechnique.

Pour essayer de s'affranchir des modèles probabilistes, dès que l'on a disposé d'ordinateurs, on a parfois pensé pouvoir s'en tirer, en modélisant un comportement complexe comme une réunion de comportements simples, déterminés, et en demandant à la machine d'effectuer des séries de calculs itératifs sur de grands systèmes d'équations linéaires, manipulant un nombre considérable de données ; c'est ce qu'auparavant, un homme n'avait jamais eu le temps de faire sur un bureau, avec du papier et un crayon. La théorie du chaos est venue opportunément expliquer que cette méthode toujours déterministe avait des limites qui étaient déjà apparues aux observateurs attentifs d'effets réels plus ou moins différents de ceux prévus : ce système d'équations est bien le modèle déterministe qui représente le mieux ce comportement, mais en raison de l'instabilité courante des équations différentielles, au-delà d'une certaine durée qui dépend de son temps caractéristique, le comportement du modèle diverge tellement de celui de l'objet réel que, quelle que soit la puissance de calcul dont on dispose, aucun résultat sérieux n'est possible : les effets réels diffèrent de plus en plus de ceux attendus par référence au modèle.

Cela ne veut pas dire que le comportement puisse être n'importe quoi dans l'avenir ; tous ses effets théoriquement productibles ne se réaliseront pas ; ceux qui seront susceptibles de se produire et que l'on pourrait qualifier de naturels sont ceux qui sont les plus probables parmi tous ceux qui sont possibles d'après le modèle, si ce dernier est suffisamment fiable. Selon la théorie du chaos, l'image graphique du comportement restera sur son attracteur, c'est-à-dire que l'on saura à peu près dans quel domaine, comment et avec quelle intensité, un événement sera susceptible de se produire, mais jamais précisément où et quand.

► Les modèles analogiques

Les modèles analogiques ou historiques, sont ceux dont la variable principale est le temps-paramètre ; ils font référence au passé et à l'expérience et sont plus descriptifs que chiffrés ; ils traduisent la contingence de l'évolution des systèmes compliqués. De tous les modèles analytiques nécessaires à l'étude géotechnique, ce sont de loin les moins familiers et ainsi, les moins utilisés de façon explicite ; en géomécanique, quel que soit le cas, conformément à la méthode de la macrophysique, on essaie toujours de bâtir un modèle immanent, indépendant du temps, qui permette de décrire l'avenir avec au moins une probabilité dûment chiffrée, en fait grossièrement estimée par un coefficient de sécurité (cf. 5.6.3) : à quelle pression transmise au sous-sol, cette fondation risque-t-elle de poinçonner ; quel sera le débit de ce forage ?... Et pourtant, un processus historique est sans appel, unique et définitif ; les événements, même les plus simples, s'y enchaînent en séries de durée variable, qui ne sont qu'apparemment cycliques, dans un ordre qui n'est pas forcément toujours le

même ; ils sont souvent analogues, jamais identiques. Un processus historique est par nature imprévisible, mais à partir du moment où un événement se déclenche, les options de leurs déroulements sont limitées et il n'est pas possible de les faire sortir de ces limites, de leurs attracteurs, sauf parfois à mettre en œuvre des mesures de prévention. On ne peut pas modifier significativement l'évolution d'un phénomène naturel, éviter un événement paroxystique au moyen d'actions directes : tenter de détourner un flux de lave pour qu'il contourne un village n'est jamais très longtemps efficace, empêcher une inondation, les ravages d'un torrent, n'est possible que pour un débit maximum mal connu ; on peut seulement obtenir des effets très limités et mal contrôlables comme ceux des ouvrages de défense, de soutènement... souvent défailnants ; cette évolution doit donc être elle aussi modélisée.

Les modèles historiques sont généralement des scénarios que l'on peut parfois traduire en graphes comme ceux des méthodes d'ordonnancement destinées à optimiser le déroulement de programmes d'études, de production, d'interventions... complexes ; un tel programme est modélisé comme un ensemble d'opérations ou d'événements élémentaires concourant à la réalisation du programme ; chacune est caractérisée par sa durée et par ses relations d'ordre avec les autres. Selon la complexité du programme ou du processus, divers modèles-types sont disponibles ; les plus courants sont ceux dits du chemin critique, variantes et extensions de la méthode Pert, utilisés pour la construction d'ouvrages, les opérations de prévention ou de secours... C'est ainsi que l'on peut ordonner au mieux les opérations, contrôler la cohérence d'une série d'événements et plus particulièrement en matière géotechnique, repérer des événements décisionnels et estimer leur importance relative dans le déroulement général du scénario d'opérations imposant un phasage précis : terrassements/soutènements, consolidation/tassement, évolution de cavités minières, exploitation de nappes aquifères aux ressources limitées, développement de pollutions de nappes... ou dans le suivi de l'évolution de la plupart des phénomènes dangereux en phase susceptible d'avoir une fin paroxystique : crues, mouvements de terrains... Il est possible et même recommandé de les traiter par l'informatique ; il existe de nombreux logiciels pour ce faire, spécialisés ou non.

► **Les modèles mathématiques**

Pour poser et résoudre des problèmes essentiellement fondés sur le temps-dimension, les modèles mathématiques sont en fait les seuls que l'on connaisse ; ils sont mécanistes : les équations sont monotones, les courbes sont continues, il n'y a pas de rupture, les résultats qu'ils fournissent sont simples, attendus, sans surprise. Ce sont les archétypes de la science dont l'objet principal paraît être d'en produire de façon continue ; on les pratique dès que l'on fréquente l'école ; ils produisent des résultats précis et sans appel : les résultats erronés sont donc des erreurs de données, de mesures des paramètres utilisés, et/ou de calcul imputables à l'opérateur, non à la méthode. On leur attribue ainsi une force de conviction qu'ils ont bien sur le papier, mais qui résiste mal à l'épreuve des faits ; en réalité, les trains du classique problème de calcul de l'école primaire ne se croiseraient jamais précisément là où le résultat à deux ou trois décimales près l'affirme, car ils ne partiraient pas exactement aux instants et ne rouleraient pas tout à fait aux vitesses fixés par l'énoncé. Les

difficiles problèmes des concours d'admission aux grandes écoles d'ingénieurs ne font pas mieux ; ils concernent seulement des événements virtuels plus complexes, ont des énoncés beaucoup plus compliqués et exigent quelques années de plus d'entraînement pour les résoudre.

Les expériences de macrophysique que la géotechnique appelle essais et qui consistent en des séries de mesures de couples de grandeurs que l'on considère comme dépendantes, contrainte/déformation, charge/débit, sont des modèles élémentaires de comportement, plus ou moins précis selon la qualité des mesures et la pertinence de la dépendance. On procède ensuite à un lissage de la série des valeurs, de façon à l'ajuster à une fonction mathématique simple, si possible linéaire, faute de mieux polynomiale rarement au-delà du degré 2, exponentielle, logarithmique ; on partait naguère d'un graphique cartésien du semis de points de la série, duquel on tirait intuitivement, avec pas mal d'imagination, une courbe de régression plus ou moins continue, rappelant plus ou moins la courbe d'une de ces fonctions ; on pouvait ainsi estimer les paramètres d'une formule simple. L'ordinateur permet maintenant d'obtenir rapidement et précisément tous les ajustements possibles de la série de couples numériques et de comparer leurs précisions par référence à l'écart type de la série ; on retient en principe la fonction caractérisée par l'écart le plus faible, mais en pratique, on essaie autant que possible d'adopter la plus simple, linéaire ou exponentielle, même aux dépens de la précision ; car, alors qu'en principe on ne peut superposer, additionner, que des fonctions linéaires, ensuite il faudra utiliser cette fonction avec d'autres obtenues de façon analogue, dans un système complexe dont le modèle synthétique serait inextricable et donc pratiquement inutilisable dans le cas contraire. Il y a ainsi un monde entre le modèle physique et le modèle mathématique ; on en avait l'intuition depuis longtemps ; la théorie du chaos en donne la raison : le modèle mathématique est parfaitement stable, le modèle physique, non. La précision d'un résultat mathématique est rigoureusement 1, celle d'un résultat physique est à peu près 1 ; cet à-peu-près dépend de la pertinence du modèle, de la qualité des mesures, du traitement des données...

Les comportements simples sont ceux qui ressortissent à la physique élémentaire, en particulier à la mécanique rationnelle et à l'hydraulique : la gravité et/ou un effort extérieur provoque un déplacement, une déformation, un écoulement... Ils sont déterminés et leurs effets sont déductibles des circonstances ; la relation de cause à effet est certaine. Ils s'expriment par des relations analytiques commodes, des égalités qui lient de façon biunivoque des variables précises sous la forme de fonctions comme l'équation du second degré pour la chute libre des corps. La courbe cartésienne représentative de chacun est unique, intemporelle, droite, parabole, exponentielle... Les lois fondamentales de la géomécanique, lois de Hooke, de Coulomb et de Darcy, n'entrent pas dans cette catégorie, bien qu'elles répondent à cette définition ; à l'origine c'était en effet des lois empiriques et opportunistes très spécifiques, dont ensuite la généralisation a été manifestement abusive. Les comportements qu'elles modélisent – élasticité, plasto-rupture et perméabilité – ne sont pas vraiment simples : on n'a pu les simplifier qu'en les schématisant à l'extrême, notamment en limitant strictement leurs domaines de validité, ce que l'on a souvent oublié par la suite. La perméabilité k qui selon Darcy relie directement le débit Q à la

charge Δh , est en fait un paramètre composite qui synthétise les influences spécifiques de nombreux caractères du matériau auquel on l'attribue – granulométrie, nature et forme des grains, compacité, structure... – et du fluide qui y circule – nature, viscosité, température, composition chimique... ; ce n'est donc pas une caractéristique intrinsèque du matériau perméable. Il en va de même pour les modules E qui selon Hooke relie la déformation L à la contrainte F , l'angle de frottement φ et la cohésion c qui selon Coulomb relie la rupture d à l'effort T ...

En première approximation, la plupart des comportements complexes peuvent être vus comme des réunions de comportements simples dont la nature et l'influence relative sont plus ou moins bien connues. Ils paraissent plus ou moins aléatoires mais sont statistiquement définis ; les relations de cause à effet sont connues mais imprécises. Leurs effets s'expriment sous forme statistique, intervalle de définition et probabilité de production ; à la valeur précise d'une variable correspond la valeur probable d'une autre avec une fréquence donnée. La représentation cartésienne est un semis de points duquel on tire, avec plus ou moins d'imagination, une courbe représentative plus ou moins continue ; elle ne peut généralement pas se traduire par une formule simple, sauf à utiliser une fonction lissante comme la fonction \log .

Le modèle déterministe

La causalité est le fondement du modèle déterministe qui est intemporel, immuable : tout événement a une cause et une seule, et dans les mêmes conditions, la même cause produit toujours instantanément le même effet. Pour construire un modèle déterministe, il faut parfaitement connaître et comprendre le processus étudié et disposer de nombreuses données précises, issues d'observations et/ou d'expériences normalisées permettant de le valider ; on peut alors l'utiliser dans tous les cas semblables.

Le type représentatif du modèle déterministe mathématique de comportement est celui de la relation si possible linéaire de deux grandeurs dépendantes, caractérisant le même comportement d'un même objet. Ce peut être le débit d'un forage en fonction du rabattement, la déformation et/ou la rupture d'une fondation en fonction de la charge... Le temps n'intervient apparemment pas dans ce type de modèle ; en réalité, il n'en est rien ; à débit constant, le rabattement et à charge constante, la déformation croissent plus ou moins avec le temps ; on contourne la difficulté en retenant comme valeur représentative, celle mesurée au bout d'un laps de temps fixé, voire instantanément.

Un tel modèle est bâti sur des lois de la mécanique et/ou de l'hydraulique : à partir de conditions initiales et aux limites qu'on lui impose, mais qu'en fait on ne connaît pas très bien, il schématise l'évolution d'un système simple et inerte animé par des forces, afin de déterminer à partir d'un état initial stable et parfaitement déterminé, quel sera son état final stable en fin d'évolution. En fait, la modélisation consiste à simplifier le comportement du système en neutralisant les difficultés de calcul ou pire, en les escamotant : on pose en principe que le système est intégrable, c'est-à-dire modélisable par des formules et donc qu'il ressortit au calcul infinitésimal. L'escamotage habituel est celui de l'espace et du temps : le passage d'un état à l'autre est indépendant de l'un et de l'autre :

selon la relativité galiléenne, dans un référentiel donné, sous l'effet d'une même cause, le système évolue de la même façon et produit le même effet n'importe où, n'importe quand et il le fait instantanément ou plutôt hors du temps ; l'impulsion et l'énergie du système sont conservées ; son inertie est négligée : telle charge de fondation produit tel tassement selon tel module ; tel rabattement de niveau d'eau de forage produit tel débit selon telle perméabilité...

Dans le cas de la relation effort/déformation, l'expérience de Hooke sur un fil métallique tendu montre que, pour des tractions faibles, le fil s'allonge et rétrécit peu, de façon à peu près linéaire ; la partie de courbe correspondante est à peu près une droite qui caractérise le domaine élastique. Au-delà d'une certaine tension dépendant de plusieurs paramètres initialement négligés comme la nature du matériau dont est constitué le fil, son diamètre, le pas et la quantité d'accroissement de la tension... la déformation devient de plus en plus grande, de façon à peu près géométrique, alors que l'effort augmente toujours à la même cadence ; la courbe devient concave et se rapproche du parallélisme à l'axe des déformations, caractérisant ainsi le domaine plastique. Une certaine valeur de la traction atteinte, le fil rompt et l'expérience est terminée.

Les essais géomécaniques font à peu près la même chose avec des échantillons de géomatériaux ou *in situ*, en explicitant la relation effort/déformation, depuis la déformation pseudo-élastique jusqu'à la rupture en passant par la déformation plastique ; on peut ainsi caractériser une densité, un angle de frottement, une cohésion, un module..., du matériau à la profondeur de l'échantillon ou de l'essai ; les valeurs obtenues dépendent de l'appareil utilisé : aucun paramètre géomécanique n'est un véritable paramètre mécanique.

La plupart des modèles géomécaniques sont déterministes : une formule plus ou moins compliquée combine quelques paramètres schématisant la forme de l'ouvrage et le comportement du géomatériau pour délivrer un résultat unique ; c'est en fait une estimation qu'un coefficient de sécurité rend à-peu-près utilisable. Pour parvenir à ces formules et obtenir ce résultat, on procède graphiquement, analytiquement et/ou numériquement.

Normalement, la représentation graphique des mesures de l'un des essais géotechniques de base puis des résultats de calculs pratiques est une courbe complexe dans un espace à trois dimensions, effort/déformation/temps, débit/charge/temps... ; très difficile à tracer, elle est pratiquement impossible à manipuler. On préfère donc utiliser une à trois courbes, projections de la courbe tridimensionnelle dans un trièdre trirectangle, selon le type de comportement étudié, efforts/temps, déformations/temps, efforts/déformations. La construction graphique de la courbe lissant les points représentatifs des mesures correspond au passage analytique des accroissements finis à la différentielle.

Une traduction analytique de la courbe est une équation temporelle aux dérivées partielles, $F(t...; e, e'...; d, d'...) = 0$ que l'on sait généralement plus ou moins bien poser mais pas résoudre ; comme on l'a fait avec les courbes planes, on lui substitue donc une équation différentielle intemporelle, $f(e ; d, d'...) = 0$, que l'on peut plus ou moins facilement résoudre avec des conditions initiales et aux limites, valeurs particulières de la fonction, pas trop abstraites ; on considère parfois aussi $f(t ; e, e'...) = 0$ et/ou $f(t ; d, d'...) = 0$ si l'évolution du phénomène

dans le temps est particulièrement importante comme dans le cas des tassements de fondations.

Les valeurs des paramètres du système et celles de la fonction figurant les conditions initiales et/ou aux limites d'une intégration sont théoriquement celles que l'on considère comme très proches du cas étudié, ce qu'elles ne sont jamais en raison de la multiplicité et de la complexité des phénomènes et des situations réelles ; ce sont en fait des restrictions qui schématisent le milieu naturel autant que de besoin pour permettre l'intégration.

De plus, on ne sait intégrer que les équations différentielles simples ; celles qui ne le sont pas sont donc considérées comme des exceptions que l'on cherche à simplifier en négligeant les infiniment petits d'ordre >2 ou même en ne conservant que celui de premier ordre ; la technique du calcul infinitésimal pratique est fondée sur cette simplification qui peut entacher le résultat numérique final d'une erreur absolue importante ; en pratique, cela veut dire que graphiquement, on essaie toujours de lisser selon une droite, une parabole..., un semis de points représentations de couples de valeurs dépendantes et quand on ajuste une série de tels couples, on retient autant que possible une solution linéaire, sinon une solution binomiale, exponentielle ou logarithmique. C'est ainsi que lors des quatre expériences dont il rend compte, Darcy a mesuré le débit constant Q d'un filtre à sable vertical de 2,5 m de hauteur et de 0,35 m de diamètre, en faisant varier la nature et la granulométrie du sable, la hauteur de matériau filtrant L , la charge d'eau Δh et il a calculé les rapports $Q/\Delta h$ correspondants : les résultats de la première expérience portant sur dix mesures peuvent se mettre sous la forme $\Delta h \approx 0,3Q + 0,003Q^2 + \dots$; le terme du second degré modélisant la turbulence était effectivement assez faible pour être négligé. La dispersion de ses résultats portant sur une vingtaine de mesures, est de l'ordre de 15 % ; il en déduit avec une prudence dont nous avons oublié la pratique : *Il paraît donc que pour un sable de même nature, on peut admettre que le volume débité est proportionnel à la charge et en raison inverse de l'épaisseur de la couche traversée* ; selon son auteur lui-même, la très déterministe loi de Darcy, $Q \div \Delta h/L$, ne l'est pas autant que cela.

Tout calcul analytique de géomécanique est donc une série axiomatique de déductions fondées sur l'intégration d'une équation différentielle dans un cas particulier ; compte tenu de l'énorme imprécision métrologique qui affecte généralement les valeurs mesurées des paramètres géotechniques, l'accroissement de précision mathématique qui résulte du passage de l'utilisation des accroissements finis à celle de la différentielle, est tout à fait négligeable en pratique.

C'est la raison pour laquelle, grâce aux ordinateurs, les méthodes de calcul numérique fondées sur les accroissements finis, éléments finis, différences finies, éléments distincts, éléments aux limites... sont très efficaces et donc très utilisées en géotechnique ; mais le gain apparent de précision de la méthode numérique par rapport à la méthode analytique est assez illusoire, car le modèle numérique est lui aussi construit sur une accumulation d'hypothèses simplificatrices et d'approximations, sources d'imprécisions et d'erreurs, qui ont transformé le site et l'ouvrage en figures maillées et leur comportement en systèmes d'équations. Sur un tel modèle, en faisant plus ou moins varier les hypothèses

et/ou les conditions initiales, de longues séances successives de calculs identiques aboutissent à d'importantes différences de résultats qui ne traduisent pas les variations initiales, mais sont les effets difficiles à contrôler de la technique elle-même, ainsi que des facilités et erreurs de programmation, des arrondis et finalement de l'instabilité numérique qui résulte de tout cela. D'autre part, même si son comportement tend à devenir chaotique lors de longues séances de calcul, le modèle est déterministe alors que le prototype ne l'est pas ; pour le valider, la référence au terrain est indispensable ; c'est à peu près possible pour les modèles statiques, pas pour les modèles dynamiques avec lesquels la dérive du résultat final due aux itérations en fonction du temps peut devenir rapidement considérable. La précision du résultat final est donc pratiquement incontrôlable ; néanmoins sans fournir les réponses claires et définitives que l'on attend souvent d'elle, la méthode numérique permet d'apprécier correctement les tendances d'évolution connues et parfois même, d'en découvrir d'inconnues ou de négligées.

Le modèle probabiliste

Si l'on ne dispose que de nombreuses données brutes, plus ou moins désordonnées et peu compréhensibles, on peut bâtir un modèle probabiliste, ce qui implique le temps sagittal ; pour l'exploiter, il n'est pas nécessaire d'avoir analysé scientifiquement le phénomène étudié, d'avoir posé les équations déterministes qui modélisent son comportement, ni d'avoir caractérisé l'influence spécifique de chacune des grandeurs que l'on considère comme représentatives ; on peut se contenter d'en sélectionner et manipuler quelques-unes : si les résultats ainsi obtenus ne paraissent pas satisfaisants par étalonnage ou même intuitivement, on modifie autant de fois que de besoin les choix et/ou les manipulations. On tire des conjectures et non des certitudes : le rôle du manipulateur, le prévisionniste, est donc prépondérant et le résultat final n'est qu'un diagnostic, un pronostic, issu d'un scénario.

La base du modèle probabiliste type est la variation en fonction du temps orienté vers l'avenir et/ou du nombre de mesures, d'une grandeur représentative ; on la traduit graphiquement par une courbe cartésienne temps ou nombre/grandeur, « intensité » du phénomène. Ce genre de courbe est presque toujours difficile à interpréter tel quel ; en particulier, il ne peut pas être directement traduit par une fonction mathématique simple.

À partir d'une longue série de valeurs d'une grandeur aisément mesurable, on peut tenter d'y parvenir par une analyse spectrale : on attribue plus ou moins subjectivement une partie déterministe et une partie aléatoire à la grandeur en cause et on essaie successivement, en les ajustant puis en comparant les résultats obtenus à ceux espérés, quelques modèles comportant deux ou trois termes périodiques, un terme plus ou moins linéaire de tendance et un terme de bruit pour tout le reste : on obtient ainsi des images continues du phénomène et de ses variations, ce qui efface les pics singuliers que l'on cherche précisément à mettre en évidence. De plus, la continuité n'est pas une qualité essentielle des objets et des phénomènes naturels et les courtes séries dont on dispose, de valeurs de rares grandeurs susceptibles de caractériser la plupart d'entre eux, ne permettent pas des analyses spectrales sérieuses ; après un dur labeur et des

heures d'ordinateur, on n'arrive ainsi que très rarement à des résultats satisfaisants.

Plus simplement et peut-être un peu plus efficacement, on peut tenter une exploitation statistique en extrayant de la série des valeurs de la grandeur, une valeur moyenne, des extrêmes, un écart-type et quelques autres ; on la traduit graphiquement par un diagramme valeurs/nombre de valeurs. La distribution monomodale d'une série homogène, normale ou gaussienne, est alors représentée par une courbe en cloche, symétrique par rapport à la moyenne qui se confond avec le mode et la médiane, plus ou moins aiguë selon que l'écart-type est plus ou moins grand ; si la répartition de la série est plurimodale, la courbe comporte quelques pics caractéristiques, bien individualisés ; mais plus généralement, la courbe obtenue par lissage d'une répartition irrégulière présente de nombreux pics s'inscrivant dans une tendance générale ; elle est alors dissymétrique.

En procédant ainsi, on admet *a priori* que le modèle type du phénomène est la loi normale ; cela n'est licite que pour de petits écarts-types correspondant à des variations rapides et ordonnées, et à des fluctuations modérées ; or cela caractérise mal l'évolution d'un phénomène naturel, variations lentes et fluctuations importantes, traduites par un écart-type grand ; un écart-type extrême correspond à des fluctuations démesurées et ainsi qu'on le pense généralement, à une forte probabilité de réalisation d'un événement rare dont le phénomène est susceptible d'être le facteur ; la loi normale est donc rarement un modèle adéquat de forme et de comportement du géomatériau, dans l'étude du risque « naturel ».

En fait, une distribution plurimodale de mesures concernant par exemple différents matériaux d'un même site traduit son hétérogénéité ; chaque pic correspond à un élément distinct de la série qu'il serait imprudent de négliger sans réflexion : si un pic domine nettement les autres parce que l'élément correspondant est le plus fréquent, parce qu'il présente un caractère déterminant... on peut considérer en première approximation sans grand risque d'erreur que la série est monomodale et que le site est homogène ; si tous les pics ont à peu près la même hauteur parce que les éléments sont de même poids, il faut réorganiser la série en s'appuyant sur des modèles géomorphologiques et/ou structuraux pour répartir les mesures dans plusieurs séries monomodales, si possible une par matériau et/ou caractère. Et quand on a déterminé les valeurs moyenne, médiane, modale la plus fréquente, la plus forte, la plus faible... de la série correspondant à chacun, on ne sait pas laquelle doit être utilisée dans les calculs, car la courbe traduit le hasard mathématique pur, c'est-à-dire une évolution strictement aléatoire qui n'est jamais celle d'un phénomène naturel.

Avec le modèle valeurs/nombre, le temps disparaît ; cela n'est pas satisfaisant pour un modèle géotechnique. Pour le retrouver, on modélise la relation « intensité »/fréquence de la série ; en se référant implicitement à l'adage rarement justifié en réalité selon lequel ce qui est plus grand est d'autant plus rare, les fonctions modélisant les réalisations d'événements exceptionnels paraissent généralement exponentielles, faible intensité/grande fréquence ou forte intensité/petite fréquence ; on cherche donc à définir les intensités correspondant à des fréquences de probabilités données, généralement 0,1, 0,01 et

0,001 ; en lissant plus ou moins, on essaie de les rattacher à une droite en coordonnées semi-logarithmiques. On arrive ainsi au modèle type de prévision : la prob 0,1 est dite décennale, 0,01 centennale et 0,001 millennale, sans qu'en fait cela ait une véritable relation avec le temps. Mais, pour les intensités très variables de phénomènes naturels, on ne possède des séries à peu près continues de mesures fiables que depuis deux ou trois siècles ; l'aspect du semis de points des valeurs de prob supérieures à 0,01, les plus nombreuses, permet de se faire une idée de la pente de la droite, mais rien ne permet d'affirmer qu'elle demeure cette droite par extrapolation, de puissance de 10 en puissance de 10 ; on peut même affirmer qu'il n'en est presque jamais ainsi, car la stabilité à long terme n'est pas un caractère habituel des phénomènes naturels ; les valeurs de prob pluricentennales et millennales sont donc toujours des extrapolations hautement hasardeuses.

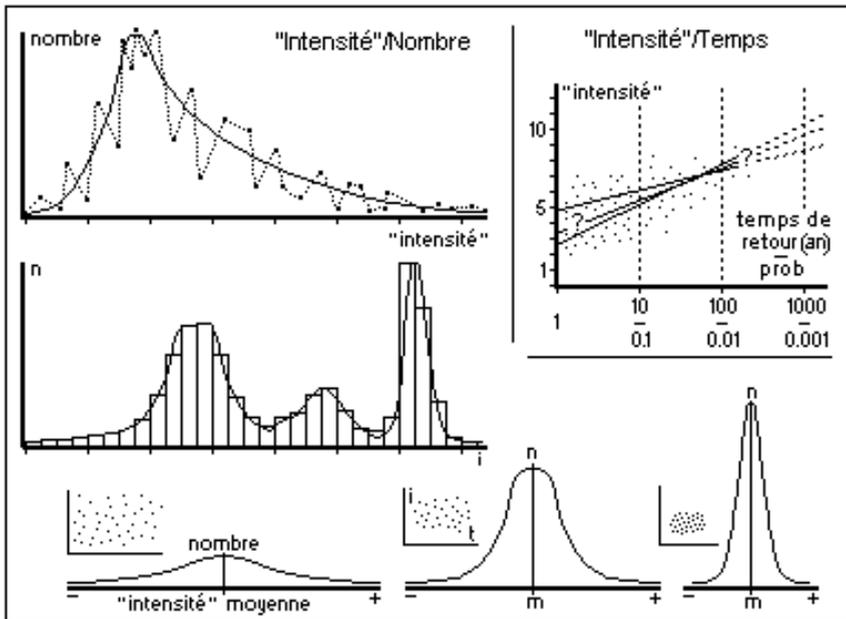


Figure 3.2.1.2.2.2 – Exploitation probabiliste de nombreuses données brutes

On a donc essayé de théoriser cela comme un système critique auto-organisé : l'exposant de la fréquence, compris entre 0 et 2 est la dimension fractale du système et la relation valeur/fréquence est l'expression de son bruit de scintillation ; on a vu à propos du tas de sable (Fig.3.1.2.7), que la stabilité d'un tel système est précaire, qu'il est très sensible aux perturbations même petites, et qu'après avoir été désorganisé, il se réarrange lui-même en acquérant une nouvelle stabilité tout aussi précaire que la précédente, au bout d'un laps de temps plus ou moins variable selon les circonstances ; la géotechnique montre que pour les mouvements de pentes comme pour la plupart des autres phéno-

mènes naturels, il en va à peu près ainsi ; c'est donc un beau modèle théorique dont la mise en œuvre pratique n'est pas pour demain.

Donc, associée ou non à la courbe en cloche, la droite en coordonnées semi-logarithmiques n'est vraisemblablement pas le modèle probabiliste représentatif des variations dans le temps de n'importe quel phénomène naturel, ainsi qu'on a pris l'habitude de le faire parce que, dans la plupart des cas, on ne dispose pas de meilleur modèle mathématique.

La géotechnique déterministe attribue sans distinction la dispersion des caractéristiques des phénomènes naturels aux hétérogénéités structurales et locales et au niveau de connaissance de ses paramètres, qualité de l'échantillonnage, quantité d'échantillons, choix et qualité des essais, précision des mesures... Elle les considère globalement comme des erreurs de mesures que l'on élimine, ce qui facilite un traitement statistique monomodal rarement justifié. Car entre autres, les formes et les comportements naturels ne sont pas aléatoires mais structurellement ordonnées dans l'espace et dans le temps ; leur apparent caractère aléatoire ne traduit qu'une insuffisance de compréhension, d'informations et de traitement ; en géotechnique, les modèles statistiques courants ne devraient donc être utilisés que faute de mieux, si l'on ne dispose que de mesures hétérogènes dont on ne comprend pas la structure : la même valeur brute de la dispersion mathématique d'une série de mesures non structurées traduit aussi bien l'hétérogénéité totale de la série que la juxtaposition de séries différentes ; les modèles géomorphologiques et géodynamiques leur seront toujours préférables pour ordonner les séries de telles mesures.

Les pétroliers et les mineurs, plus riches et plus exigeants que les géotechniciens, traitent convenablement par la géostatistique, les effets d'une inévitable dispersion naturelle des mesures. Cette discipline s'appuie sur le fait évident pour un géologue mais apparemment pas pour un géomécicien, que la répartition des valeurs de n'importe quel paramètre naturel paraît aléatoire à l'échelle de l'échantillon, mais est structurée à l'échelle du site ; elle considère que le paramètre est une variable régionalisée, parce qu'elle ne peut pas prendre n'importe quelle valeur n'importe où dans le site concerné ; à partir d'un nombre de mesures toujours faible qui dépend du niveau de l'étude et des moyens financiers disponibles, elle cherche à établir une fonction qui modélise la distribution réelle de la variable. Les modèles géostatistiques dissocient clairement les données concernant le site de celles concernant l'ouvrage ; ils caractérisent ensuite les sujétions d'étude et de réalisation qui en résultent et s'attachent plus particulièrement à la qualité de l'information sur le site et les matériaux qui le composent, données géomorphologiques, nombres de sondages, d'essais... de façon à travailler sur des séries homogènes de mesures.

La géostatistique linéaire est la seule économiquement accessible à la géotechnique ; elle impose une bonne connaissance géomorphologique et géodynamique du site, ce qui permet dès l'abord de structurer la série des mesures d'un paramètre en différents points du site, pour en régionaliser les valeurs et les corrélérer plus ou moins.

L'analyse factorielle serait une autre façon de traiter les séries plurimodales issues de mêmes objets ; par de très longs calculs matriciels, seulement

possibles à l'ordinateur, elle révélerait leurs caractères fondamentaux ; en fait, ceux que l'on obtient ainsi dépendent des choix, préférences et objectifs de l'opérateur qui peut reprendre ses calculs en modifiant leurs bases jusqu'à obtenir le résultat souhaité et en tirer des conclusions préétablies ; ce n'est donc pas une méthode recommandable en géotechnique.

Le modèle cyclique

Les fonctions périodiques sont des modèles cycliques mathématiques simples ; elles sont très utiles en macrophysique, mécanique, électrotechnique... pour rendre compte entre autre, de rotations par rapport à des points ou des axes fixes, de vibrations entretenues... Pour débroussailler les systèmes complexes évolutifs paraissant plus ou moins périodiques on dispose de la méthode de Fourier qui permet d'identifier et d'analyser des phénomènes apparemment plus ou moins périodiques, mais au-delà de trois périodes, de trois degrés de liberté et/ou de trois mobiles, de *trois corps*, les calculs deviennent rapidement inextricables et les solutions, difficilement interprétables. Pour la géotechnique, ces modèles cycliques ne sont pas très pertinents.

En effet, les modèles cycliques les plus judicieux, établis dès l'Antiquité, sont relatifs aux mouvements astraux qui du reste, ne paraissent effectivement cycliques que par rapport à un repère terrestre et pour des laps de temps relativement courts à l'échelle astronomique. Il nous en reste la notion de périodes de retour des événements naturels dangereux, annuelles, décennales, centennales, millénales... sur laquelle est imprudemment bâtie la prospective de ces événements. Car la périodicité des phénomènes naturels n'est qu'apparente, selon l'échelle de temps utilisée.

En géotechnique, les modèles cycliques ne sont utiles que pour l'étude du comportement d'ouvrages soumis à des vibrations naturelles ou provoquées du sous-sol qui les porte et éviter ainsi les effets de résonance susceptibles d'entraîner de graves dommages, voire la ruine.

3.2.2 Le modèle géotechnique de synthèse

Le modèle géotechnique de synthèse forme un ensemble indissociable de modèles analytiques spécifiques de forme, historiques et de comportements dont il est nécessaire de vérifier les cohérences propre et relationnelle ; il est donc composite et par là, très complexe. Ses qualités essentielles sont ses capacités de prévision et de justification de décisions constructives... ; sa manipulation doit permettre de décrire ce comportement le plus précisément possible, d'évaluer la probabilité de réalisation du risque modélisé et de décrire les conséquences de sa réalisation, afin de définir et de justifier les décisions qu'il pourrait être nécessaire de prendre en cas de crise.

Le modèle du mitraillage d'une route par des pierres qui pourraient se détacher d'une falaise, peut être vu comme la réunion de modèles mécaniques de chutes unitaires. Les circonstances et la fréquence des chutes, la durée et l'abondance des salves... précisent le modèle du phénomène naturel ; les caractéristiques de la route, largeur de la plate-forme, profil en travers, longueur de la zone

menacée... complètent le modèle technique ; le type de trafic, sa densité... déterminent le risque. En fonction de tout cela, la décision administrative peut être de placer un panneau « chute de pierres » dans la zone concernée, d'y interdire strictement le stationnement ou l'arrêt, de préparer des moyens rapides de nettoyage ou de déblayage de la chaussée, de purger, grillager, conforter la falaise, de dévier la route...

Pour schématiser le comportement dynamique général du modèle géotechnique synthétique, on peut l'analyser comme un effet ayant plusieurs causes selon un arbre générique, puis considérer que le modèle évolue par sauts successifs d'un état à un autre, dans des laps de temps variables, en étant régi par l'un ou l'autre des phénomènes modélisés analytiquement ; on peut utiliser pour cela des modèles-types causes/effets inspirés des graphes de Markov qui se prêtent bien à l'exploitation informatique. Dans les cas très complexes et de probabilité dangereuse réelle faible comme pour la plupart des risques induits par des phénomènes naturels, on peut simuler une complexité, un chaos organisés : on écrit plusieurs scénarios, généralement des systèmes d'équations déterministes ; ensuite, on les joue successivement au moyen de l'ordinateur, en faisant varier certaines conditions, puis en exploitant les résultats ainsi obtenus par une méthode de calcul des probabilités ; on en déduit que telle situation-type entraîne tel résultat à prob n , tel autre à prob n' ...

C'est à peu près ainsi que l'on étudie la stabilité d'un talus de hauteur et pente données par la méthode du glissement rotationnel circulaire de Fellenius (Fig. 2.3.2.3), en faisant varier les paramètres de Coulomb du matériau dans des limites définies au moyen de résultats d'essais et en calculant successivement pour des cercles supposés critiques, des valeurs de coefficients de sécurité auxquelles on attribue une illusoire portée probabiliste. Ce genre d'opération est analogue à une simulation de Monte-Carlo ; il en existe de nombreux logiciels plus ou moins spécifiques. Ses résultats doivent être reçus, interprétés et surtout manipulés avec beaucoup d'attention, de prudence, voire de réserve.

3.2.3 Représentativité des modèles

Un modèle, qu'il soit analytique ou synthétique, de forme, historique ou de comportemental, doit rendre compte de la réalité, en la simplifiant mais sans la déformer et encore moins en l'escamotant. Quand l'aspect d'un modèle et/ou sa manipulation conduit à un résultat manifestement aberrant, c'est que le modèle et/ou sa manipulation ne sont pas corrects ; il faut l'abandonner, en chercher un autre et non essayer de forcer la réalité à se plier à lui. Aucun glissement n'est rotationnel, circulaire et instantané, il n'y a pas de géomatériau réellement élastique au sens de la loi de Hooke, même si la sismologie est en partie bâtie sur elle, avec une efficacité évidente... Avec les modèles correspondants, on obtient des résultats qui ne sont que de grossières approximations ; on peut néanmoins les utiliser sans trop de risques en les minorant largement au moyen de confortables coefficients de sécurité qui sont en fait des coefficients d'ignorance, introduits dans des calculs dont la complexité est purement formelle et finalement assez vaine.

3.2.3.1 Matériau naturel, milieu géomécanique

Deux essais d'un même géomatériau, quel qu'il soit, réalisés avec le même appareil, par le même opérateur, ne donnent jamais le même résultat parce que deux échantillons, si proches qu'aient été leurs points de prélèvement, ne sont jamais strictement identiques. En fait, on détermine autant de valeurs de paramètres d'un géomatériau qui n'est jamais strictement le même, que d'échantillons, d'appareils, de procédures et d'opérateurs pour les mesurer.

Le milieu dont on utilise les valeurs de caractéristiques dans les calculs géomécaniques n'est jamais très représentatif du géomatériau dont on étudie le comportement : pour le théoricien, le premier doit être immuable, continu, homogène, isotrope et libre alors que pour le praticien, le second est variable, discontinu, hétérogène, anisotrope et confiné.

3.2.3.2 Structures naturelles, figures géomécaniques

Un modèle géométrique réaliste de site est toujours difficile à établir ; il doit être compatible avec les modèles de la géomorphologie et de la géologie structurale qui sont très nombreux, variés, généralement compliqués, difficiles à identifier et à figurer.

À toutes échelles, une carte topographique et/ou un plan de géomètre représentent bien la surface d'un site géotechnique. Aux petites échelles, la représentation du sous-sol du site peut être établie par référence à un modèle type de la géologie structurale et de la géomorphologie, complétée par des observations de surface ; une formation sédimentaire plissée, un massif granitique faillé, une cuesta karstique, un versant de colline instable, une plaine alluviale inondable... présentent des structures et des organisations très caractéristiques et suffisamment différenciées pour que l'on ne risque pas de les représenter par des modèles aberrants ; aux grandes échelles, le risque est plus important, car on doit intégrer au modèle type, les renseignements recueillis spécifiquement lors de l'étude détaillée du sous-sol du site, de façon que le modèle correspondant soit compatible avec le type. Si un renseignement spécifique paraît ne pas pouvoir s'inscrire dans ce modèle, c'est le plus souvent qu'il est erroné ; il faut alors chercher et corriger l'erreur et non bâtir un modèle intégrant le renseignement douteux et s'écartant du modèle type. Toutefois, la démarche la plus fréquente est d'ignorer qu'il existe de bons modèles types et d'en construire un, exclusivement géométrique et donc tout à fait irréaliste, qui ne représente que les conditions aux limites permettant d'intégrer l'équation différentielle que l'on va utiliser comme modèle de base du comportement auquel on s'intéresse.

Le massif homogène, isotrope, et semi-infini, les couches homogènes, horizontales et d'épaisseurs constantes, le versant à pente constante, le glissement circulaire... n'existent que dans l'imaginaire des géomécaniciens ; ce sont les images simplistes d'une réalité beaucoup plus complexe à laquelle est constamment confronté le praticien.

3.2.3.3 Phénomènes naturels, modèles de comportements

Avant de poser et d'intégrer l'équation modèle d'un comportement géomécanique, il importe de l'identifier et d'en inventorier les modèles types ; c'est ce que permet la géodynamique. Les modèles géodynamiques sont eux aussi, nombreux et variés ; les modèles géomécaniques qu'on peut leur faire correspondre, sont au contraire très peu nombreux et relativement analogues puisque la plupart sont fondés sur l'intégration particulière d'une même équation dans des conditions aux limites différentes. La modélisation comportementale d'un site doit donc être en premier lieu et principalement, fondée sur la géodynamique. C'est rarement le cas et le modèle mathématique de comportement que l'on utilise exclusivement ne représente finalement que lui-même.

Le géomatériau n'est pas immuable. Or, les seuls modèles géomécaniques qui tiennent compte du temps sont ceux liés à l'écoulement de l'eau dans le géomatériau, qui n'est évidemment pas un phénomène statique. C'est la raison pour laquelle le modèle de consolidation de Terzaghi est l'un des rares modèles mathématiques réellement efficace de la géomécanique ; il rend bien compte de l'évolution du tassement dans le temps. D'autres modèles traitent la plastorupture comme s'il s'agissait d'un comportement instantané, ce qui est assez surprenant ; on ne doit donc pas trop s'étonner de leur manque d'efficacité.

Dans les cas simples ou simplifiés comme les dimensionnements de fondations ou de soutènements, les modèles géomécaniques de comportements sont des formules traduisant une relation de cause à effet et permettant de calculer un état final statique instantanément atteint à partir d'un état initial statique. Dans les cas complexes, ce sont des documents évolutifs construits à partir de mesures de paramètres variables dans le temps, comme une série de cartes et de coupes établies à des dates successives, pour représenter un glissement de terrain dans sa phase de déformation plastique, avant que se produise éventuellement la rupture calculée selon Rankine ou Fellenius. Les modèles numériques d'évolution future peuvent créer une série de tels documents figurant des déplacements successifs par sauts, soit d'éléments discrets du massif, plus ou moins mobiles mais corrélés par des lois de comportement, depuis leurs positions initiales qui figurent l'état initial du massif, jusqu'à leurs positions finales qui figurent l'état final du massif que l'on veut déterminer, comme quand on étudie les déformations futures d'une cavité artificielle, galerie, quartier de mine, soit d'une zone mobile particulière du massif dont on veut suivre le déplacement, comme quand on étudie la propagation d'une pollution dans une nappe.

3.2.4 Validation des modèles – validité des résultats

C'est évidemment en manipulant des modèles proches de la réalité sans être trop compliqués, bâtis à partir de données fiables et précises que l'on obtient les meilleurs résultats géotechniques, mais quoi qu'il en soit, on ne pourra jamais atteindre la précision absolue : la construction et la manipulation de modèles sont des exercices permanents de simplifications fondés sur des théories et même des hypothèses issues de différentes disciplines, portant sur des données disparates et des processus fluctuants ; cela introduit à tous les niveaux de la

démarche des incertitudes de natures fondamentalement différentes, géologiques, géomorphologiques... sur la forme du site, géodynamique, géomécanique... sur son comportement, de conception, de construction, de maintenance sur les ouvrages ; des imprécisions de toutes sortes souvent importantes altèrent les valeurs des paramètres et on connaît mal l'influence des paramètres les uns sur les autres ; il en résulte une incertitude générale sur le processus et le résultat qui en altère évidemment la qualité pratique, la plus importante à connaître pour le projeteur et le décideur.

Le résultat d'une simulation, et la manipulation d'un modèle en est une, quelle qu'en soit la qualité, est toujours entaché d'erreurs systématiques et/ou matérielles ; l'analyse du comportement réel n'est jamais parfaite, les données sont mal définies et/ou insuffisantes, les processus sont plus ou moins rigoureux, les mesures sont approximatives, les valeurs des paramètres n'ont pas la précision mathématique... En fait, de façon assez paradoxale, les imprécisions et les erreurs peuvent plus ou moins se compenser ; les arrondis de calculs successifs entraînent que la précision des résultats intermédiaires décroît jusqu'à atteindre ou même dépasser l'imprécision des données de départ ; en faisant varier les conditions initiales dans les limites de cette imprécision, les résultats de simulations successives, même entachées d'imprécisions systématiques de calcul, sont de toute façon différents. S'ils sont assez nombreux, une exploitation statistique de la série permet ainsi d'obtenir un résultat global dont on pourrait en principe calculer la probabilité.

Le seul moyen de valider expérimentalement le résultat d'une simulation au moyen d'un modèle géotechnique serait d'en confronter le résultat à la réalité, c'est-à-dire de comparer la prévision à l'événement après qu'il se soit produit : tel ouvrage va tasser de tant en tel laps de temps, tel autre pourra subir un séisme de telle intensité sans s'écrouler ou même fissurer... ; en matière d'aménagement et construction d'ouvrages, sauf dans des cas simples et non dangereux comme l'essai destructif d'un pieu ou d'un tirant au début d'un important chantier, cela n'est pas possible. On ne peut évidemment pas expérimenter, provoquer un dommage réel à l'ouvrage pour analyser son déroulement et toutes ses conséquences ; la référence à des dommages déjà subis par des ouvrages comparables dans des sites semblables, la validation par l'expérience et l'histoire, laissent une place importante à l'imprécision, car pas plus que les sites et les ouvrages, des dommages comparables ne sont jamais identiques mais seulement plus ou moins analogues ; on peut être assuré que ce qui s'est passé là, ne se passera jamais de la même façon ici.

Reste donc la validation virtuelle basée sur l'expérience et l'expertise du praticien ; elle doit être conduite de façon particulièrement rigoureuse en analysant à tous les niveaux les éléments de la démarche générale, identification du phénomène, définition du risque, énoncé des hypothèses, recueil des données, construction du modèle, qualité de sa manipulation, comparaison des résultats obtenus avec ceux attendus...

Quoi que l'on fasse, le résultat de la manipulation d'un modèle géotechnique qui doit toujours être interprété par un prévisionniste sera donc inévitablement entaché d'erreur qu'il ne sera pas toujours possible de quantifier : on n'obtient ainsi que des tendances et des ordres de grandeur. Il importera de s'en souvenir

quand, à partir d'un tel résultat, on devra prendre une décision constructive et dimensionner une partie d'ouvrage en relation directe avec le géomatériau ou quand on mettra au point la gestion d'un risque « naturel ».

Ainsi, la valeur de tout résultat géotechnique, quel que soit le soin que l'on ait mis à l'obtenir, impose qu'il soit utilisé avec prudence et même avec circonspection sinon avec méfiance. Cela ne veut pas dire qu'il ne faille pas tout faire pour en obtenir qui soient les meilleurs possibles.

Le site de construction d'un ouvrage est l'objet fondamental de la géotechnique pratique ; c'est un ensemble indissociable constitué par le géomatériau, sols, roches et eau, dont est fait le sous-sol du site et l'ouvrage ; il est soumis aux effets de phénomènes naturels ou induits qui modifient plus ou moins l'état du site et éventuellement de l'ouvrage ; dans certains sites, ces effets peuvent être des facteurs de risques.

4.1 Le géomatériau

Le vocabulaire géologique est très riche en noms de sols et roches de toutes natures et de tous lieux, dûment répertoriés, décrits et classés par la pétrographie ; celui de la géomécanique est indigent : grave, sable, limon, argile pour n'importe quel sol ; marne, calcaire, granite pour la plupart des roches. En géotechnique, il n'est pas toujours nécessaire de désigner spécifiquement les uns ou les autres, car on ne les distingue généralement que par des valeurs différentes de mêmes paramètres ; et même il serait souvent ambigu de le faire, car cela pourrait sous-entendre que des caractères communs à tous seraient particuliers à certains. Pour désigner indistinctement les sols et roches constituant la subsurface de la Terre, là où nous pouvons directement intervenir pour réaliser des aménagements et construire des ouvrages, géomatériau est le terme générique qui me paraît convenir.

Le concept de géomatériau peut alors paraître vide de sens tant il est divers, hétérogène et variable, à quel niveau d'espace ou de temps auquel on le considère. C'est néanmoins un objet clairement défini qui se distingue nettement d'autres objets naturels : où que vous soyez, ramassez n'importe quel bout de géomatériau à vos pieds et demandez à quiconque ce dont il s'agit ; il vous répondra au moins que c'est un caillou ou de la terre et que, si vous l'envoyez en l'air, il retombera. Si votre interlocuteur est savant, il dira qu'il s'agit d'une roche ou d'un sol, soumis à la gravité terrestre.

Les matériaux terrestres profonds et les « géomatériaux » artificiels, bétons, céramiques, verres, géotextiles... n'entrent pas dans le champ de cet essai.

4.1.1 Caractères généraux

La diversité du géomatériau est évidente, de la vase la plus molle au quartzite le plus dur, en passant par toutes les roches dures ou meubles de la création dont il existe autant d'espèces que d'endroits où l'on a recueilli et décrit un échantillon,

en négligeant ceux que l'on n'a pas recueillis, que l'on n'a pas décrits ou que l'on aurait trouvés à un endroit que personne n'a visité. En fait, les noms de roches se rapportent à des types génériques et non à des espèces ; sur un volcan, on observe autant de basaltes différents que d'échantillons ramassés ; il y en a donc bien davantage ; cependant tant sur une coulée que sous forme de bombe ou de cendre, ils ont un air de famille qui permet de les attribuer à ce volcan et tous les basaltes de la Terre, tant volcaniques que crustaux, se ressemblent plus ou moins ; cela permet de leur donner un même nom et de leur attribuer des caractères analogues. Il en va de même de toutes les roches et de tous les sols. Des dalles géométriquement identiques, découpées à la scie dans le granite d'une même carrière ont, si on les regarde bien, des compositions cristallines, des tailles et des arrangements de cristaux assez différents pour qu'on puisse ne pas les confondre ; il est néanmoins clair qu'elles sont issues de la même carrière, même si l'on ignore celle dont il s'agit, et alors il est toujours possible de l'identifier. Les alluvions compressibles de la plaine viennoise du Danube sont certainement très spécifiques ; elles sont aussi suffisamment génériques pour que la théorie de Terzaghi qui les concernait en premier lieu, ait pu être étendue avec succès à tous les sols compressibles de la planète.

Le géomatériau est aussi assez hétérogène, mais au cas par cas, de façon compréhensible et dans des limites assez étroites ; ce que les géologues appellent formations sont des ensembles cohérents et structurés et non des magmas confus, aléatoirement désordonnés. Le concept de formation permet de dire que deux échantillons analogues mais pas identiques représentent le matériau d'un même ensemble et que ce matériau se retrouve dans la totalité de l'ensemble. À la stricte classification physique qui impose la différence dès qu'il n'y a plus identité, il faut substituer la souple classification géologique qui admet l'analogie en hiérarchisant les différences et en tenant compte des ressemblances. Ces ensembles eux-mêmes ne sont pas aléatoirement distribués ; leurs corrélations traduisent des arrangements d'ordres supérieurs ; les cristaux ou grains s'arrangent en roches qui elles-mêmes s'arrangent en formation, puis en unités structurales, ensembles structuraux, continents, plaques... La notion d'homogénéité du géomatériau, nécessaire à la géomécanique, est donc liée à l'échelle d'observation. Pour le géotechnicien cela ramène au site, ensemble structuré de formations composées de matériaux analogues que l'on va aménager et/ou dans lequel on va construire un ouvrage. Mais il n'existe pas deux sites identiques ou même seulement analogues et s'il en existait, ils n'évolueraient pas de la même façon.

Car le géomatériau n'est pas immuable. Cela va de soi du point de vue de la géodynamique qui étudie précisément l'altération, l'érosion, le transport, la sédimentation, la diagenèse et quelques autres phénomènes qui contribuent à son évolution incessante. Au contraire, la géomécanique considère le temps comme une dimension plutôt que comme un paramètre ; elle définit les états successifs du matériau sans trop se préoccuper de la façon dont il passe de l'un à l'autre et en particulier de la raison et de la durée du passage. Cette conception est évidemment calquée sur celle de la mécanique rationnelle qui soumet des objets immuables, parfois successivement mais jamais simultanément, à la statique, à la cinématique et à la dynamique. Elle conduit à considérer que l'état d'un ensemble ne peut changer que de façon discrète, par action extérieure,

alors qu'en réalité, la modification plus ou moins continue dans le temps, de tout ou partie du matériau de l'ensemble est la raison déterminante du changement d'état de l'ensemble. Un remblai sur sol mou qui aurait été instable s'il avait été construit rapidement, ne le sera pas si sa construction est suffisamment lente pour que la compacité du sol s'accroisse assez par consolidation. La géomécanique ne sait pas résoudre directement le problème de la durée prévisible de la construction pour que la stabilité soit assurée ; elle permet seulement de faire varier itérativement les valeurs des trois constantes de la loi de Coulomb dans une curieuse démarche impliquant simultanément les théories de Boussinesq, de Rankine ou de Fellenius et qui ne sont pas compatibles, jusqu'à trouver les valeurs qui correspondent à l'équilibre, en espérant qu'elles seront un jour atteintes. Il faudra ensuite essayer de prévoir ce jour par la méthode de Terzaghi qui par la même occasion, expliquera à peu près pourquoi et comment la stabilité sera atteinte.

Tout cela est bien compliqué et on peut toujours douter de la pertinence du concept de géomatériau. Le matériau de la géologie et celui de la géomécanique paraissent totalement différents ; le premier est effectivement divers, hétérogène et variable alors que le second devrait être autant que possible unique, homogène et constant. Ils ne sont évidemment pas aussi différents que cela. Pour les voir sous le même aspect, on doit oublier un moment leur nature et s'intéresser à leur état. Pour le géologue, cet état résulte de processus continus qui modifient de façon cohérente le géomatériau en perpétuel mouvement ; de la profondeur à la surface il passe de l'état de roche à celui de sol par l'altération et l'érosion ; ensuite, de la surface à la profondeur, il passe de l'état de sol à celui de roche par la diagenèse puis éventuellement, par le métamorphisme. Il existe donc bien un et un seul géomatériau dont les transformations se font à une échelle de temps qui n'a pas de commune mesure avec celle de l'homme ; c'est ce qui explique la diversité apparente que nous lui attribuons. Le géomatériau est pesant, bien que Boussinesq ne s'accommode pas de cela ; et comme il est inévitablement soumis au champ gravitaire, sa densité s'accroît avec la profondeur ; le géomécanicien dit ou devrait dire s'il en était conscient, que le géomatériau est normalement consolidé quand sa densité est optimum à la profondeur où il se trouve, sous-consolidé quand elle est plus faible et surconsolidé quand elle est plus forte ; à peu de choses près, le premier état correspond à un sol courant, le deuxième à un sol ou à un remblai récents, le troisième à une roche. En subsurface, une charge ou une excavation peuvent plus ou moins modifier ces états ; plus généralement dans la nature, le changement d'état du géomatériau est beaucoup plus lent que le mouvement qui l'anime ; c'est la raison pour laquelle se côtoient en surface des roches et des sols divers, hétérogènes et variés qui sont en fait les états transitoires d'un même géomatériau tant géologique que physique.

Il est donc effectivement possible de considérer le géomatériau comme un seul objet. C'est un ensemble continu et organisé d'espèces dont la nature, la structure, la situation et le comportement ne sont pas aléatoires mais présentent au contraire, des relations d'incidences et d'inclusions plus ou moins hiérarchisées, de sorte qu'il est possible de les répartir en sous-ensembles de divers niveaux, d'extension analogue à une échelle d'observation donnée, et hiérarchisés selon l'échelle d'observation.

Pour le décrire, il faut considérer sa morphologie qui rend compte de sa diversité et de son hétérogénéité, sa paramétrie qui essaie de lui donner un semblant d'unité et d'homogénéité et sa dynamique qui rend compte de sa variabilité.

4.1.1.1 Morphologie

La morphologie structurale, souterraine, du géomatériau inclut sa nature et sa structure. Par nature, il faut entendre l'ensemble des éléments, des caractères et des propriétés qui définissent un invariant donné à un niveau d'organisation donné, cristal d'orthose, poche de vase, dune de sable, filon d'aplite, couche de craie, coulée de basalte... Par structure, il faut entendre la façon dont cet ensemble est agencé, réseau réticulaire, schistosité, stratification, plis isopaque, nappe de charriage... Elles sont généralement liées ; un cristal est toujours réticulaire, un granite n'est jamais sédimentaire, il n'y a pas de calcaire récifal dans une série sédimentaire continentale... Cela permet de considérer la morphologie du matériau comme l'unique composant descriptif de son état, incluant aussi sa situation et les effets des phénomènes passés qui l'ont affecté.

À l'échelle de temps qui intéresse la géotechnique, le géomatériau est à peu près fixe dans l'espace, mais d'un endroit à un autre, des matériaux analogues comme un granite de Bretagne et un autre des Alpes, ont des aspects différents, aussi bien parce qu'ils ne sont pas strictement de même nature et de même structure que parce qu'ils ont subi et subissent les effets de phénomènes internes puis externes différents ; c'est ce qu'enseigne la géomorphologie. Le temps passé à l'échelle géologique est aussi une composante de la morphologie car l'aspect actuel du géomatériau à un endroit donné est aussi le résultat d'une évolution continue ; les formations houillères à peu près contemporaines du Massif central, du Nord-Pas-de-Calais ou des Alpes ont eu des histoires postérieures très différentes ce qui leur a fait acquérir des caractères propres qui permettent de les distinguer aisément ; c'est ce qu'enseignent la sédimentologie et la tectonique.

L'organisation spatiale du géomatériau est particulièrement vaste et complexe ; elle va de la planète Terre à la particule nucléaire. Bien entendu, pour le géotechnicien, les niveaux d'organisation à l'échelle humaine sont ceux qui importent le plus ; ce sont celui de la formation qu'un homme peut voir et parcourir, de l'affleurement sur lequel il peut stationner, et de l'échantillon qu'il peut manipuler. Mais la formation est l'élément d'un ensemble plus vaste comme l'échantillon est l'ensemble d'éléments plus petits. En fait, l'échantillon, ne représente pas plus l'élément de l'affleurement que ce dernier ne représente l'ensemble de la formation ; un affleurement n'est pas qu'une réunion d'échantillons ; une formation n'est pas un ensemble d'affleurements ; les conditions aux limites de l'échantillon avant qu'on le prélève, sont totalement différentes de ce qu'elles sont après qu'on l'ai fait, et dans une même formation, les conditions aux limites de tel affleurement ne sont jamais les mêmes que celles de tel autre.

Pour décrire correctement la morphostructure du géomatériau, il faut donc considérer aussi les niveaux d'organisations supérieurs et inférieurs à ceux de l'homme. Il ne peut évidemment pas être ici question de détailler tout cela ; c'est à peu près le fond des études de base de la géologie et de la microphysique,

que tout géotechnicien devrait connaître ou apprendre. Très schématiquement, les niveaux supérieurs à l'homme sont successivement le globe puis sa croûte, les plaques qui la composent, leurs zones basaltiques, granitiques ou sédimentaires, les continents, zones essentiellement granitiques des plaques, les plates-formes, bassins, grabens, hertz, chaînes... continentaux, les ensembles structuraux métamorphiques, intrusifs, sédimentaires horizontaux, monoclinaux, plissés, charriés, fracturés... les unités structurales, formation, plis, batholite... Les niveaux inférieurs à l'homme sont le cristal ou le grain, l'atome et la particule. La complexité est évidemment descendante puisqu'un élément de niveau supérieur est un ensemble pour les éléments de niveau inférieur. Pour analyser et décrire un objet d'un certain niveau, il faut le placer dans son contexte, c'est-à-dire considérer l'ensemble de niveau supérieur auquel il appartient ; c'est généralement à partir de lui que l'on fixe les conditions aux limites de l'élément d'ordre inférieur.

4.1.1.2 Paramétrie

L'extrême complexité morphologique du géomatériau ne se retrouve pas dans sa paramétrie. Cela est dû au fait qu'à propos de morphologie, on est obligé d'être objectif en constatant ce qui existe, alors qu'en établissant une paramétrie, on peut être subjectif et ne retenir que ce à quoi on s'intéresse. Mais décrire numériquement le géomatériau au moyen de quelques paramètres, en ignorant délibérément ou non qu'ils concernent un objet d'une grande complexité, est extrêmement réducteur.

Aux niveaux supérieurs à celui de l'échantillon ou de l'essai *in situ*, les paramètres sont géométriques et de champs ; il s'agit essentiellement pour les premiers, des trois dimensions et des angles, pour les seconds, de la densité, de la vitesse sismique, de la résistivité électrique, de la susceptibilité magnétique... Au niveau de l'échantillon, on trouve tout ce qu'a défini la mécanique des sols traditionnelle, paramètres d'identification, granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg... paramètres hydrauliques, porosité, perméabilité... paramètres mécaniques, densité, modules, angle de frottement, cohésion... Aucun de ces paramètres ne représente quel géomatériau que ce soit ; une valeur de n'importe lequel d'entre eux ne caractérise qu'un aspect fugitif de l'objet dans lequel on la mesure ; il n'est pas possible de corréler strictement deux paramètres. Pour déterminer si un certain talus va glisser, il est préférable de s'intéresser d'abord à la morphologie de ses environs qu'à l'angle de frottement du matériau qui le constitue et qu'en fait, on ne sait pas mesurer, si toutefois il existe réellement ou même si cela a un sens.

4.1.1.3 Comportement

Le comportement naturel du géomatériau est dynamique ; il évolue et se transforme tant naturellement qu'artificiellement. Néanmoins, dans la plupart des cas qu'elle étudie, la géomécanique n'envisage que le comportement statique d'un milieu invariable. Paradoxalement, la rupture elle-même est analysée comme le passage instantané d'un état stationnaire à un autre, sans que l'inertie intervienne dans les calculs. Et pourtant, la forme, le déroulement et les effets d'un glissement dépendent bien aussi de sa masse et de sa vitesse.

► Dynamique

La dynamique du géomatériau est dite interne quand elle concerne ce qui se passe en profondeur et externe quand elle concerne ce qui se passe en surface. Elle traduit le mécanisme des phénomènes naturels.

En interne, la géotechnique ne s'intéresse pratiquement qu'au volcanisme, à la sismicité et à l'ajustement isostatique quand il fait varier le niveau du rivage comme sur les bords de la Baltique.

En externe, la palette qu'elle ignore en fait est beaucoup plus large. La désagrégation, dégradation mécanique et l'altération, dégradation chimique du géomatériau quel qu'il soit, transforment la roche en sol et la préparent à l'érosion sous ses diverses formes et par divers agents ; il en résulte qu'une roche devient un sol que la gravité, la glace, l'eau ou le vent, va déplacer, ce qui permet à la désagrégation et à l'altération de se poursuivre. Un pan de falaise peut s'écrouler suivant plusieurs processus s'enchaînant de diverses façons ; au départ, dans tous les cas, la relaxation en surface des contraintes naturelles résultant d'actions antérieures auxquelles a été soumis le géomatériau en profondeur, ouvre la fissuration potentielle d'un réseau de diaclases et éventuellement de stratification, de schistosité et/ou de fracturation ; en montagne, les alternances de gel/dégel fragilisent davantage la roche et l'eau infiltrée dans les fissures agit comme un coin en gelant, faisant se détacher des blocs plus ou moins volumineux qui vont alimenter l'éboulis qui s'accumule en pied ; à moyenne ou basse altitude, si la falaise domine un coteau marneux, les éboulements s'y produisent après que le coteau ait subi des glissements successifs jusqu'à mettre le pied de la falaise en porte-à-faux ; au bord de la mer ou sur les rives concaves des rivières encaissées, c'est l'eau chargée de sable ou de galets qui sape directement le pied de la falaise et au bord d'un désert de sable, ce peut être le vent. La géomécanique est tout à fait incapable de décrire ce genre de comportements car les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement du matériau de la falaise au moment où il s'écroule, ne sont pas connues ; on ne sait même pas si la référence à ces paramètres a un sens dans ce cas ; et de toutes façons, la géomécanique ignore le processus qui les amène à ces valeurs critiques.

La diagenèse est le processus inverse qui transforme les sols en roches en les compactant, par le seul effet de la gravité sur des grains juxtaposés, évidemment pesants, que la sédimentation d'autres grains charge progressivement ; elle est très lente et les sols récents sont généralement peu consolidés. Son mécanisme de base est la réduction de la porosité du sol et l'expulsion de l'eau qu'il contient ; la théorie de Terzaghi et l'essai œdométrique en sont de bons modèles ; ce sont même pratiquement les seuls modèles géomécaniques qui représentent à peu près correctement la réalité, sans doute parce que la réalité est dynamique et que ces modèles le sont aussi ; le temps est un de leurs paramètres. Par référence à la loi de Hooke dont on verra plus loin qu'elle n'a pas grand-chose à faire là, les puristes leur reprochent d'être unidimensionnels mais la déformation latérale d'un sol chargé est rarement observable, si elle existe réellement, en dehors de la rupture d'une fondation par poinçonnement, ce qui n'a rien à voir avec la consolidation. La consolidation artificielle d'un sol s'obtient par ce processus, au moyen d'une charge dynamique ou statique ; le résultat naturel ou artificiel est toujours une diminution de volume du matériau qui s'exprime par un tassement, un

accroissement de sa densité et donc de ses caractéristiques mécaniques, module, cohésion, angle de frottement, ainsi qu'une diminution de sa porosité et donc de sa perméabilité ; si la charge est dynamique, l'opération est un compactage et si elle est statique, le résultat est un tassement. On utilise ce processus, essentiel en géotechnique, quand on compacte un sol d'assise de chaussée ou un remblai, quand on surcharge une assise de remblai pour améliorer sa portance... et on le constate quand un ouvrage tasse.

► Statique

À l'exception de la consolidation qui est bien un comportement dynamique du géomatériau, ses autres comportements mécaniques sont modélisés comme si ses états successifs étaient stables et comme si son évolution résultait d'actions instantanées. Le temps n'est jamais un paramètre des modèles mathématiques correspondants.

La loi de Hooke décrit l'allongement et le rétrécissement d'un fil métallique soumis à une traction. Selon elle, la déformation élastique du géomatériau sous l'effet d'une charge, serait instantanée, faible, et réversible alors que la consolidation d'un sol est plus ou moins lente, forte et permanente ; il est donc difficile d'admettre qu'elle est un modèle acceptable de la déformation du géomatériau et Hooke ne l'a même pas envisagé ; aucun module de la géomécanique n'est de près ou de loin un module de Young et le coefficient de Poisson n'est parfois évoqué dans les calculs que pour faire savant. En pratique, quand il s'agit de calculer le tassement d'un ouvrage, la déformation élastique est négligeable, comparée à la déformation de consolidation ; la réversibilité éventuelle de la déformation est sans intérêt géotechnique car, à l'exception des silos et des réservoirs ou de l'effet du vent sur les ouvrages très hauts, les charges de la plupart des ouvrages sont constantes. La seule application directe acceptable de la théorie de l'élasticité en géotechnique est en fait le calcul sismique : quand le sol vibre, l'effort est très rapide, très faible, alternatif, de courte durée et la déformation n'est pas permanente. Pour le reste, on peut éventuellement l'utiliser comme un grossier modèle vaguement analogique, une charge rapportée à un module donne un tassement.

En statique, la loi de Coulomb stipule que l'équilibre du point gêné dépend d'un coefficient de frottement, rapport de la force de réaction à la force d'action dont la résultante doit être nulle ; à partir de cette loi, Coulomb a défini un angle de frottement puis résolu le problème de l'équilibre d'un point pesant reposant avec frottement sur un plan incliné ; l'angle de frottement est égal à l'angle du plan à partir duquel le point n'est plus en équilibre. Cela s'apprend au lycée mais n'a pas grand-chose à voir avec la géotechnique. La loi géotechnique de Coulomb est une adaptation par son auteur de la loi statique, pour résoudre le problème de l'équilibre d'un remblai en cours de construction ; en prenant du grade, Coulomb est passé du déplacement d'affûts de canons dans une rue mal pavée et en pente à celui de la construction de fortifications ; il a ainsi créé la mécanique des sols sans trop s'en rendre compte. Mais un remblai en cours de construction et encore moins un poids sur une planche inclinée, ne sont des sols ; Coulomb le savait mais là n'était pas son problème : un remblai frais est effectivement stable à partir d'un certain angle de talus que rien n'interdisait

d'appeler angle de frottement pour rappeler l'angle du plan ; quand on compacte le remblai ou bien quand il vieillit et se compacte par gravité ; il acquiert ce qu'il n'était pas interdit d'appeler cohésion, par la vertu de laquelle son angle de talus s'accroît parfois jusqu'à la verticale et qu'ainsi son équilibre s'améliore. Tout cela est logique, réel, le résultat est acceptable et la boîte de Casagrande permet de le vérifier. Ce l'est moins quand on passe au géomatériau ; avant de rompre parce qu'on le charge trop, il se produit autour de la charge, des déformations élastiques, plastiques ou même, si curieux que cela puisse paraître, de consolidation, dont la loi de Coulomb ne rend pas compte ; quand il s'agit de l'équilibre d'un talus tant naturel qu'après terrassement, les conditions du problème sont à l'inverse de celles du problème de l'équilibre d'un talus de remblai ; il perd de la cohésion avant de glisser ; à moins de faire une série de calculs itératifs dont les résultats seront des conjectures et non des certitudes, rien ne permet d'estimer et encore moins de mesurer quelle est la valeur correspondante de la cohésion. On peut néanmoins utiliser la loi de Coulomb comme un grossier modèle vaguement analogique ; quand on charge trop un sol, il rompt ; quand un talus présente une pente trop raide, il glisse ; dans chaque cas, trop s'exprime par une formule simple d'équilibre de forces.

► **Hydraulique**

En hydraulique souterraine, le géomatériau est un réservoir ou une conduite pour l'eau qu'il contient ; c'est au comportement de cette dernière que l'on s'intéresse mais bien entendu, certaines caractéristiques du matériau le déterminent en partie.

Comme réservoir, l'eau y a une pression dite interstitielle quand il est très peu perméable, hydrostatique quand l'eau est à peu près immobile, de courant quand elle circule ; les deux premières sont assez faciles à mesurer *in situ*, la dernière, moins. Elles ont néanmoins chacune une réalité physique indéniable ; la première intervient dans la consolidation, la seconde, dans l'équilibre d'ouvrages enterrés et la production de points d'eau, la troisième, dans les phénomènes de renard.

Comme conduite, l'eau circule dans ses interstices. Quand ils sont suffisamment grands et continus pour que la circulation soit analogue à un écoulement de surface, on dit que le matériau est perméable en grand ; quand il s'agit de pores et/ou de fissures plus ou moins fins mais reliés entre eux, on dit qu'il est perméable en petit. Le premier cas est celui d'un réseau karstique ; la description du réseau, l'étude et la modélisation de l'écoulement sont très difficiles, surtout quand le réseau est dénoyé. Le second est celui des sables, grès et roches fissurées non karstiques, des graves alluviales, matériaux privilégiés de la loi de Darcy ; elle stipule que la vitesse d'écoulement et la perte de charge y sont liées par une constante empirique, la perméabilité du matériau aquifère. Darcy avait établi sa loi pour calibrer des filtres à sable et l'avait généralisée pour évaluer le débit de points d'eau gravitaires ; elle caractérise donc bien le comportement hydraulique de ce type de géomatériau. Mais le spectre de perméabilité naturelle est particulièrement étendu, en gros de 1 à plus de 10 000, alors qu'en fait, on ne connaît la perméabilité d'un matériau donné qu'à une puissance de 10 près. Il en résulte qu'il est beaucoup plus facile d'attribuer

une perméabilité à un matériau au cours d'un essai de pompage que de prévoir le débit d'une fouille ou d'un forage quand on connaît la perméabilité du matériau qui l'entoure ; des « erreurs » de 1 à 100 voire 1 000 sont courantes, ce qui peut se révéler très dommageable par défaut pour un forage d'exploitation ou par excès pour une fouille de chantier.

Le géomatériau est bien un objet particulièrement complexe, tant dans sa forme que dans son comportement. La complexité peut se traduire par la quantité d'informations que contient un système et dont il faut disposer pour en définir la forme et le comportement. La modélisation consiste à réduire cette quantité pour qu'il soit possible d'obtenir et de traiter les informations que l'on pense être déterminantes ; elle est excessivement réductrice. Les modèles géotechniques sont donc extrêmement schématiques et doivent être manipulés avec de grandes précautions, en particulier, ceux dont la forme est mathématique ; ils n'en demeurent pas moins indispensables au géotechnicien.

4.1.2 Organisation

À l'échelle du globe, le géomatériau est organisé selon un système extrêmement complexe mais parfaitement structuré, le système terrestre.

L'observation directe de ce système est en grande partie impossible puisque seule la surface du sol est visible et tangible. Ses éléments sont eux-mêmes très complexes : leurs formes et leurs comportements sont rarement déterminables avec précision ; leurs dimensions très petites ou très grandes, n'ont généralement aucune commune mesure avec les dimensions qui nous sont facilement accessibles sans le secours d'instruments ; ils ne sont pas immuables et la plupart des facteurs qui régissent leurs comportements, généralement très typiques, sont mal connus et ne peuvent pas être maîtrisés.

Mais l'hétérogénéité considérable du géomatériau n'est pas aléatoire ; ce matériau est en effet structuré : on ne confond pas un cristal d'orthose, une poche de vase, une dune de sable, un filon d'aplite, une couche de craie, une coulée de basalte..., mais d'autres structures, tectoniques en particulier, sont beaucoup moins évidentes. Ses comportements sont eux aussi extrêmement complexes mais tout aussi structurés ; les phénomènes naturels sont innombrables et leurs manifestations sont généralement spécifiques d'un lieu : ce qui se passe à proximité d'un volcan lors d'une éruption n'a rien à voir avec ce qui se passe dans une plaine alluviale lors d'une inondation, sur un talus qui glisse, sous un immeuble dont l'assise tasse... ; elles sont aussi spécifiques d'un moment : chaque événement quel qu'il soit, où que ce soit, est unique ; ce qui se passe avant, pendant et après est certes coordonné, mais l'enchaînement est plus ou moins aléatoire ; on peut prévoir l'événement, pas le prédire.

L'étude de ce système ressortit plus ou moins et tout ou partie selon le cas, à de nombreuses sciences, astronomie et/ou planétologie, géodynamique interne et/ou externe, climatologie et/ou météorologie, hydraulique marine et/ou continentale... et met en œuvre de nombreuses techniques générales et/ou spécialisées, observations, mesures, modélisations, interprétations... Elle est donc

particulièrement compliquée ; ses acquisitions en continuelle évolution ne sont jamais définitives ; la plupart des théories qui en découlent ne sont que des hypothèses ; les résultats qu'on en obtient sont des approximations n'exprimant que des ordres de grandeur.

4.1.2.1 Le système terrestre

La structure du système terrestre ressortit à la géomorphologie ; son comportement ressortit à la géodynamique ; l'une et l'autre sont dites internes quand elles concernent les profondeurs du globe et externes quand elles concernent sa surface.

Le système terrestre est d'une part un petit élément du système solaire dont il dépend étroitement parce qu'il lui impose sa structure et son comportement propres, et d'autre part un ensemble spécifique, quasi-autonome, particulièrement complexe, structuré en sous-systèmes, lithosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère qui sont eux-mêmes les ensembles de sous-systèmes de rang inférieur, continent, inlandsis, océan..., jusqu'aux roches, minéraux, cristaux, molécules, atomes, particules... qui ont des comportements spécifiques, tout en interagissant d'innombrables façons, à d'innombrables niveaux, en d'innombrables endroits. Depuis que la croûte terrestre existe, c'est-à-dire depuis plus de 4 Ga, des reliefs se créent et se détruisent incessamment à la surface du globe ; l'eau s'évapore de l'océan pour tomber sur les continents et retourner à l'océan par les fleuves ; à un endroit donné, le temps qu'il fait varie plus ou moins d'un jour à l'autre et le climat fait de même à plus long terme : système dynamique instable, animé par l'énergie thermique interne, la gravité et l'énergie solaire, le système terrestre évolue continuellement et de façon plus ou moins coordonnée à toutes les échelles d'espace et de temps qui passe.

À l'échelle du temps de la Terre, cette évolution paraît continue et monotone, mais elle semble ne pas l'être à l'échelle du temps humain, car on n'en observe que des événements de très courte durée à partir d'un certain seuil d'intensité qui dépend à la fois de la nature du phénomène considéré et de nos sens ou de nos instruments ; la fonction intensité/temps de n'importe quel phénomène est continue, mais dans un certain intervalle de n'importe quelle échelle de temps, elle est apparemment désordonnée voire incohérente, successivement plate, croissante ou décroissante avec des minimums et des maximums relatifs plus ou moins individualisés et parfois des paroxysmes. Pour le peu que l'on en sait, car le temps historique humain est court et la géologie historique est imprécise, cette évolution montre aussi des tendances à la hausse, à la baisse ou une stabilité durant des périodes plus ou moins longues et plus ou moins espacées mais jamais cycliques. Les événements naturels intempestifs voire paroxysmiques sont uniques, contingents, mais normaux et généralement explicables ; ce ne sont pas des anomalies.

Le temps du système terrestre est orienté et irréversible ; l'état final d'un site affecté par un phénomène n'est jamais identique à son état initial ; il en va de même pour l'ensemble du système terrestre : ce qu'il est et ce qu'il s'y passe aujourd'hui n'est ni ce qu'il était et ce qu'il s'y passait hier, ni ce qu'il sera et ce qu'il s'y passera demain. On parle néanmoins de cycles à propos d'événements et/ou d'états successifs analogues que l'on observe de temps en temps, mais il

ne s'agit jamais de cycles strictement périodiques, au cours desquels le même événement et/ou le même état se reproduisent régulièrement.

► Structure

Le matériau dont est fait le système terrestre, se compose d'arrangements locaux et spécifiques, emboîtés à toutes les échelles d'espace, de minéral en majeure partie et d'organique non vivant en moindre partie ; ce sont les minéraux, les roches, les formations... Ainsi, ce matériau est structuré, presque ordonné, même si la connaissance de certaines de ses formes extrêmement complexes, dépasse souvent nos moyens d'information et notre pouvoir de compréhension.

Ces arrangements et leurs liaisons sont les éléments de structures instables issues de dispositions transitoires antérieures ; ils dépendent de la nature du matériau et des phénomènes qui l'ont affecté au cours de son histoire. Sans remonter jusqu'aux particules élémentaires, le nombre des atomes et des phénomènes naturels qui peuvent les concerner, radioactivité essentiellement, est relativement peu élevé. Les minéraux et les corps organiques naturels fossiles, groupements d'atomes sont bien plus nombreux comme le sont les phénomènes susceptibles de les affecter, altération particulièrement. Les arrangements et les phénomènes connexes, érosion, transport, sédimentation... se diversifient considérablement quand on passe aux roches, groupements de minéraux ou de corps organiques, puis aux formations, groupements de roches présentant certaines affinités stratigraphiques ou structurales, puis aux massifs, régions, provinces...

À mesure donc que s'accroît l'échelle d'observation ou d'analyse du système terrestre, la complexité apparente de sa structure augmente. Parallèlement s'accroît la difficulté de son étude et de celle des phénomènes qui peuvent l'affecter.

► Comportement

Le comportement général de la Terre est historique : les événements de tous les phénomènes naturels qui en sont les éléments sont aléatoires ; ceux qui se produisent sont uniques ; ceux qui se succèdent sont analogues, jamais identiques ; l'état actuel du système terrestre est le résultat contingent de son passé profond, d'une évolution qui aurait pu être différente, de sorte que cet état serait lui aussi différent ; les systèmes solaire et terrestre vieillissent ; l'entropie thermodynamique du système terrestre croît ; il est donc beaucoup moins stable qu'il paraît à l'échelle de temps de notre très court passage en son sein ; son entropie statistique est énorme, mais n'est pas incommensurable puisqu'il est fini ; son instabilité est donc loin d'être désordonnée ; il évolue de façon cohérente.

Le géomatériau est le siège ou l'élément d'actions dont les causes sont naturelles, gravité, électromagnétisme, radioactivité... et dont les effets sont de plus ou moins le modifier sans cesse à différents niveaux ; ce sont les phénomènes naturels ; la plupart sont connus : leurs cours sont compliqués mais intelligibles ; leurs paroxysmes sont plus ou moins fréquents, irrépressibles mais normaux ; certains produisent des événements violents qui peuvent être plus ou moins destructeurs de vies et/ou d'ouvrages ; ce sont les aléas. Les évolutions de ces phénomènes sont spécifiques, localisées et généralement peu sensibles à l'échelle du temps humain ; le fait qu'ils évoluent parfois intempestivement n'est pas anormal. On ne

peut pratiquement pas en influencer le cours et empêcher la réalisation de leurs événements intempestifs ; on peut par contre constater leurs effets, essayer de comprendre leurs mécanismes et se prémunir de ceux qui sont à la source des risques, par des actions qui peuvent prendre des formes très différentes et être plus ou moins possibles selon le phénomène considéré.

Les événements intempestifs sont extrêmement rapides à l'échelle de l'histoire de la Terre ; à l'échelle d'une vie humaine, ils sont presque instantanés et rarement observés, sauf s'ils provoquent des catastrophes, mais alors, l'observation scientifique n'est pas le souci principal de ceux qui les subissent. On les caractérise plutôt indirectement par leurs effets, en constatant l'état résultant du site affecté, dont la stabilité acquise n'est qu'apparente. Explicables mais plus ou moins imprévisibles, possibles mais non certains, ces événements sont des péripéties et non des épisodes ; on ne peut donc les appréhender qu'en termes de probabilité.

Les phénomènes internes sont ceux dont l'origine est dans les entrailles de la Terre, essentiellement volcanisme qui amène en surface du matériau profond, et sismicité qui résulte des mouvements incessants de la lithosphère ; leurs manifestations les plus violentes sont très destructrices. Avant la tectonique des plaques, on savait que séismes et volcans étaient plus ou moins associés sans bien en connaître la raison ; on sait maintenant comment ils fonctionnent. Leurs modèles généraux sont bons ; leurs modèles spécifiques, moins.

Les phénomènes externes sont ceux dont l'origine est à la surface de la Terre. La désagrégation et l'altération désorganisent les roches et en facilitent l'érosion, déblayage et transport de blocs, graves, sable, limon, argile, ce qui permet à la désagrégation et à l'altération de se poursuivre. Quelles qu'en soient les causes, la gravité est le moteur principal de ce processus ; l'air et l'eau sous toutes leurs formes, le déclenchent, le facilitent, l'entretiennent et en transportent les produits. Écroulements, glissements, effondrements... sont innombrables, se produisent à peu près partout dans le monde et à tous moments ; mais généralement moins spectaculaires que les phénomènes internes, ils sont moins médiatiques. Leurs manifestations les plus violentes peuvent être néanmoins très destructrices. Leurs modèles généraux sont assez bons, mais on dispose rarement de modèles spécifiques acceptables.

La sédimentation et la diagenèse sont les phénomènes inverses qui accumulent les produits de l'érosion et les transforment en roches en les compactant, par l'effet de la gravité sur des grains juxtaposés, évidemment pesants, que la sédimentation d'autres grains charge progressivement ; elle est très lente et les sols récents sont généralement peu compacts ; son mécanisme de base est la réduction de la porosité des sédiments et l'expulsion de l'eau qu'ils contiennent. Les ouvrages que supportent ces matériaux peu compacts sont très souvent affectés de dommages qui peuvent aller jusqu'à la ruine et sont particulièrement sensibles aux effets des séismes qui peuvent liquéfier ceux qui sont sous-consolidés.

4.1.2.2 Les cycles naturels

Par analogie avec les cycles astronomiques, on considère généralement que tous les phénomènes naturels ont des cours cycliques, et donc que les événements

naturels dangereux ont des périodes de retour annuelles, décennales, centennales, millennales... sur lesquelles on a imprudemment bâti la prospective géotechnique, car la périodicité de ces événements n'est qu'apparente : en fait, les phénomènes naturels n'évoluent pas de façon cyclique mais chaotique ; les cycles naturels sont des suites instables de phases semblables de durée variable au cours desquelles se produisent irrégulièrement des événements plus ou moins analogues.

► Le cycle géologique

L'enchaînement des phases interne d'orogénèse, surrection, et externe d'érosion, altération, ablation, transport, de sédimentation et de diagenèse, constitue un cycle géologique dont la durée se mesure en dizaines voire centaines de millions d'années ; en France métropolitaine, on observe les effets de quatre d'entre eux, cadomien, calédonien, hercynien et alpin, les deux premiers avec difficulté ; nous assistons à l'achèvement de l'orogénèse alpine, première phase du cycle en cours.

Le cycle géologique est le modèle schématique du comportement général du système terrestre selon lequel, depuis l'origine de la Terre, des reliefs se créent et se détruisent incessamment à la surface du globe. C'est aussi une belle illustration du mythe de Sisyphe ; les entrailles de la Terre épuisent leur énergie à remonter des rochers que la gravité fait inéluctablement redescendre ; les planètes mortes sont les preuves que ce petit jeu n'a qu'un temps. Cette conception de l'évolution du système terrestre a été proposée par Hutton dès la fin du XVII^e siècle ; Lyell l'a systématisée ; d'autres l'ont sacralisée. Les géomorphologues structuralistes la considèrent maintenant comme archaïque, à cause de son aspect anthropomorphe ; pourtant, il faut bien considérer comme une histoire l'enchaînement des phases d'un cycle géologique dont le personnage central, le relief, a un début, une vie et une fin, comme nous.

Ce cycle n'est évidemment pas périodique au sens mathématique ; ceux qui se sont succédés depuis l'origine n'ont pas eu la même durée ni la même histoire et l'état du système terrestre au début d'un cycle n'est jamais le même qu'à la fin : le supercontinent de la Pangée issu de l'orogénèse hercynienne, qui a commencé à se fragmenter à la fin du Permien était totalement différent de celui issu de l'orogénèse calédonienne qui a commencé à se fragmenter à la fin de l'Ordovicien, comme le supercontinent qu'est en train de construire l'orogénèse alpine sera sûrement très différent de la Pangée et de ce que nous pouvons sinon prévoir, du moins imaginer ; certains événements qui jalonnent un cycle sont analogues, jamais identiques ; les phases n'y ont pas été strictement distinctes et enchaînées mais y sont plus ou moins simultanées ; le relief commence à se détruire avant que sa surrection soit terminée et le cycle suivant débute avant que le précédent ne soit achevé ; l'évaporation est continue sur l'océan mais la pluie ou la neige tombe de façon intermittente aussi bien sur le continent que sur l'océan ou sur l'inlandsis ; le régime de la rivière caractérisé par son débit moyen, ses crues et ses étiages, varie selon les conditions climatiques régionales et atmosphériques locales...

Géodynamique interne : la production des reliefs

Le comportement interne, souterrain, du système terrestre résulte en majeure partie de la dissipation de l'énergie que libère le matériau profond, nucléaire du matériau lui-même et gravitationnelle accumulée lors de la période d'accrétion de la Terre en formation ; il régit l'orogénèse, surrection discontinue de reliefs successifs, les chaînes de montagnes qui ont peu à peu construit les continents par juxtaposition.

L'orogénèse est maintenant modélisée de façon particulièrement efficace par la théorie de la tectonique globale ou des plaques. On ne peut évoquer ici que les grandes lignes de cette théorie dont les détails et même le vocabulaire ne sont pas fixés : au début du cycle de tectonique des plaques, la majeure partie des terres émergées est rassemblée en un supercontinent ; au cours du déplacement de ce dernier, des fractures s'y développent par divers processus très hypothétiques, panaches volcaniques, météorites... ; elles s'élargissent peu à peu et deviennent des océans qui séparent de plus en plus les morceaux du supercontinent devenus des continents autonomes ; puis certaines limites océan/continent rompent et les plaques océaniques s'enfoncent sous les plaques continentales ; quand les plaques océaniques se sont entièrement enfoncées, les continents forment un nouveau supercontinent qui ne va pas tarder à se rompre...

On connaît en gros le moteur thermique interne qui anime tout cela, mais on est tout à fait incapable d'expliquer et *a fortiori* de prévoir ces déplacements de plaques qui ont l'apparence de lents mouvements browniens ; à court terme, si l'on peut dire, ils paraissent effectivement ne pas en être, car les positions actuelles des plaques dépendent manifestement de leurs positions antérieures et des directions apparemment constantes des mouvements qui les animent ; à long terme, c'est moins évident : l'ouverture de l'Atlantique n'était sans doute pas inscrite dans le passé de la Pangée, dernier des supercontinents qui a commencé à se rompre il y a environ 200 Ma (millions d'années) ; personne ne sait si l'ouverture de la mer Rouge qui a débuté il y a environ 3 Ma se poursuivra jusqu'à créer un nouveau grand océan entre l'Afrique et l'Arabie.

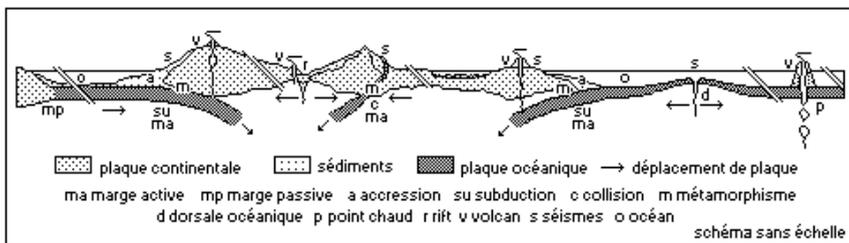


Figure 4.1.2.2.1 – Géodynamique interne

Au cours de leurs déplacements, les plaques surmontent parfois des points chauds, panaches isolés de magma profond qui les perforent ; si la plaque est océanique et libre comme à Hawaii, ils produisent des volcans basaltiques alignés dans le sens du déplacement ; si la plaque est continentale et en extension, des alignements de points chauds se forment sous des zones de

fractures qui peuvent s'effondrer en rifts associés à des volcans andésitiques comme dans le Massif central. Si l'extension et l'afflux de magma persistent, le rift peut évoluer vers un nouvel océan comme semble le faire la mer Rouge. De la lithosphère basaltique se crée en continu dans l'axe des dorsales médio-océaniques jalonnées de volcans actifs comme l'Islande, Tristan-da-Cunha, Amsterdam... Cette création entraîne l'écartement de plaques semi-rigides qui constituent le puzzle mouvant de l'écorce terrestre et portent les continents. Puisque le diamètre du globe n'augmente apparemment pas, il se détruit autant de lithosphère qu'il s'en crée, soit dans des zones de subduction, enfoncement d'une plaque sous une autre, d'abord soulignées par un arc d'îles volcaniques andésitiques parallèle à la suture comme celui des Antilles, puis par une chaîne de montagne comme les Andes et enfin par une zone d'obduction, chevauchement d'une plaque par une autre, aboutissant à l'écrasement d'un océan entre les deux plaques, ce qui édifie une chaîne de montagne d'un autre type comme celle des Alpes, entre l'Europe et l'Apulie, digitation de l'Afrique. Deux plaques peuvent être en contact actif sans que se crée ni se détruise de croûte ; elles coulisent alors le long de failles transformantes comme la faille nord-anatolienne ou celle de San Andreas en Californie.

Outre les déplacements de plaques, mesurables mais insensibles à l'échelle de temps humains, le comportement interne du système terrestre se manifeste en surface par les séismes et les éruptions volcaniques, événements naturels des plus dangereux.

Géodynamique externe : la destruction des reliefs

Le comportement externe, superficiel, du système terrestre est en grande partie déterminé par l'énergie que le Soleil lui dispense à travers l'atmosphère, selon la position et l'inclinaison du globe sur l'écliptique : les climats et le temps, particulièrement variés et extrêmement instables, associés à la gravité monotone et stable, ont un rôle déterminant dans la destruction incessante, l'érosion du relief continental qui se pénéplanise progressivement.

L'érosion commence dès que les reliefs émergent et se trouvent affrontés à l'atmosphère ; à son début, elle se superpose donc à leur production.

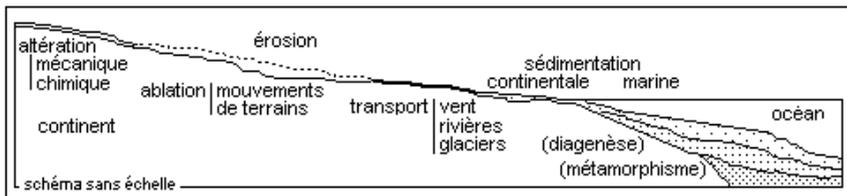


Figure 4.1.2.2.2 – Géodynamique externe

L'altération physico-chimique affecte les minéraux des roches, préparant ces dernières à l'érosion en les désagrégeant. L'ablation, accessoirement chimique sur des roches plus ou moins solubles dans l'eau comme le gypse ou le calcaire, est plus généralement mécanique, régie par la gravité associée à un autre agent

comme le ruissellement, le vent, la glace, la mer littorale ou même profonde : les phénomènes spécifiques sont les mouvements de terrain terrestres, reptations, glissements, éboulements, écroulements, effondrements, ou marins, courants de turbidité... Le transport plus ou moins long d'éléments plus ou moins volumineux selon l'état de fragmentation et l'agent, les amène plus ou moins rapidement dans des zones de calme plus ou moins durable où ils sédimentent. À mesure qu'ils sédimentent, les amas généralement stratifiés de façon plus ou moins horizontale qu'ils constituent, se compactent sous l'effet de la gravité, essentiellement par expulsion d'eau, et au bout d'un temps très long, peuvent atteindre le stade de roche sédimentaire par la diagenèse.

Selon les lieux et les circonstances, tous ces phénomènes sont susceptibles d'être des facteurs de risques « naturels » ; on rattache entre autres les glissements et les écroulements à l'érosion, certaines subsidences et les tassements à la diagenèse que la géomécanique appelle consolidation.

► Les cycles atmosphériques

Les états global et local de l'atmosphère actuelle dépendent des cycles terrestres courts, annuel pour les saisons, deux ou quatre selon la latitude, mensuel à journalier pour les météores. À l'échelle du temps humain ils paraissent à peu près réguliers ; aux échelles de la géologie, de l'archéologie et même de l'histoire, les zones climatiques et les climats types ne le sont pas : l'atmosphère est de très loin le sous-système le plus instable du système terrestre, et c'est en grande partie pour en comprendre l'évolution à court comme à long terme que la théorie du chaos a été développée.

► Le cycle de l'eau

Conditionné par les climats et le temps, le cycle de l'eau dont la durée est pluriannuelle à pluricentennale, provoque et entretient en grande partie la destruction des reliefs.

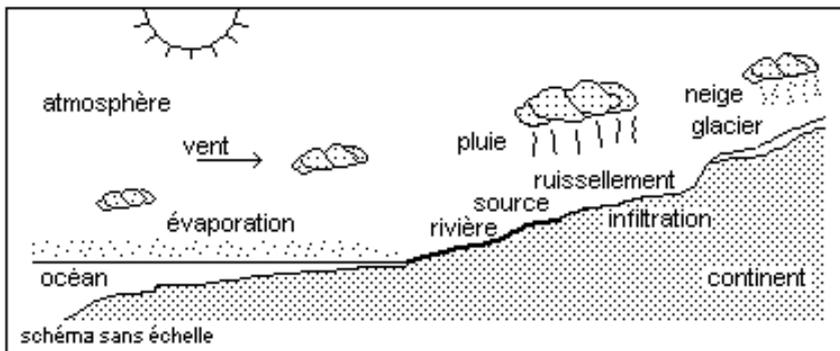


Figure 4.1.2.4 – Le cycle de l'eau

Très schématiquement, il débute par l'évaporation, en majeure partie océanique ; sur les continents, les précipitations, rosée, pluie, neige alimentent les eaux de surface dont la majeure partie retourne directement à l'océan par les

fleuves ; une autre partie s'infiltré, alimente les nappes souterraines dans les roches perméables et au bout d'un parcours plus ou moins long, surgit pour rejoindre les eaux de surface.

4.1.3 Le géomatériau français

On observe en France pratiquement toutes les structures géologiques et géomorphologiques connues : des volcans de tous types, actifs, assoupis et éteints, des montagnes plissées vieilles et jeunes, des horts, des grabens, des plateaux granitiques, basaltiques, karstiques, de loess, des collines argileuses, molassiques, des cluses, des combes, des gorges, des plaines alluviales, des glaciers, des fleuves, rivières et torrents aux profils et aux régimes très variés, des lacs morainiques et volcaniques, des îles épicontinentales et océaniques, des estuaires plus ou moins envasés, un delta, des polders, des côtes sableuses à dunes, tombolos et lagunes, des côtes rocheuses à criques, caps et écueils, des côtes à falaises stables ou ébouleuses, des calanques, des récifs et atolls coralliens, des lagons...

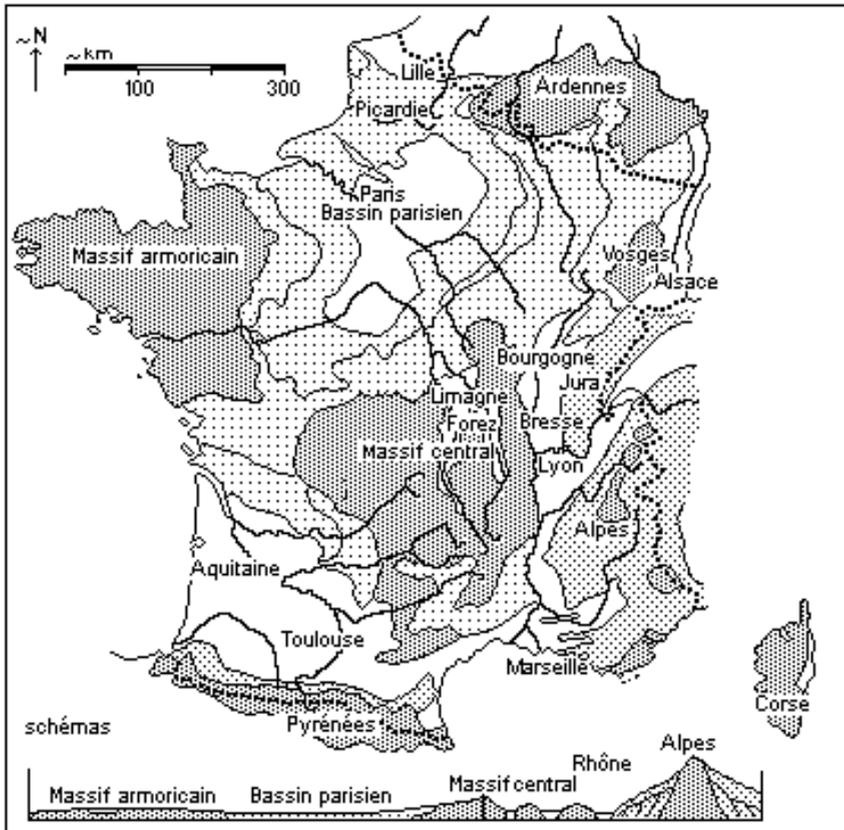


Figure 4.1.3 – Croquis géologique de la France

Les sites des autoroutes A1 Paris/Lille dans le lœss et la craie de Picardie, A36 de l'Alsace à la plaine de Bourgogne le long de la bordure NW du Jura, A40 Mâcon/Genève à travers le lœss et les marnes de la Bresse puis les plis marno-calcaires du Jura, A72 Saint-Etienne/Clermont à travers les grabens argileux des Limagnes, séparés par le hertz granitique du Forez... n'ont rien à voir les uns avec les autres parce qu'ils appartiennent à des ensembles structuraux différents ; les ouvrages qu'on y a réalisés, tranchées, remblais ponts..., sont tout aussi différents et n'ont pas été réalisés de la même façon. Les sites des grandes villes françaises ont des morphologies tout aussi diverses ; celui de Paris est constitué de formations sédimentaires empilées, couvertes par une plaine alluviale d'où émergent quelques buttes-témoins tapissées de limons ; sous Lille, il n'y a pratiquement que du lœss et de la craie ; le substratum de Toulouse est entièrement molassique, subaffleurant en collines à l'est, couvert par une plaine alluviale à l'ouest ; sous Lyon, il y a des graves fluvio-glaciaires sur un substratum de molasse à l'est du Rhône et du granite à l'ouest ; le site de Marseille, particulièrement varié, présente des massifs et des plateaux karstiques, des collines et dépressions marneuses, une plaine alluviale côtière... On comprend aisément que, dans ces conditions, les galeries de métro de chacune de ces villes n'aient pas été creusées de la même façon.

Comme formation de base du géotechnicien, on devrait donc prévoir un tour de France, comme en faisaient les constructeurs au Moyen Âge. Il verrait ainsi que le géomatériau est un objet bien plus complexe que celui qu'on lui a enseigné et il essaierait de s'en accommoder plutôt que de s'en plaindre.

4.2 Les phénomènes naturels

Les phénomènes naturels sont les manifestations observables du comportement général de tout ou partie du système terrestre ; leur évolution continue mais pas monotone modifie sans cesse le géomatériau et par là, affecte plus ou moins notre environnement ; à certains moments et dans certaines circonstances, ils produisent des événements intempestifs parfois dangereux, au pire destructeurs d'ouvrages et/ou de vies. Ces événements ne sont pas des anomalies de leur évolution, mais de courtes et rapides péripéties parmi d'autres du comportement normal du système terrestre ; nous ne pouvons pas les empêcher, mais à partir de leurs effets, nous pouvons les étudier pour essayer de nous prémunir de ceux qui constituent des risques par la prévision, la prévention et la protection qui peuvent prendre des formes très différentes et être plus ou moins possibles selon le phénomène considéré et l'ouvrage en cause.

Les étapes de l'étude de n'importe quel phénomène naturel ont été et demeurent à mesure qu'on le connaît mieux, successivement indirectes par l'observation passive de ses effets, empiriques par l'extrapolation souvent hasardeuse de ces observations et par la conjecture, pratiques par l'utilisation raisonnée d'observations systématiques, théoriques par l'analyse et la combinaison des variations de chaque facteur ; cette dernière étape que l'on voudrait toujours avoir atteinte, ne l'est que pour les phénomènes simples traités par la physique élémentaire ; les

relations directes de cause à effet sont rares sinon inexistantes dans la nature, hors des laboratoires.

4.2.1 Évolution générale

À l'échelle du temps de la Terre, l'évolution de tout phénomène naturel est continue mais elle ne semble pas l'être à l'échelle du temps humain, car nous ne la constatons qu'à partir d'un certain seuil d'intensité qui dépend à la fois de la nature du phénomène et de nos sens ou de nos instruments ; la fonction intensité/temps de n'importe lequel d'entre eux est continue mais, dans un certain intervalle de n'importe quelle échelle de temps, elle est successivement plate, croissante ou décroissante avec des minimums et des maximums relatifs, plus ou moins rapides et apparemment aléatoires. Pour le peu que l'on en sait car le temps historique humain est court et la géologie historique est imprécise, cette évolution montre aussi des tendances à la hausse, à la baisse ou de stabilité durant des périodes plus ou moins longues et plus ou moins espacées mais jamais cycliques ; les phases paroxystiques sont des événements uniques, contingents mais justifiables. Le temps terrestre est orienté et irréversible ; l'entropie du système terrestre croît ; l'état final de n'importe quel lieu soumis aux effets d'un phénomène naturel, n'est jamais identique à son état initial ; rien de ce qui s'y est produit ne se reproduira invariablement et strictement de la même façon, mais des événements analogues, d'intensité plus ou moins grande, s'y produiront sûrement à plus ou moins long terme, ce que la prospective exprime en temps de retour à partir d'une loi logarithmique de prospective.

L'évolution de n'importe quel phénomène naturel dépend d'un nombre plus ou moins grand de facteurs que l'on est généralement loin de connaître tous et dont on ignore souvent l'importance relative. Ces facteurs résultent d'évolutions spécifiques de phénomènes secondaires indépendants, moins complexes que lui, mais qui ne sont jamais très simples ; ils évoluent eux-mêmes plus ou moins indépendamment les uns des autres ; ils ont des hauts et des bas, des paliers plus ou moins durables, des changements de tendances lents ou brusques... S'il était strictement déterminé, le phénomène dont ils sont les éléments devrait être en stase, maximum ou minimum quand tous le sont aussi, ce qui est très peu fréquent voire extrêmement rare, plus ou moins variable dans un sens comme dans l'autre quand au moins l'un d'entre eux varie de la même façon ou quand plusieurs varient, pas forcément de la même façon. En fait, ce n'est pas aussi simple ; les événements qui animent le système terrestre et jalonnent son évolution ou celle de ses éléments de niveaux inférieurs sont, quelle que soit l'échelle à laquelle on les observe, uniques, spécifiques d'un lieu et d'une époque, imbriqués, interdépendants, co-influents ; la plupart sont régis par *le hasard et la nécessité* : ils ne sont ni déterminés ni aléatoires mais paraissent chaotiques. La nécessité contrôle l'évolution du système en lui imposant une tendance générale plus ou moins proche de la stabilité si l'inertie du système est convenable, si les flux entrant et sortant s'équilibrent, si l'effet de la réaction à une variation perturbatrice s'oppose au sien, si les réactions de ses sous-systèmes s'annihilent plus ou moins... Le hasard d'une action extérieure ou d'une circonstance peu fréquente perturbe plus ou moins cette évolution en

modifiant la tendance ; le système se dérègle, éventuellement s'emballé, parfois jusqu'au paroxysme puis finit par trouver un nouvel état d'équilibre, évidemment précaire, suivant l'évolution normale d'un système critique auto-organisé (cf. 3.1.2.7).

Le régime de la plupart des rivières du monde est bien connu, car l'agriculture, une des plus anciennes activités collectives de base de l'homme, lui est liée et parce que partout les vallées sont des sites d'occupation privilégiés où la densité humaine est la plus grande. Les étiages sévères et les fortes crues comptent parmi les grandes catastrophes et sont sans doute les plus fréquentes partout et de tout temps ; on ne connaît donc pas si bien que cela le phénomène naturel le mieux connu puisque l'on ne sait pas le prévoir et en prévenir les effets efficacement. La raison réside dans la multiplicité et la diversité des facteurs et paramètres en jeu et dans la difficulté d'en préciser les relations d'influence : climat, morphologie du bassin versant, part du ruissellement, de l'absorption et de l'évaporation, végétation... sont des objets et phénomènes à évolutions lentes, plus ou moins liées mais asynchrones ; le nombre, l'intensité, la durée, le volume, la répartition des précipitations au cours d'une période donnée, sont des paramètres dont les évolutions rapides sont pratiquement aléatoires. Or l'évolution de chacun d'eux est individuellement assez bien connue ; ce que l'on ne connaît pas, c'est la part de chacun dans l'évolution du régime et ce que l'on ne sait pas faire, c'est la combinaison raisonnée de l'évolution de chacun d'eux.

La variation de la pression atmosphérique, tant locale que globale est mesurée en permanence et abondamment publiée, partout dans le monde, depuis plus de deux siècles, tant par des professionnels que des particuliers ; on dispose ainsi de très longues séries d'observations qui en permettent l'exploitation statistique satisfaisante, situation quasi unique en matière de phénomène naturel. Ses variations de tous ordres sont très rapides et donc observables et significatives à l'échelle du temps humain ; à un instant donné, elle varie d'un endroit à un autre, de façon continue et assez cohérente pour qu'on puisse la figurer sur une carte d'isobares présentant des creux, des replats et des bosses, dépressions, thalwegs, marais, anticyclones... ; à un endroit donné, elle varie continuellement dans d'assez larges limites avec des minimums, des paliers et des maximums journaliers, hebdomadaires, mensuels, saisonniers, annuels... qui pourtant ne sont jamais strictement cycliques. Les enregistrements barométriques montrent très bien cela et peuvent être considérés comme des modèles analogiques d'enregistrements des variations dans le temps d'autres phénomènes naturels, impossibles à faire eu égard à la lenteur de leurs évolutions. Mais Lorenz a montré que même à très court terme, on ne peut, au mieux, discerner que des tendances dans l'évolution d'un paramètre météorologique ; au départ, les renversements de tendances ne sont jamais très caractéristiques et par la suite, ils peuvent s'affirmer ou s'annihiler, rendant toute prévision incertaine voire impossible. C'est un caractère constant de l'évolution de tous les phénomènes naturels : la plupart du temps, elle montre une tendance moyenne plus ou moins proche de la stase, et de loin en loin, des événements intempestifs spécifiques et contingents, générateurs éventuels d'accidents ; cette tendance ne renseigne donc pas sur le risque de leur manifestation ; des événements plus modérés que l'on appelle précurseurs se produiront-ils ? où et quand ? à quelle distance

spacio-temporelle du paroxysme ? On peut expliquer *a posteriori* un événement et ce qui l'a provoqué et éventuellement annoncé, mais on ne pouvait pas le discerner dans la situation qui l'a provoqué et on ne peut pas discerner celle qui en provoquera peut-être un autre analogue.

À partir de l'historique fiable d'un phénomène à un endroit donné, on peut, dans les limites de cet historique et de cet endroit, se représenter son évolution en estimant les fréquences d'événements d'intensités données ; on suppose alors avec plus ou moins de raisons qu'il y a d'autant moins de chances de voir se produire une certaine intensité qu'elle est plus forte, et qu'il y a d'autant plus de chances d'observer une intensité plus forte que la période d'observation est plus longue. Ce n'est pas grand-chose et on n'en est même pas certain ; c'est déjà beaucoup et on ne peut pas faire mieux : sur une droite logarithmique, on peut interpoler avec prudence des temps de retour décennaux ou centennaux, mais il est pour le moins aventureux d'y extrapoler un temps de retour millénal.

4.2.2 Étude

Notre connaissance de tous les phénomènes naturels ne repose que sur l'observation de leurs effets ; on peut tout de même modéliser assez convenablement l'évolution de ceux qui concernent la géotechnique et répondre au moins pour les principaux, aux questions où ? et comment ? Quant à dire quand, comme l'attendent les habitants des zones menacées, on est encore loin de pouvoir le faire. En 1970, mon maître Marcel Roubault intitulait un de ses ouvrages *Peut-on prévoir les catastrophes naturelles ?* et il répondait dans le texte *si l'homme ne peut pas tout empêcher, il peut beaucoup prévoir*. Trente-cinq ans après, tout en faisant sienne cette réponse, son élève se demande si *beaucoup* n'était pas trop optimiste. En effet, la prévision rigoureuse impose la connaissance parfaite de l'évolution dynamique d'un système simple et stable : pour prévoir rigoureusement et à très long terme, on doit donc disposer d'équations d'évolution temporelle immuables strictement déterministes ; pour prévoir à peu près et à court terme, on doit disposer de très longues séries continues de mesures innombrables exploitées statistiquement ; il est peu probable que l'on dispose un jour de tels instruments pour prévoir les événements de la plupart des phénomènes naturels complexes, discontinus et instables, difficilement quantifiables.

Classer, décrire et étudier n'importe quel phénomène naturel n'est pas simple, car jamais isolé, son évolution est rarement spécifique ; elle est toujours plus ou moins influencée par celles d'autres phénomènes, pas forcément proches tant en nature qu'en distance d'espace et de temps. Cela devient inextricable si on amalgame aléa et vulnérabilité, car intrinsèquement, les phénomènes naturels ne sont pas plus dangereux que les risques et les catastrophes sont naturels et certains sols vicieux : dans certaines circonstances qui ne dépendent que de nous, certains événements naturels sont plus ou moins dangereux pour les personnes et/ou les ouvrages vulnérables qui y sont exposés ; d'autres événements de nature et d'intensité analogues le sont peu ou même ne le sont pas, parce que ceux qui y sont exposés sont efficacement préparés et protégés, ou parce qu'il n'y a rien d'humain là où ils se produisent.

Ainsi, on ne peut pas distinguer les événements par leur nocivité à notre égard, en considérant que certains seraient irrésistibles et affecteraient des personnes et des ouvrages passifs, là par inadvertance et que d'autres seraient plus ou moins contrôlables et n'affecteraient que des ouvrages, facteurs actifs de leurs propres dommages : un pont enlevé lors d'une crue l'a-t-il été inévitablement par l'effet propre de l'événement ou parce que le tirant d'air du pont était insuffisant, ses fondations mal assurées, le lit de la rivière surcreusé par une exploitation de grave en aval ? L'effet est bien le même, seul le point de vue change. Pourquoi le séisme a abattu cet immeuble et a épargné cet autre ? L'événement était le même, mais la vulnérabilité des immeubles ne l'était pas : l'un était très fragile et l'autre était bien construit. On peut faire des réponses analogues pour expliquer les effets dommageables de n'importe quel phénomène naturel : il n'est dangereux que pour nous, mais nous pouvons nous en prémunir par la prévoyance et la prévention.

4.2.3 Les phénomènes internes

On ne connaît à peu près bien les phénomènes internes que depuis une quarantaine d'années, à la suite des campagnes océanographiques qu'imposait le positionnement des sous-marins stratégiques ; à son origine, la tectonique des plaques en a été le sous-produit : les éruptions volcaniques et les séismes sont les effets superficiels des mouvements lents, 1 à 20 cm/an selon l'endroit, mais continus des plaques lithosphériques ; ils se produisent essentiellement sur les marges actives des plaques.

4.2.3.1 Éruptions volcaniques

Un volcan est un édifice naturel, terrestre ou sous-marin, produit par l'afflux à travers la croûte et l'empilement en surface, de magma et de gaz provenant généralement du manteau, sous hautes température et pression ; les éruptions sont les manifestations saccadées de cet afflux. La forme classique d'un volcan est un cône cycloidal percé par une cheminée axiale débouchant au sommet par un cratère rempli de lave incandescente et duquel s'échappent des fumerolles. Ce n'est pas toujours comme cela qu'il se présente : volcan est un terme générique ; il n'en existe pas deux semblables et aucun ne se comporte de la même façon lors d'éruptions successives. Certains ont une activité pratiquement permanente, régulière ou saccadée, d'autres restent assoupis durant des années, des siècles, voire des millénaires, et se réveillent sans cause apparente, brusquement ou progressivement, de façon anodine ou cataclysmique.

En raison de la morphologie caractéristique de la plupart d'entre eux et de leur localisation sur les marges actives des plaques, les volcans actifs ou non sont à peu près partout bien connus ; il s'en crée un nouveau de temps en temps, par-ci, par-là ; sur l'ensemble du globe, il y en aurait eu près de 1 300 dont l'activité a été rapportée et environ 500 émergés sont plus ou moins actifs. La tectonique des plaques permet d'expliquer leur situation, de comprendre leur fonctionnement, et en particulier, leur type d'éruption : la plupart des volcans explosifs, à éruptions pliniennes, les plus dangereux, sont dans les zones de subduction et

de collision ou sur des marges de rift ; la plupart des effusifs, à éruptions hawaïennes, en général plus spectaculaires que dangereux, sont sur des points chauds océaniques ; tous types confondus, il se produirait environ 30 éruptions plus ou moins violentes par an dans le monde et une très destructrice à peu près tous les cinq ans ; ces aléas sont très spécifiques, relativement rares même près de volcans actifs, maintenant assez faciles à observer mais impossibles à expérimenter.

Dans leurs environs immédiats et selon le type de leurs éruptions les plus fréquentes, les volcans produisent des coulées de lave, des projections de cendres, pierres et bombes, les pyroclastites, des nuées ardentes, des émanations de gaz, des lahars, des séismes... Les grandes éruptions explosives à ingnimbrites peuvent modifier le paysage environnant sur des centaines de km² et altérer plus ou moins le climat de la planète en polluant l'atmosphère durant quelques mois à quelques années. Ceux qui explosent en mer provoquent des tsunamis particulièrement destructeurs.

Le comportement général d'un volcan est assez facile à caractériser selon son type éruptif ; son comportement spécifique l'est beaucoup moins ; que va-t-il se passer en fait au cours de l'éruption ? Comment et quand le volcan assoupi va-t-il se réveiller ? Une éruption magmatique va-t-elle suivre l'éruption phréatique en cours ? Où se dirige la coulée de lave ? Parviendra-t-elle à cet endroit ? Quel sera le trajet d'une éventuelle nuée ardente ? Comment sera modifié le climat et pendant combien de temps ? On ne sait pas répondre à ces questions et selon les cas, à beaucoup d'autres aussi capitales. En effet, relativement rares même pour les volcans les plus actifs, les éruptions sont toujours différentes et totalement irrésistibles : on ne peut que les constater sans pouvoir intervenir directement sur leur déclenchement et leur déroulement ; si la prédiction des éruptions est impossible, la prévision à court terme de la phase dangereuse d'une éruption en cours est toujours plus ou moins réalisable, car les volcans sont de bonne composition, ils montent lentement en puissance et préviennent toujours avant de se déchaîner : la surveillance permanente d'un volcan actif est donc absolument nécessaire ; elle peut éviter les pertes humaines, mais pas les pertes matérielles.

4.2.3.2 Séismes

La Terre vibre sans cesse et partout, de façon essentiellement naturelle et accessoirement provoquée, de l'échelle du globe à l'échelle locale, sous la forme de secousses brusques et transitoires du sol et du sous-sol ; ces vibrations sont des ondes de choc temporaires, plus ou moins durables qui affectent une portion plus ou moins vaste de l'écorce terrestre ; certaines sont suffisamment intenses pour endommager voire détruire certains de nos ouvrages. Les vibrations naturelles sont les séismes, déclenchés par des ébranlements souterrains plus ou moins profonds et violents ; les ruptures tectoniques sur les marges actives de plaques sont de loin celles qui produisent les plus violents ; viennent ensuite l'activité volcanique, les mouvements de terrains, de chutes de météorites... Seul un nombre infime de séismes tectoniques, ou plus rarement volcaniques, sont destructeurs ; ceux, plutôt rares, qui sont paroxystiques, entraînent des

catastrophes parmi les pires que l'on connaisse ; les plus violents peuvent aussi avoir de nombreux effets secondaires, eux aussi plus ou moins ravageurs ; après le séisme, on peut constater des modifications de paysage plus ou moins importantes et bien entendu, s'il y a des établissements humains dans la zone affectée, tous les dommages aux ouvrages et toutes les misères humaines que l'on sait. Les vibrations artificielles résultent d'innombrables sollicitations mécaniques de la subsurface : des explosions de toutes puissances en produisent lors d'essais nucléaires, de terrassements rocheux de mines ou de génie civil ; il s'en produit aussi à proximité de travaux et ouvrages dont certains effets modifient plus ou moins les contraintes naturelles du sous-sol – exploitations et travaux souterrains, mises en eau de barrages, coups de toits ou effondrements de galeries, injections ou extraction de fluides dans le sous-sol, trépidations de machines fixes ou roulantes... L'énergie mise en jeu lors de séismes est sans commune mesure avec celle des vibrations artificielles qui, néanmoins, peuvent être des facteurs de dommages, au moins pour des ouvrages fragiles proches.

La sismicité qui concerne une science, la sismologie, et une technique, le parasismique prospectif et constructif, est le phénomène naturel le mieux étudié et celui dont les modèles géologiques et physiques sont les plus élaborés et les plus fiables ; cela justifie que je le présente comme exemple d'une façon plus détaillée que les autres :

► Où ?

Par l'histoire, – traditions, chroniques, archives – et la tectonique des plaques, les zones sismiques sont bien individualisées, documentées et localisées et circonscrites : il peut se produire des séismes importants n'importe où dans le monde mais essentiellement dans les zones où l'écorce terrestre est en évolution active, marges de certaines plaques – dorsales médio-océaniques, zones d'accrétion, de subduction, de collision, failles transformantes, rifts continentaux et océaniques ; il s'en produit aussi aux abords de volcans en activité ainsi que par le rejeu de failles existantes sur des plates-formes apparemment stables ; les zones d'influence sont plus ou moins vastes selon la proximité du foyer et l'énergie initiale qui se disperse tandis que la vibration s'éloigne de lui en s'amortissant.

Les zones à risque sismique important sont maintenant bien connues. Les séismes qui se produisent dans l'une d'entre elles présentent des particularités, localisation des foyers, magnitude, durée, temps de retour... qu'il importe de bien étudier pour caractériser le risque que l'on y court ; depuis une centaine d'années, on effectue des enregistrements sismographiques : n'importe où dans le monde, le foyer et l'épicentre du moindre séisme peuvent ainsi être localisés et son énergie, mesurée.

► Comment ?

Des déplacements de matériaux dans des endroits mobiles plus ou moins profonds de l'écorce terrestre, y induisent des contraintes qui, au-delà d'un certain seuil dépendant de la nature et de l'état du matériau et de la profondeur de l'endroit, le foyer, provoquent une rupture, un choc appelé rebond élastique ; son intensité dépend de l'énergie élastique libérée. Il n'y a pas de réel schéma

de principe du déroulement d'une crise sismique, dont la durée peut varier de quelques heures à plusieurs mois ; au foyer, la fin de la mise en tension plus ou moins longue des roches avant leur rupture peut être accompagnée de petits ébranlements précurseurs, mais la rupture principale peut aussi se produire sans prévenir ; lors du paroxysme, il peut se produire une ou plusieurs secousses plus ou moins violentes, plus ou moins espacées, et qui durent de quelques secondes à quelques minutes ; il se produit ensuite ou non, des répliques plus ou moins nombreuses et plus ou moins fortes, mais certaines crises ne montrent pas d'autres secousses bien individualisées. La plupart des facteurs intervenant dans la production d'un séisme ne sont pas connus et on ignore à peu près tout de l'évolution de ceux qui le sont ; on sait seulement qu'une crise sismique est provoquée à grande profondeur par la libération quasi ponctuelle et relativement rapide d'une énorme quantité d'énergie potentielle élastique accumulée au cours de l'évolution très lente et complexe d'un énorme volume de matériaux, et qu'elle se manifeste en surface par un très court événement local, le séisme proprement dit : les crises sismiques sont chaotiques, sûrement pas déterminées à nos échelles d'espace et de temps.

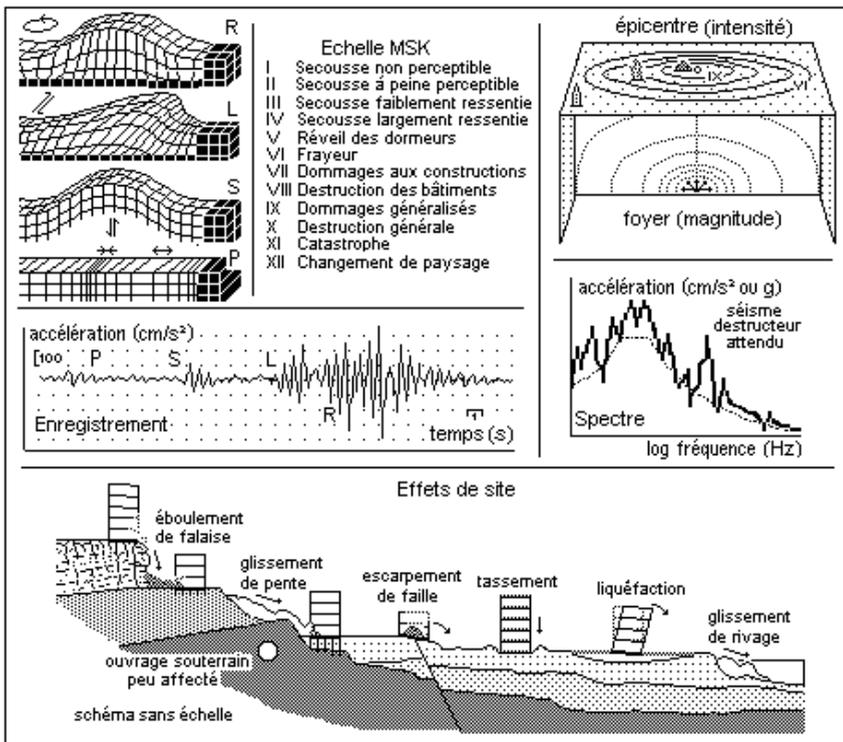


Figure 4.2 - Séismes

Le séisme est ainsi le plus surprenant des phénomènes naturels : où que ce soit, même dans les zones très surveillées, invisible il se produit sans prévenir, sans

que l'on puisse le prédire ni même le prévoir par quel moyen que ce soit, précurseurs, lacunes, champ électrique, radon, comportement animal..., où que ce soit, à quel terme que ce soit, jour, mois, année, siècle...

Les effets secondaires des séismes sont extrêmement nombreux et variés ; ils dépendent des caractéristiques du sous-sol local et notamment de sa compacité et de sa teneur en eau : un massif rocheux vibre sans que sa structure soit sensiblement altérée ; il n'en va pas de même d'une formation de matériau meuble aquifère qui se compacte et/ou se déstabilise plus ou moins. Selon l'endroit, il peut se produire des ondulations, fissures et failles à la surface du sol, des éboulements superficiels et/ou souterrains, des glissements, des tassements et liquéfactions de sols, des modifications de pentes susceptibles d'entraîner des déplacements de cours d'eau, des assèchements ou des créations temporaires ou permanentes de lacs et/ou de sources, des avalanches, des tsunamis, des seiches de lacs...

Un séisme se caractérise par sa localisation, sa durée, sa magnitude et/ou son intensité. La magnitude est une fonction logarithmique et donc continue, ouverte dans les deux sens, qui se calcule à partir de mesures sismographiques des paramètres de l'ébranlement au foyer, c'est à dire à des profondeurs qui peuvent atteindre voire dépasser la centaine de kilomètres ; elle caractérise intrinsèquement les séismes et permet de les comparer quels que soient leurs effets ; comme les vibrations sismiques s'amortissent rapidement pendant leur voyage dans le sous-sol, elles sont de moins en moins fortes à mesure qu'elles s'éloignent du foyer ou de l'épicentre qui est sa projection à la surface du sol ; ainsi, un séisme de forte magnitude produit de faibles vibrations loin de son épicentre, mais un séisme de faible magnitude peut en produire de très fortes à proximité du sien, surtout dans une zone très habitée et mal construite. Dans une zone habitée à l'aplomb du foyer, la magnitude 5,5 correspond à peu près au seuil de dommages notables ; on n'a pas encore mesuré plus de 9, ce qui est considérable et correspond à la destruction totale de tout ouvrage humain et au bouleversement du paysage.

Les vibrations sismiques ne sont pas dangereuses par elles-mêmes, quelle que soit la magnitude du séisme ; leurs effets sur un ouvrage dépendent de son couplage avec le sol qui vibre, c'est-à-dire de son système de fondation, de sa rigidité et de son éventuelle mise en résonance, c'est-à-dire de sa structure et de ses matériaux de construction ; il s'agit de fissuration, inclinaison, effondrement... Les seuls dangers directs d'un séisme résultent d'ondulations et/ou de fissures superficielles, plus ou moins dans le prolongement en surface de la faille active à l'origine du séisme ou de ses effets secondaires, glissements, affaissements, tsunamis...

► **Quand ?**

Pour un séisme de magnitude donnée, en un endroit donné, à quelques jours près, on ne sait pas répondre à cette question essentielle ; il est peu probable qu'on sache un jour le faire avec la précision qu'exigerait une prévention efficace. Le nombre de facteurs intervenant dans la production d'un séisme n'est pas connu et on connaît très mal l'évolution de ceux qui le sont.

Jusqu'à présent, les rares réussites de prévisions, qu'elles aient été fondées sur l'intuition, l'empirisme, l'expérience ou l'instrumentation, ont évidemment été montées en épingle ; en fait fortuites, elles sont toutes restées sans lendemain.

Les vibrations sismiques ne sont pas dangereuses par elles-mêmes, quelle que soit la magnitude du séisme ; leurs effets sur un ouvrage dépendent de son couplage avec le sol qui vibre, c'est-à-dire de son système de fondation, de sa rigidité et de son éventuelle mise en résonance, c'est-à-dire de sa structure et de ses matériaux de construction ; il s'agit de fissuration, inclinaison, effondrement... Les seuls dangers directs d'un séisme résultent d'ondulations et/ou de fissures superficielles, plus ou moins dans le prolongement en surface de la faille active à l'origine du séisme ou de ses effets secondaires, glissements, affaissements, tsunamis...

4.2.4 Les phénomènes atmosphériques

Les phénomènes atmosphériques n'intéressent la géotechnique que par les événements naturels qui en sont les sous-produits, eustatisme, crues, mouvements de terrain...

4.2.4.1 Les phénomènes climatiques

Malgré un cours relativement stable et plus ou moins cyclique, les phénomènes climatiques n'évoluent pas régulièrement et de façon monotone. Les glaciations, l'eustatisme, les sécheresses... affectent une partie voire l'ensemble du globe pour des durées qui dépassent largement le temps humain et même historique. Ils seraient en partie régis par les cycles longs de la Terre, excentricité, obliquité, précession des équinoxes,... mais aussi par des événements aléatoires de courtes ou de longues durées, chutes de météorites, éruptions volcaniques, orogénèses... Aucune prévision d'évolution climatique à quel terme que ce soit, n'est possible ; les temps de retour sont estimés à partir de bases de données trop courtes pour être statistiquement significatives : à terme de dix ou cent ans, les variations climatiques historiques du dernier millénaire ne sont pas cycliques.

4.2.4.2 Les phénomènes météorologiques

Les phénomènes météorologiques – moussons, cyclones, tornades, orages, enneigement puis fonte des neiges... sont rapides, très instables, plus ou moins saisonniers mais irréguliers et jamais strictement cycliques ; il s'en produit d'intempéstifs hors saison ; heureusement, le temps que l'on constate aujourd'hui et ici est plus ou moins celui que l'on constatait hier et là, et l'on sait à peu près comment les phénomènes qui le caractérisent se déplacent et évoluent ; les prévisions météorologiques régionales sont donc possibles à terme de deux ou trois jours ; les prévisions locales ne le sont qu'à terme de quelques heures.

4.2.4.3 Phénomènes liés aux conditions atmosphériques

Les crues, les inondations, les tempêtes littorales, les avalanches..., ainsi que, dans une large mesure la plupart des mouvements de terrain, sont des conséquences régionales et/ou locales directes ou indirectes de cyclones, orages, pluies persistantes, fontes de neige...

► **Inondations, crues, tempêtes littorales**

Associés à la gravité, ces phénomènes provoquent et entretiennent l'érosion, le transport et la sédimentation à l'échelle régionale, et des déplacements de lits, de côtes, des modifications de paysages... à l'échelle locale ; ils ruinent parfois les ouvrages riverains et ceux construits pour s'en prémunir, comme les digues, ce qui peut accentuer leurs effets jusqu'à d'amples catastrophes. Les zones exposées sont faciles à identifier et à délimiter ; leur sécurisation devrait donc être toujours assurée ; c'est malheureusement rarement le cas.

► **Avalanches**

En montagne, les avalanches sont des aléas naturels extrêmement fréquents. Elles se produisent dans des zones prédisposées par la topographie et l'exposition, notamment lors d'un redoux suivant rapidement une chute abondante, par surcharge de chutes successives sur de fortes pentes, sous l'effet de vibrations dues au vent, à une chute de bloc de glace ou rocheux, au passage d'un animal ou d'un homme, lors de la fonte... La plupart des couloirs d'avalanches sont bien connus des montagnards, ce qui n'empêche pas qu'il s'y produise des accidents voire des catastrophes par imprudence d'aménageurs ou de touristes.

4.2.5 Les phénomènes externes

Tous les phénomènes externes sont des agents de l'érosion ; quelle que soit la cause finale de leurs manifestations, la gravité en est le moteur et l'eau sous toutes ses formes, l'agent principal. Ils sont innombrables, il s'en produit à peu près partout et à tous moments ; les plus violents peuvent être très destructeurs.

L'altération physico-chimique affecte les minéraux des roches, préparant ces dernières à l'érosion en les désagrégeant. L'ablation, accessoirement chimique sur des roches plus ou moins solubles dans l'eau comme le gypse ou le calcaire, est plus généralement physique ; elle provient alors de l'action principale de la gravité et d'actions secondaires mécaniques ou climatiques qui provoquent les mouvements de terrains. Le transport par le vent, l'eau, la glace, la mer, d'éléments du géomatériau ainsi mobilisé, limon, sable, gravier, pierres et/ou blocs, les amène plus ou moins loin et plus ou moins rapidement selon la morphologie locale et régionale, l'agent véhicule et leurs dimensions, dans des zones de calme plus ou moins durable où ils sédimentent. À mesure qu'ils sédimentent, les amas généralement stratifiés de façon plus ou moins horizontale qu'ils constituent, se compactent sous l'effet de la gravité, essentiel-

lement par expulsion d'eau, et au bout d'un temps extrêmement long, peuvent atteindre le stade de roche sédimentaire par la diagenèse.

4.2.5.1 Les mouvements de terrain

Tant par leurs localisations quasi globales que par le nombre et la variété de leurs formes, de leurs manifestations et de leurs effets les mouvements de terrain constituent la classe la plus vaste de phénomènes naturels, et la plus étudiée du point de vue mécanique ; la géomécanique leur est entièrement consacrée.

Les reliefs produits par les phénomènes internes commencent à être détruits alors même qu'ils commencent à se construire et se trouvent affrontés à l'atmosphère ; ce jeu inéluctable des mouvements de terrain se poursuit en principe jusqu'à la disparition quasi totale de tout relief ; il est permanent à l'échelle du temps géologique, mais nous paraît intermittent car nous n'en observons jamais le début et la fin, seulement quelques phases intermédiaires, isolées dans l'espace et dans le temps.

Les mouvements de terrain sont les effets de la gravité sur le géomatériau, associée à des phénomènes préparateurs – altération, désagrégation, humidification..., et à des événements déclencheurs – séismes, fortes précipitations, excavations naturelles ou artificielles. Ils peuvent être extrêmement rapides ou très lents, généralement regardés comme exceptionnels et isolés alors que ce sont les épisodes normaux de la phase externe du cycle géodynamique : l'érosion résulte en grande partie d'accumulations incessantes d'effets de mouvements de pentes – fluages, glissements, coulées, écroulements, effondrements... ; la consolidation puis la diagenèse entraînent des mouvements verticaux – tassements, affaissements... Il s'en produit journallement d'innombrables, un peu partout dans le monde sur des aires locales à régionales ; leurs localisations, leurs types, leurs évolutions et leurs effets sont extrêmement variés et toujours spécifiques.

Pour se produire, un mouvement de terrain doit être préparé par une action extérieure initiale, car il va affecter un massif rocheux et/ou meuble apparemment stable ; une partie, généralement superficielle du matériau dont est constitué le massif, doit d'abord se déconsolider et/ou subir des contraintes qui y induisent des déformations, jusqu'au moment où un déséquilibre mécanique entre les deux parties du massif déclenche le déplacement oblique ou vertical plus ou moins rapide de la partie superficielle, à partir d'une surface de rupture dont on ignore souvent la genèse, la forme et la position ; ce mouvement se poursuit jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre général s'établisse : le massif, évidemment modifié, paraît alors être redevenu stable... jusqu'au prochain mouvement éventuel, si l'action initiale se poursuit ou se renouvelle. Dans ce scénario en trois tableaux et plusieurs actes de l'évolution d'un système critique auto-organisé, déstabilisation, mouvement, stabilisation..., dont on ne peut jamais prévoir la durée, on ne s'intéresse généralement qu'au second tableau, comme si les deux autres étaient sans importance et comme si la pièce ne comportait qu'un seul acte. Il n'en est évidemment rien ; le passage de l'état initial à l'état final du massif n'est jamais simple et instantané ; ces états ne sont

que des équilibres apparents qui correspondent à des circonstances particulières qui vont sûrement changer à plus ou moins long terme...

Un talus, un coteau, une paroi, une cavité souterraine, un versant, une berge, une côte... peuvent demeurer très longtemps apparemment stables puis glisser ou s'écrouler de façon compréhensible et plus ou moins attendue mais imprévue. À l'exception de certains de ceux provoqués par les séismes ou les terrassements mal étudiés et/ou mal exécutés, qui peuvent n'avoir que des causes purement mécaniques, la plupart des mouvements de terrains sont liés aux conditions atmosphériques ; l'oublier, les étudier et les contrôler du seul point de vue mécanique ne peut conduire qu'à de graves déboires.

Certains sites chroniquement instables sont affectés de loin en loin par des mouvements de plus ou moins grande ampleur ; particulièrement fragiles, ils sont toujours plus ou moins dangereux à plus ou moins long terme, et ce d'autant plus qu'après une période de stabilité apparente plus ou moins longue, leur instabilité latente a été oubliée. Ces sites en général connus des occupants, sont assez facilement repérables par les géotechniciens, archives, télédétection, prospection, instrumentation... ; bien localisés et observés, les événements qui s'y produisent sont généralement prévisibles et en tous cas, neutralisables ; ils sont souvent imprévus par ignorance, négligence, inattention...

Les causes de ces mouvements sont nombreuses, multiples et généralement liées, d'une part hydrogéologiques, – altération de matériau, accumulation d'eau souterraine -, dont les effets peuvent être statiques, – niveau piézométrique, pression interstitielle -, ou dynamique, – pression de courant, renards... et d'autre part mécaniques, – vibrations, suppression de butée, affouillement en pied de pente et/ou accroissement de poussée, surcharge en tête... Elles peuvent être activées par un séisme, des précipitations excessives, une crue, une tempête, un dégel rapide, un défaut de drainage...

La cause finale de ces mouvements, que l'on retient généralement comme la principale ou même la seule, est toujours une rupture d'équilibre apparent ; ce peut être un affouillement en pied, une surcharge en tête, une accumulation d'eau dont les effets peuvent être statiques, pression interstitielle ou dynamique, pression de courant... ; elle peut être provoquée par un séisme, une tempête, une crue, des précipitations excessives, un terrassement intempestif... Dans la plupart des cas, le drainage est un remède souverain.

Ces mouvements sont les seuls phénomènes naturels qui soient proprement géotechniques. La géomécanique est un moyen de leur étude parmi d'autres, nécessaire mais insuffisante ; elle s'est plus ou moins approprié certains d'entre eux comme les glissements ; pour elle, un site est stable, en équilibre mécanique, si le géomatériau sollicité par l'action de la gravité sur sa masse lui oppose une réaction résultant de sa cohésion et de sa rugosité ; cet équilibre est rompu et le glissement se produit instantanément si conformément aux principes de la mécanique générale, l'effort est supérieur à la réaction ; c'est en partie vrai, mais un peu trop simple pour expliquer un phénomène naturel évidemment très complexe : la géomécanique donne des résultats schématiques ; il faut les replacer dans leur contexte réel et les interpréter avec prudence.

Les moyens d'étudier les mouvements de terrain sont ceux de la géotechnique, documentation, télédétection, levés de terrain, géophysique, sondages, essais *in situ* et de laboratoire ; on choisit, parmi eux, les procédés les mieux adaptés aux particularités du phénomène et du site dans lequel on redoute les effets d'une manifestation intempestive. On leur adjoint souvent des appareils d'observation et/ou de mesure spécifiques, inclinomètres, mires topographiques, géodimètres à laser, stations GPS... Des séries temporelles de photographies terrestres et/ou aériennes et/ou d'images satellitaires permettent de retracer puis de suivre les évolutions de grands sites chroniquement instables, où certains mouvements sont fréquents voire quasi permanents.

Les études historiques de tels sites sont nécessaires ; elles peuvent être localement fondées sur les anciens cadastres, les cartes, tableaux, gravures et photographies, les annales, chroniques et archives, la tradition et la mémoire... Il est aussi indispensable d'y effectuer des études climatiques et un suivi météorologique, car certains mouvements sont déclenchés et/ou accélérés par les précipitations, la sécheresse, le gel, les crues, les tempêtes... On ne peut toutefois pas tirer de ces études des données statistiques utilisables pour estimer le temps de retour d'un certain type de mouvement dans un certain site : il ne s'en produit pas toujours un chaque fois que règnent les mêmes conditions météorologiques, théoriquement propices ; si l'eau est bien le facteur le plus fréquent de déclenchement d'un mouvement, d'autres facteurs, généralement mécaniques, ont dû le préparer ; mais quand des conditions météorologiques défavorables sont prévues dans un site fragile, il est sage d'être vigilant.

Selon les lieux et les circonstances, tous les mouvements de terrains peuvent être des facteurs d'accidents parfois catastrophiques ; mais il n'est jamais très difficile de s'en prémunir, même si cela est parfois très onéreux. La surveillance des sites susceptibles d'être affectés par des mouvements de terrains naturels ou provoqués impose des observations attentives appuyées sur l'utilisation d'appareils de mesure, de veille ou d'alarme, rudimentaires ou très complexes ; ces derniers ne sont pas toujours les plus efficaces. Les mesures sont directement prises au cours de visites périodiques ou enregistrées puis relevées sur place ou télétransmises à un organisme de surveillance. Leurs exploitations sont fréquemment embarrassantes et peuvent conduire à de fausses alertes ; ou bien, on ne regarde les enregistrements qu'après que l'événement se soit produit, pour s'apercevoir qu'on aurait pu le prévoir et même le prévenir si l'on avait été plus attentif et/ou plus compétent ; d'autres fois, les appareils ne se manifestent que parce qu'ils ont été arrachés par le mouvement qu'ils devaient aider à prévenir...

► **Mouvements de pente**

À plus ou moins long terme, toute dénivellation topographique naturelle ou artificielle si faible soit-elle, s'amointrit de façon continue ou épisodique, imperceptible ou intempestive. Les mouvements de pente sont des déplacements obliques plus ou moins étendus et rapides, de matériaux généralement meubles, plastiques ou fragmentés. Partout où il y a des pentes naturelles, sur les bords de rivières, de lac ou de mer, sur les coteaux, les bords de terrasses, les versants de collines, de montagnes... selon la nature du matériau, l'angle de la

penne, le climat local, et généralement à la suite d'un événement secondaire, naturel le plus souvent météorologique, ou anthropique, – terrassements superficiels, souterrains... il se produit du fluage, de la reptation, des glissements, des coulées de boue, des chutes de pierres, des éboulements, des écroulements... ; certains de ces phénomènes peuvent se superposer et/ou s'enchaîner. Certains sont très lents, de peu d'ampleur ; ils sont quasi ignorés mais peuvent avoir une influence notable à long terme sur le comportement d'un site ou être les précurseurs d'un phénomène plus rapide et plus ample. Certains sont très rapides et de grande ampleur ; ils sont spectaculaires et généralement très dangereux. Les plus importants affectent des centaines d'hectares et des millions de mètres cubes de matériaux ; certains rejouent de temps en temps, d'autres ne cessent jamais tout à fait.

La reptation, mouvement lent, continu et d'épaisseur très limitée affecte la couverture meuble de talus, coteaux, petits versants... Le fluage au cours plus irrégulier affecte l'altérite et/ou le substratum plus ou moins décomprimé de grands versants sur parfois une épaisseur très importante ; au fil des années voire des siècles, il passe par des phases plus ou moins durables de stase, d'accélération et de ralentissement plus ou moins forts, et de l'une à l'autre le volume instable apparent peut augmenter ou diminuer ; par une lente accélération ou brusquement, il peut passer, tout ou partie, généralement en surface, à un mouvement rapide, glissement, coulée, écroulement...

Les glissements, phénomènes complexes qu'en fin de compte la géomécanique réduit à un modèle simplissime, le glissement rotationnel (*Fig. 3.1.2*), sont des mouvements obliques qui affectent des pentes limitant des massifs plus ou moins structurés, constitués de matériaux meubles, plus ou moins argileux et sensibles à l'eau, dont la stabilité n'est qu'apparente ; péripéties spectaculaires d'histoires qui peuvent être longues et tortueuses, ils sont généralement qualifiés de rapides ; effectivement, ils peuvent se produire brusquement, sans prévenir, pour qui n'y regarde pas de très près. Dans les régions au sous-sol argileux et à la surface accidentée, de nombreux coteaux glissent à peu près en même temps, après une longue période de stabilité apparente ; l'époque de ces glissements quasi simultanés, correspond toujours à une pluviosité, sinon exceptionnelle, du moins très forte et continue.

Les sites paraissant globalement instables ne sont pas souvent les sièges de grands glissements généraux quasi instantanés ; il s'y produit plutôt de loin en loin et à des endroits chaque fois différents mais souvent contigus, des glissements élémentaires qui eux, peuvent éventuellement être regardés comme tels ; leur forme finale prend fréquemment l'aspect de glissements plans. En fait même, il est rare qu'un vaste site paraissant instable, présente une aptitude uniforme au glissement ; des matériaux meubles plus ou moins épais, plus ou moins argileux de certaines zones plus ou moins aquifères, glissent plus facilement que d'autres ; ils sont souvent rassemblés dans des gouttières et vallons fossiles, surcreusements locaux du substratum des versants, parallèles à la pente générale. Les sources de pied de versants correspondent souvent à tels vallons ; elles révèlent des cheminements préférentiels d'eau souterraine, susceptibles de favoriser les glissements et même les coulées de boues ; leurs abords sont donc généralement assez dangereux.

Plus ou moins longtemps après qu'ils se sont produits, les glissements passent souvent, vers l'aval, à des coulées plus rapides, plus linéaires et plus distantes, généralement en cours ou à la suite de précipitations exceptionnelles ; la pente peut alors être relativement faible, le mouvement sera néanmoins rapide, généralement surprenant et en partie pour cela, très dangereux ; les coulées de boue se produisent sur les versants, en dehors des lits de cours d'eau, mais elles sont souvent canalisées par des thalwegs habituellement secs. Il s'en produit aussi sur des versants argileux en stabilité limite, après des opérations de déboisement et/ou d'urbanisme inconsidéré, à la suite de violents orages.

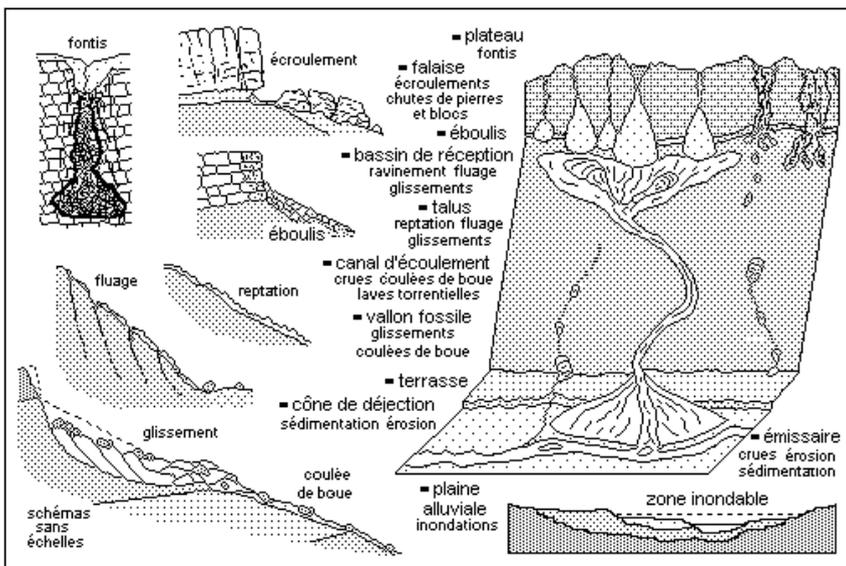


Figure 4.2.5.1.1 – Mouvements de terrain – inondations

En revanche, les laves torrentielles, brouets plus ou moins consistants de débris de tous calibres, partent généralement du bassin de réception et dévalent les lits de certains torrents à plus ou moins grande vitesse ; très abrasifs et doués d'une grande énergie cinétique, elles les modifient radicalement par ravinement puis sédimentation, aussi dangereux l'un que l'autre ; en fin de course, elles s'étalent en alimentant parfois de vastes et épais cônes de déjections.

► Écroulements de parois

Le versant à forte pente ou la falaise qui limite un massif de roche subaffleurant fissurée peut s'écrouler suivant divers processus généralement rapides et intermittents, enchaînés ou non, chutes de pierres et blocs, basculements de pans en surplomb, éboulements bancs sur bancs aval-pendage... Au départ, dans tous les cas, la relaxation en surface des contraintes naturelles auxquelles a été soumis le géomatériau en profondeur ouvre la fissuration potentielle d'un réseau de diaclases et éventuellement de stratification ou de schistosité ; en montagne, les alternances de gel/dégel fragilisent davantage la roche, et l'eau

infiltrée dans les fissures agit comme des coins en gelant, faisant se détacher des pierres et blocs plus ou moins volumineux, des chandelles ou des pans qui vont alimenter l'éboulis ou le chaos s'accumulant en pied ; à moyenne ou basse altitude, les chutes de pierres et blocs sont moins systématiques ; si la falaise, une cuesta, y domine un coteau marneux, des écroulements de chandelles et de pans se produisent après que le coteau ait subi des glissements successifs jusqu'à mettre le pied de la cuesta en porte-à-faux, et des blocs éboulés, parfois très volumineux, se mêlent aux produits des glissements ; si un mouvement lent et quasi continu affecte le coteau, la cuesta est entraînée peu à peu vers l'aval, fragmentée en blocs étagés souvent très volumineux, au point qu'ils passent souvent pour des objets tectoniques ; ils produisent eux-mêmes des écroulements secondaires ; au bord de la mer ou sur les rives concaves des rivières encaissées, c'est l'eau chargée de sable et/ou de galets qui sape directement le pied de la falaise ou de la rive ; au bord d'un désert de sable, ce peut être le vent.

En montagne, certains écroulements peuvent affecter des volumes considérables de matériaux rocheux ; ils sont extrêmement dangereux et doivent être particulièrement bien étudiés et étroitement surveillés.

► **Mouvements verticaux**

Les mouvements de terrain verticaux, – poinçonnements, effondrements, affaisements, tassements... ont aussi des formes, des causes et des effets variés ; ils peuvent être naturels ou provoqués.

Les effondrements sont des écroulements subverticaux entraînés par des ruptures brusques de toits de cavités naturelles résultant de dissolutions de roches, calcaire ou gypse ou de soutènements de carrières souterraines ou de mines ; selon la surface, la hauteur et la profondeur de la cavité, ils aboutissent en surface à des dépressions, des cuvettes, des avens, des gouffres ou des fontis, après s'être propagés à travers toutes sortes de matériaux, entre la cavité et le sol, en les fracturant et en les faisant foisonner.

La plupart de ceux qui sont naturels se produisent à la surface des plateaux de calcaire karstique ; ce sont le plus souvent des embuts qui s'ouvrent parfois au fond d'une doline dont l'aven-exutoire obstrué par la couverture argileuse débouffe à la suite d'un violent orage qui l'avait transformée en étang ; les effondrements de fontis sont assez rares car les réseaux karstiques sont presque tous fossiles et n'évoluent pratiquement plus ou alors très lentement à notre échelle de temps parce que le calcaire est très peu soluble : leur morphologie souterraine s'est lentement modelée lors des périodes glacières et depuis la fin du Würm. La morphologie des plateaux karstiques est très facile à cartographier par télédétection et sur le terrain ; les risques d'accidents y sont d'autant plus restreints que ces plateaux sont généralement occupés de façon diffuse.

Il en va autrement des cavités des formations gypseuses qui évoluent de façon permanente et rapide à notre échelle de temps, car le gypse est très soluble et se déforme à court terme, en fluant par décompression. Elles s'effondrent rapidement en entonnoirs plus ou moins vastes, souvent du jour au lendemain, la plupart du temps sans prévenir, sans signe précurseur en surface ; cela rend l'occupation des zones sous lesquelles il en existe, très dangereuses, prati-

quement inconstructibles sauf à prendre des précautions strictement adaptées à la zone et à l'ouvrage, dont le coût est toujours très élevé, sans garantie d'efficacité totale à terme humain ; heureusement, ces zones criblées d'entonnoirs parfois pleins d'eau en permanence, très faciles à repérer et à circonscrire sont pratiquement toutes cartographiées.

La pire des situations est engendrée par les carrières souterraines abandonnées depuis longtemps et oubliées, en particulier dans les zones urbaines denses, et c'est malheureusement là que le risque qu'il s'en produise, est le plus grand ; la raison en est que, de tout temps et presque partout, on a exploité à faible profondeur puis abandonné sans repérage, des carrières souterraines de matériaux de construction dans le sous-sol des environs des agglomérations qui s'y sont peu à peu étendues. La technique habituelle était celle des chambres et piliers, la plus facile à mettre en œuvre et la plus économique pour des matériaux de peu de valeur ; à l'abandon, les piliers et les toits s'écaillent jusqu'à céder et il se produit un fontis, en général sans prévenir. Si l'ensemble des piliers est en limite de solidité, un fontis initial peut se propager à l'ensemble de la carrière. De telles carrières ont été exploitées à peu près partout et les zones à risques sont très nombreuses ; oubliées, elles ne se rappellent souvent à notre attention qu'à l'occasion d'un accident.. L'étude détaillée de ces zones pour y localiser et prévoir les fontis potentiels est quasi impossible ; la microgravimétrie qui avait été présentée comme la seule méthode efficace, s'est finalement montrée très décevante et il n'en existe pas d'autre. Toutefois, généralement par des recherches historiques et structurales à la suite d'un premier accident, on peut les circonscrire, les déclarer *non aedificandi* ou y construire des ouvrages adaptés.

Les affaissements généralement provoqués par l'extraction de matériau du sous-sol, – eau souterraine, hydrocarbures, minerais... produisent des dépressions plus ou moins vastes ; ce sont des mouvements verticaux de terrains qui abaissent lentement et sans rupture, la surface du sol ; la plupart résultent d'un processus naturel, la consolidation progressive de sédiments subactuels plus ou moins organiques comme ceux de marécages ou de tourbières ; ils produisent des cuvettes et dépressions parfois très vastes. La consolidation est le résultat de l'écrasement des interstices d'un matériau granuleux, sous l'effet de son propre poids ou de celui d'un ouvrage ; si le matériau est aquifère, cet écrasement s'accompagne d'un essorage qui en régit la durée, en fonction de la perméabilité du matériau et de l'efficacité du drainage aux limites. Au total, le matériau dont le volume et la teneur en eau diminuent plus ou moins vite, devient plus dense, plus résistant et moins perméable, et la surface du sol se déforme plus ou moins irrégulièrement. Les affaissements provoqués par le dégel ou la sécheresse sont beaucoup plus limités en surface et profondeur, mais néanmoins souvent dommageables. À plus petite échelle, les tassements provoqués par surcharge locale de la surface du sol par la construction d'un ouvrage n'affectent généralement que l'ouvrage lui-même.

L'affaissement du sol des grandes régions minières et notamment de celles de charbon, peut couvrir de grandes surfaces, être très important et durer très longtemps. Les nombreuses couches superposées et les méthodes d'extraction, naguère boisages voués à l'éboulement plus ou moins rapide dans les quartiers

abandonnés après exploitation, dans les dernières décennies tailles-rabots, soutènement automatique et foudroyage immédiat, créent des vides importants qui entraînent la décompression des matériaux sus-jacents. Malgré des profondeurs d'exploitation généralement grandes, elle finit toujours par atteindre la surface qui s'affaisse plus ou moins et généralement, de façon désordonnée. Dans les dépressions ainsi constituées, des bâtiments se fissurent, des clochers s'inclinent, les eaux de ruissellement ne savent plus où aller. Ces zones ont des réactions plus surprenantes que dangereuses ; les fontis y sont rares mais certaines constructions peuvent y devenir dangereuses et doivent être démolies ; on peut toutefois continuer à y construire en prenant les précautions que recommandent les services spécialisés des exploitations.

Le tassement généralisé de vastes zones de matériaux alluviaux meubles, souvent plus ou moins organiques comme ceux des marécages, est généralement dû à la consolidation accélérée de ces matériaux ; au lieu de perdre peu à peu leur eau interstitielle de façon naturelle, ils se la voient enlevée beaucoup plus rapidement, le plus souvent par pompage d'exploitation industrielle ou urbaine.

Les tassements sous les constructions sont bien étudiés par la géotechnique selon la théorie de Terzaghi ; ce sont de bons modèles réduits des affaissements naturels.

4.2.5.2 Autres phénomènes externes

La géotechnique n'est pas directement concernée par les phénomènes liés à l'écoulement de l'eau continentale, à la mer, à l'atmosphère. Mais les rivières débordent, érodent, alluvionnent, changent parfois de lit, provoquent des coulées de boue... La mer érode et alluvionne, mais de façon beaucoup plus efficace et spectaculaire ; son niveau moyen varie aussi dans les deux sens, mais assez lentement ; les glaciers avancent, reculent et leur front s'écroule ; les chroniques, les vieilles cartes et les observations directes témoignent de tout cela. La géotechnique peut aider les spécialistes de ces phénomènes pour étudier les sites qui en sont menacés, expliquer comment ils les affectent et mettre au point des moyens d'intervention. En particulier, les zones d'inondation d'un lit majeur de rivière sont très faciles à circonscrire par télédétection et observations de terrain ; cela peut utilement compléter l'étude historique à laquelle on a recours habituellement.

4.2.6 L'eau souterraine

Dans le cycle de l'eau (cf. 4.1.2.2.3), une partie plus ou moins grande des précipitations et des ruissellements qui s'infiltrent dans le sol, alimente les nappes d'eau souterraine ou des circulations karstiques que contiennent et véhiculent les terrains aquifères. Des alluvions de ruisseaux aux couches de bassins sédimentaires, les formes, les surfaces, les épaisseurs, les profondeurs des nappes sont extraordinairement diverses et variées, toutes uniques ; néanmoins presque toutes comportent une zone superficielle d'alimentation où se font les

infiltrations et pénètrent les pollutions, une zone profonde d'écoulement et une zone d'affleurement où l'on trouve les sources, les marais, les résurgences....

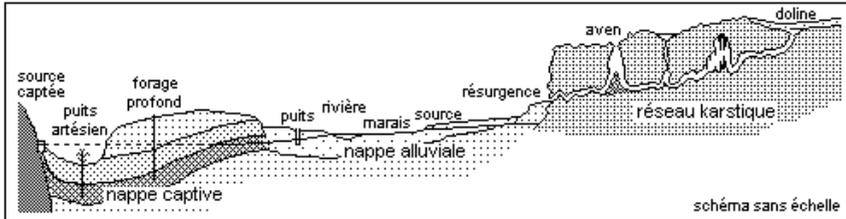


Figure 4.2.6 – Circulations d'eau souterraine

La part d'infiltration dépend de la localisation de la zone, de sa topographie, de la nature et de la structure de son sous-sol, de sa végétation, de ses aménagements, du climat, des saisons, du temps... La vitesse d'écoulement est très faible, quelques mètres à un ou deux kilomètres par an dans les sols et roches perméables en petit, grès, sables, graves... ; elle est plus ou moins comparable à celle des cours d'eau de surface dans les réseaux karstiques des roches perméables en grand, calcaires pour l'essentiel. Le débit des points d'affleurement dépend de la puissance de la nappe ou du réseau ; il varie dans des proportions plus ou moins larges selon la pluviométrie saisonnière de la zone d'alimentation, avec un retard qui dépend de son éloignement, de la perméabilité de l'aquifère et du gradient de l'écoulement. Certaines nappes d'aquifères alluviaux sont drainées ou alimentées de façon permanente ou alternative par un cours d'eau, un lac, la mer.

4.2.6.1 Nappes d'eau souterraines

Toutes les nappes s'écoulent sur leur mur constitué de roche imperméable, argile, marne, granite..., dans un matériau perméable en petit dont les pores sont très fins. On dit que la nappe est libre ou phréatique si son toit est constitué du même matériau perméable que l'aquifère ; son niveau est alors une surface libre ; c'est le niveau statique des puits qui peut sensiblement varier selon le régime de la nappe, généralement saisonnier ; la plupart des nappes alluviales établies dans le sous-sol des vallées drainées par un cours d'eau sont de ce type. On dit que la nappe est captive si son toit est constitué d'une couche imperméable ; la pression de l'eau peut alors y être élevée comme dans une conduite forcée ; elle est plus ou moins déterminée par la profondeur du toit et donc pratiquement fixe ; le niveau statique de l'eau dans les forages qui l'atteignent est stable, plus ou moins supérieur à celui du toit ; dans certains cas, l'eau du forage peut jaillir ; on le dit alors artésien. La plupart des nappes profondes de bassins sédimentaires sont de ce type. On dit que la nappe est semi-captive si son toit et/ou son mur ne sont pas tout à fait imperméables ; de telles nappes contenues dans des aquifères voisins peuvent échanger une partie de leurs eaux ; ce type est fréquent car les roches totalement imperméables sont très rares.

Le matériau aquifère des nappes est filtrant ; ainsi, en dehors de la zone d'alimentation, l'eau de nappe est généralement exempte de pollution bactériologique, mais évidemment pas de pollution chimique.

Sur le littoral, les nappes sont en communication d'échanges avec la mer, comme les nappes alluviales le sont avec les cours d'eau. L'eau terrestre qui s'écoule vers la mer est généralement bloquée près du rivage qui est une zone d'émergence ; en profondeur, l'eau marine pénètre sous elle, souvent jusqu'à plusieurs kilomètres du rivage si l'aquifère est épais ; la zone de contact entre l'eau continentale plus légère que l'eau marine salée est modélisée comme un biseau en équilibre hydrodynamique instable car les deux aquifères le sont eux-mêmes.

4.2.6.2 Circulations karstiques

Un réseau karstique est un ensemble de fissures et de cavités souterraines naturelles, galeries, grottes, cavernes..., creusées par l'eau dans un massif de roches plus ou moins solubles ; elles sont stables dans les calcaires très peu solubles, instables dans le gypse ou le sel très solubles ; le matériau qui recèle ces cavités dont le volume est souvent très grand, est dit perméable en grand ; dans tout le réseau ou certaines de ses parties, l'eau peut circuler à surface libre de façon permanente ou temporaire selon la saison, comme un cours d'eau de surface ; le réseau ou la partie est dit dénoyé ; dans d'autres parties, des cavités peuvent être en charge voire siphonantes, comme des conduites forcées ; la partie inférieure de certains réseaux peut être aquifère de façon permanente ; on dit alors qu'elle est noyée ; l'eau s'y comporte comme dans une nappe.

Un réseau est alimenté soit par les pertes d'un ou plusieurs cours d'eau de surface, soit par les infiltrations sur un lapiaz, surface calcaire très corrodée, une doline, cuvette plus ou moins grande et profonde creusée à la surface du massif... ; après un parcours souterrain plus ou moins long, l'eau refait surface à une résurgence, source au débit généralement fort mais très variable.

La description d'un réseau, l'étude et la modélisation des écoulements sont très difficiles, car on ne peut repérer les cavités aquifères qu'en y pénétrant ; en particulier, on ne sait pas aborder et résoudre correctement les problèmes d'écoulements dans les matériaux non saturés tels qu'il s'en produit dans les réseaux karstiques dénoyés.

4.2.6.3 Eau intersticielle

L'eau ne circule pratiquement pas gravitairement dans les géomatériaux argileux très peu perméables, mais elle y est plus ou moins mobile par capillarité ; leur teneur en eau parfois très élevée est un des paramètres de leur état mécanique, du solide au liquide en passant par le plastique ; ce changement d'état est une des causes de certains mouvements de terrain : tel talus stable si la teneur en eau de son matériau est relativement faible, peut glisser par humidification atmosphérique ou de ruissellement.

4.3 Les aménagements et les ouvrages

D'un trou dans une plaine alluviale pour en extraire de la grave aux terrassements et aux fondations des ouvrages d'art d'un réseau autoroutier de montagne ou d'un aménagement hydroélectrique de grand fleuve, en passant par les fondations d'une centrale nucléaire et par tout ce que nous creusons, construisons, exploitons ou rejetons à la surface de la Terre, les aménagements et les ouvrages qui concernent la géotechnique perturbent plus ou moins le géomatériau pour l'exploiter (mines, carrières, forages d'eau ou d'hydrocarbures...), l'encombrer en surface (bâtiments, remblais, ouvrages d'art, déchets...), ou en profondeur (tranchées, galeries...), l'altérer (pollution). Ils peuvent être isolés ou implantés dans une zone urbaine ou industrielle, un lotissement de petits immeubles et/ou de pavillons, sur un tracé d'autoroute, de voies ferrée, de pipe-line..., aménagements qui sont eux-mêmes des ouvrages d'ordre supérieur, sujets d'études spécifiques. Innombrables, très différents et toujours uniques, on ne peut pas les présenter un à un ou à travers quelques ouvrages exceptionnels qui sont rarement de bons exemples pour les ouvrages courants bien plus nombreux, car les multiples conceptions, formes, dimensions, modalités de construction dont on dispose doivent être adaptées à chacun, au cas par cas. On peut par contre présenter les principaux types de leurs parties géotechniques analogues, terrassements, fondations et drainage pour l'essentiel (Fig. 3.2), puis énoncer les problèmes que pose la conception de ces organes, leur mise en œuvre, leur entretien, leur sécurité et enfin indiquer comment ces problèmes peuvent être résolus.

4.3.1 Les aménagements

On demande à la géotechnique des aménagements de définir le cadre de l'opération, de contrôler sa faisabilité, éventuellement de proposer des variantes, valider les dispositions retenues, éviter les risques, évaluer les coûts...

La reconnaissance générale du site qui est son objet principal, conduit habituellement à le diviser en secteurs relativement homogènes où des problèmes analogues recevront des solutions analogues, à repérer les secteurs et endroits à risques de façon à les éviter ou à les traiter spécifiquement, et à préparer les études détaillées de chaque ouvrage.

4.3.1.1 Les zones

Les études géotechniques de zones à urbaniser ou industrielles ne dépassent habituellement pas l'étape de l'APS, voire de la faisabilité, si toutefois l'aménageur en fait entreprendre une, car il ne réalise souvent que les terrassements généraux et les VRD d'ensemble dont il laisse le soin à l'entreprise, puis passe la main aux acquéreurs des secteurs ou des lots qui étudient ensuite spécifiquement leurs propres ouvrages. Cette pratique peut le conduire à des déboires lors de la réalisation des travaux qui lui incombent et à des litiges avec certains acquéreurs qui se trouvent parfois confrontés à des difficultés géotechniques de

construction altérant plus ou moins l'économie de leur projet ; plus rarement, cela peut aller jusqu'à des dommages ou même des ruines affectant tout ou partie des ouvrages de la zone.

4.3.1.2 Les lotissements

Les études géotechniques de lotissements de petits immeubles et/ou de pavillons sont souvent à peine plus correctes car l'aménageur qui vend des lots prêts à l'habitation, ne demande généralement à la géotechnique que la valeur de la pression admissible des fondations, seul paramètre aisément traduisible en coût qu'il veut évidemment réduire autant que possible. Les acquéreurs qui ignorent cela, constatent ensuite parfois que le site est inondable, qu'il est dominé par un coteau ou une falaise instable, que les matériaux d'assise sont compressibles ou gonflants..., et que leur construction n'est pas adaptée à une situation qui n'a rien d'hasardeuse ; Confrontés à des dommages qui peuvent aller jusqu'à l'impropriété de destination voir à la ruine, il leur reste à attendre une décision de justice qui les indemnisera plutôt mal au bout d'un temps pratiquement indéterminé.

4.3.1.3 Les tracés

Les études de tracés d'autoroutes, voies ferrées, canaux, pipe-lines, grands tunnels sont toujours beaucoup plus sérieuses et complètes car l'aménageur réalise la totalité de l'opération, de sa faisabilité à la construction de tous les ouvrages qui la compose. Ces études concernent souvent plusieurs variantes simultanément ; elles doivent être solides et complètes pour permettre d'arrêter et de justifier le choix du tracé définitif, en évitant de traverser des sites d'aménagement difficile, mais dans des régions au relief accidenté on peut rarement le faire pour tous (*Fig. 5.1.1.3* et *5.3.2.2*). Couramment menées aux étapes de l'APS et de l'APD pour l'ensemble du tracé retenu, elles peuvent être poursuivies jusqu'aux STD dans les secteurs ne présentant pas de difficultés particulières ; elles servent ensuite de bases aux études spécifiques des secteurs à risques et des ouvrages importants.

4.3.2 Les ouvrages

On étudie un projet d'ouvrage en le modélisant comme un système complexe rassemblant des sous-systèmes, économie, architecture, géotechnique, ingénierie, construction,... pour le concrétiser par l'ouvrage qui, s'il est conforme à sa destination, valide le projet. Dans cette démarche, la géotechnique aborde ce projet comme un sujet d'étude scientifique ; par l'observation (terrain), l'expérimentation (sondages et essais) et le calcul (géomécanique), elle bâtit un modèle de forme et de comportement de l'ensemble site/ouvrage (*Fig. 3.2*) qui sera éprouvé durant la construction, ce qui imposera éventuellement de le modifier à la demande pour obtenir un modèle définitif, validé ou non à plus ou moins long terme par le comportement de l'ouvrage achevé.

Si l'ouvrage est l'élément d'un aménagement de zone ou de tracé dont on a réalisé l'étude générale sérieusement, il est possible de commencer son étude géotechnique à l'étape de l'APD ou même des STD, car son site est déjà caractérisé. S'il s'agit d'un ouvrage isolé ou si l'étude générale a été plus ou moins négligée, que son implantation et son emprise soient ou non déjà arrêtées, il est nécessaire de commencer à l'APS ou même à la faisabilité pour caractériser son site et ainsi donner un cadre général à l'étude ; cette étape peut être plus ou moins formelle dans un site connu comme celui d'une agglomération.

4.3.2.1 Excavations et soutènements

Une excavation est le produit du déblayage d'un certain volume de géomatériaux pour l'exploiter ou en prendre la place ; il s'agit donc d'ouvrages dont les usages sont différents, mais dont les principes de constructions sont analogues ; que l'excavation soit temporaire ou permanente, il faut définir les modalités d'extraction et d'utilisation éventuelle des matériaux, la façon dont on devra éventuellement épuiser l'eau susceptible de s'y rassembler, celle de soutenir ses parois provisoires et éventuellement définitives.

► Mode d'extraction

Les terrassiers ont l'habitude de classer les matériaux en meubles qui se terrassent à la lame, au godet, à la tarière..., moyens qui se terrassent au défonceur, à la haveuse, à la fraise... et durs qui se terrassent aux explosifs, au brise-roche... ; le DTU 12 de terrassements pour le bâtiment, définit sept catégories de matériaux, de *a – terrain ordinaire* (sic) à *g – roche de sujétion* (?). L'imprécision évidente de ce classement ouvre la porte à d'interminables discussions lors des règlements de travaux. La sismique-réfraction (cf. 5.7.2.3.1) permet de faire beaucoup mieux : la classification que Caterpillar a proposée en 1958 pour faciliter le choix des méthodes d'extraction, est fondée sur le modèle sismique du site et la vitesse sismique de chaque matériau type ; elle a été longtemps décriée en raison de résultats prétendus mauvais auxquels on parvenait par manque d'expérience, mise en œuvre incorrecte et/ou exploitation erronée. En une cinquantaine d'années, cette classification a été bien améliorée et donne entière satisfaction si elle est correctement sollicitée : quand les terrassiers qui l'utilisent pour eux-mêmes, contestent les résultats présentés par d'autres, c'est généralement pour appuyer des demandes de révisions de prix.

► Matériel mis en œuvre

Sur un chantier donné, pour un ouvrage donné, le choix du matériel mis en œuvre dépend de nombreux facteurs ; la nature, la structure et la vitesse sismique des matériaux à extraire en font partie, mais aussi le type et les dimensions du chantier, de l'ouvrage, le délai imparti au terrassier, le parc de matériel dont il dispose, d'éventuelles contraintes de voisinage... Certains matériels spécialisés ont un usage strictement déterminé comme les grand tunneliers, construits pour un chantier, parfois abandonnés à la fin dans une petite dérivation, plus couramment restructurés pour passer à un autre chantier ;

l'usage de tels matériels ne souffre ni imprécision ni erreur géotechniques, particulièrement pénalisantes : selon les termes du marché, la galerie de ce métro devait être entièrement exécutée à la fraise et le recours aux explosifs n'avait été prévu que pour mémoire ; le seuil de changement de méthode avait été fixé à une valeur de résistance à la compression simple du matériau du front ; contrairement à ce que l'on attendait, ce matériau s'est révélé particulièrement hétérogène, passant très vite de la marne au poudingue, de telle sorte que dans certaines zones à dominante poudingue, on utilisait les explosifs, même dans la marne dont la résistance était pourtant sous le seuil ; pour étayer leurs points de vue évidemment différents, le maître d'ouvrage et l'entrepreneur prélevaient sur le même front, qui de la marne, qui du poudingue et les ordres de services contradictoires pleuvaient, ce qui n'a favorisé ni la conduite du chantier ni le règlement des travaux.

On peut être moins exigeant avec les matériels courants de travaux publics de surface qui peuvent être rapidement remplacés ou adaptés comme les pelles sur chenilles qui peuvent être équipées d'outils de toutes sortes, godets plus ou moins étroits et volumineux en butte, rétro ou dragueline, brise-roche, tarière...

► **Conduite de l'extraction**

La conduite de l'extraction dépend en grande partie des conditions du chantier. On ne peut évidemment pas travailler de la même façon dans une fouille, une tranchée ou une galerie si le géomatériau est ou non aquifère, sensible ou non aux variations de teneur en eau inévitables en cas d'intempéries, si les parois sont plus ou moins stables, si l'on envisage ou non de réutiliser le matériau extrait, si l'on est en rase campagne ou en ville...

En site encombré, il est souvent très difficile d'imposer aux terrassiers une méthode et une cadence assurant la sécurité d'un chantier tant qu'un incident ne survient pas : ils n'apprécient pas le travail par panneaux contigus ou alternés ou en gradins, qui limite les largeurs et les hauteurs d'attaques au détriment du rendement mais qui permet au besoin, des interventions rapides et efficaces. Il est encore plus aussi difficile d'obtenir un accord sur un phasage puis une parfaite synchronisation entre le terrassier et le constructeur du dispositif de soutènement ou de confortement à l'intérieur de la fouille ; quand arrive un accident, c'est généralement que le terrassier est allé trop vite en passant d'un panneau ou d'un gradin au suivant, sans attendre que le béton du masque projeté ou l'injection de collage des épingles ou des tirants ait fait totalement prise. C'est la raison principale du recours quasi systématique aux soutènements périphériques mis en place avant l'ouverture de la fouille, parois moulées, berlinoises, écrans divers, si possible autostables, car autrement la pose de tirants d'ancrage ramène souvent à la situation précédente ; le contreventement intérieur est peu apprécié tant par le terrassier que par l'entreprise de gros œuvre.

Quand il n'est pas imposé au départ par la nature du matériau, l'usage des explosifs n'est pas apprécié des terrassiers car il casse le rythme de chantiers qu'ils voudraient continuer. Ils le présentent souvent comme un « aléa géologique » qu'ils entendent se faire rémunérer en conséquence. En agglomération, cet usage a mauvaise presse dans le public et auprès des administrations

qui craignent l'accident ou le dommage aux constructions voisines. Le risque est pourtant quasi nul si l'abattage a été bien étudié et s'il est bien conduit ; les nuisances sont moindres que celles de l'usage du brise-roche ; le chantier est plus rapide, le bruit et les vibrations sont moins gênants car bien plus brefs et tout à fait contrôlables. Dans le gneiss très dur du centre de New-York, au pied d'une tour, il est habituel de terrasser aux explosifs à l'emplacement d'un nouveau bâtiment ; à Marseille et dans beaucoup d'autres villes françaises, l'usage des explosifs est, sinon interdit, du moins soumis à de telles conditions de mise en œuvre qu'il est pratiquement impossible.

► Épuisement – étanchement

Si le site est aquifère et si on ne doit pas pénétrer dans l'excavation, le dragage est la meilleure solution dans un matériau meuble ou ameubli ; c'est le cas de l'exploitation de grave alluviale qui, par ailleurs, peut poser un problème de pollution de nappe. S'il faut y pénétrer, on doit épuiser l'eau souterraine qui afflue constamment par pompage direct, radier drainant, rabattement de nappe... ou empêcher qu'elle afflue en établissant un barrage à la périphérie de la fouille par congélation, injection, rideau de palplanches, paroi moulée, bouclier de confinement, cuvelage... Pour en décider, il faut apprécier le débit susceptible d'être mis en jeu et la stabilité des parois, tenir compte des conditions du chantier puis des conditions d'exploitation de l'ouvrage et apprécier les risques encourus par les riverains éventuels.

Par les moyens de l'hydraulique souterraine, l'estimation du débit futur d'une excavation d'un sous-sol, d'une galerie... ou d'un ouvrage est très hasardeuse car la perméabilité d'un massif et les conditions aux limites de l'écoulement sont extrêmement difficiles à établir ; de plus, pour un chantier durable ou un ouvrage permanent, les conditions hydrauliques peuvent varier : la perméabilité du matériau peut se modifier par colmatage ou débouillage et le niveau de la nappe, peut monter ou baisser plus ou moins vite et sur des périodes plus ou moins longues ; les erreurs de 1 à 10 dans les deux sens ne sont pas rares ; dans le sens inverse, on réalise des travaux inutiles et on dépense de l'argent pour rien ; dans le sens direct, on est souvent obligé de modifier acrobatiquement et à grands frais en cours de chantier ou en cours d'exploitation, ce que l'on avait prévu ou fait ; les injections rétablissent souvent les situations difficiles, notamment avec les radiers drainants des parkings enterrés et les défauts des parois moulées. En fait, il est pratiquement impossible d'obtenir l'étanchéité totale et durable d'un ouvrage enterré blindé ; il est nécessaire de toujours y prévoir un réseau intérieur de collecte des eaux infiltrées et de loin en loin, des travaux d'étanchéisation ; de plus, au-dessus du niveau de la nappe, un réseau de drainage périphérique est presque toujours nécessaire pour recueillir les infiltrations de proximité. Quoi que l'on fasse, on perturbe plus ou moins le régime naturel de la nappe, parfois très loin de l'ouvrage ; les troubles qui en résultent, sont fréquents dans les sites urbains : en cas d'épuisement, on risque d'assécher des puits, endommager des immeubles par tassement, des réseaux enterrés par création de fontis... ; en cas de barrage, on risque d'assécher des puits à l'aval, inonder des caves à l'amont ; les injections peuvent colmater des égouts, envahir des caves, endommager des bâtiments en faisant gonfler les matériaux de leurs assises...

► Tenue des parois

Les versants naturels et les bords d'excavations sont limités par des talus dont la pente dépend de leur hauteur verticale et des caractéristiques instantanées du géomatériau qui les constitue. Ces matériaux se décompactent naturellement en vieillissant : sans qu'aucune action extérieure ne les perturbe, la stabilité de leurs talus se dégrade jusqu'éventuellement au glissement ; un glissement peut aussi se produire si la pente de talus croît par déblayage ou érosion. En fait, les talus glissent quand la cohésion du matériau disparaît et/ou quand l'eau souterraine afflue, les deux phénomènes étant souvent liés. La stabilité des pieds de talus dépend du type de glissement qui les affecte ; s'il s'agit de glissements profonds, les pieds participent au mouvement en se boursoufflant plus ou moins, à plus ou moins grande distance du bord ; les fonds de déblais peuvent aussi se soulever et les talus se déformer plastiquement sous l'effet de l'allègement de pression géostatique qu'entraîne l'extraction des matériaux. Si les matériaux sont aquifères, la pression hydrostatique peut participer au soulèvement des fonds et à la déformation des parois ; la pression de courant peut déstabiliser les matériaux et entraîner la production de renards en pied de talus ou en fond de fouille.

La stabilité des talus rocheux et des falaises dépend essentiellement de la fissuration du massif et en particulier des directions relatives des plans de fissuration et du plan du talus, ainsi que de la densité et de l'état d'ouverture des fissures. En considérant la structure du massif et notamment la nature et la forme de sa fissuration, on peut ainsi imaginer assez correctement quel type d'instabilité est susceptible d'affecter une paroi rocheuse naturelle ou artificielle ; il est beaucoup plus difficile de prévoir les volumes impliqués dans un futur éboulement. Aucun calcul sérieux ne permet d'y parvenir, même dans un cas parfaitement déterminé et répétitif comme celui du front de taille d'une carrière dont la stabilité, pourtant à court terme seulement, est un sujet de préoccupation permanent pour l'exploitant. L'étude de la stabilité d'une paroi rocheuse ne ressortit à la loi de Coulomb qu'à travers la fissuration du massif qu'elle limite : la paroi paraît stable mais il en pleut pratiquement sans arrêt des pierres, des blocs, voire des pans entiers, selon les caractères géométriques et mécaniques de cette fissuration dont le plan principal est subvertical, raison majeure pour laquelle la paroi l'est elle-même. En cas d'instabilité latente, les banquettes et risbermes de talus, les pièges et merlons de pied bien étudiés et bien construits, sont généralement efficaces comme protection d'ouvrages en pied quand ils sont bien étudiés et bien construits ; on les évite souvent, car ils prennent beaucoup de place. Les purges sont des armes à double tranchant ; elles peuvent, sans que l'on sache trop pourquoi, aussi bien stabiliser la paroi au moins pour un temps, que déclencher à plus ou moins long terme, un éboulement pire que celui que l'on voulait éviter. En fait, la stabilité d'une paroi rocheuse pose toujours un problème spécifique et il n'y a pas de méthode miracle pour le résoudre.

► Soutènement

Dans la plupart des cas, les talus subverticaux et les excavations souterraines ne peuvent pas demeurer ou devenir stables sans être soutenus ; selon sa fonction

particulière, un dispositif de soutènement peut être isolé, généralement définitif, mur de soutènement, de quai, voile de falaise... ou, provisoire ou définitif, faire partie d'un ouvrage tout ou partiellement enterré, paroi de fouille urbaine, de sous-sol d'immeuble, revêtement de tunnel... Les partis et méthodes constructifs sont innombrables ; leur choix dépend des conditions particulières qui imposent le recours à un soutènement ; on peut néanmoins caractériser quelques types de procédés, car quels qu'ils soient, leur principale fonction est de rendre ou donner au géomatériau la cohésion qu'il risque de perdre s'il est évolutif, qu'il n'a pas ou qu'il n'a pas encore acquise si c'est un remblai.

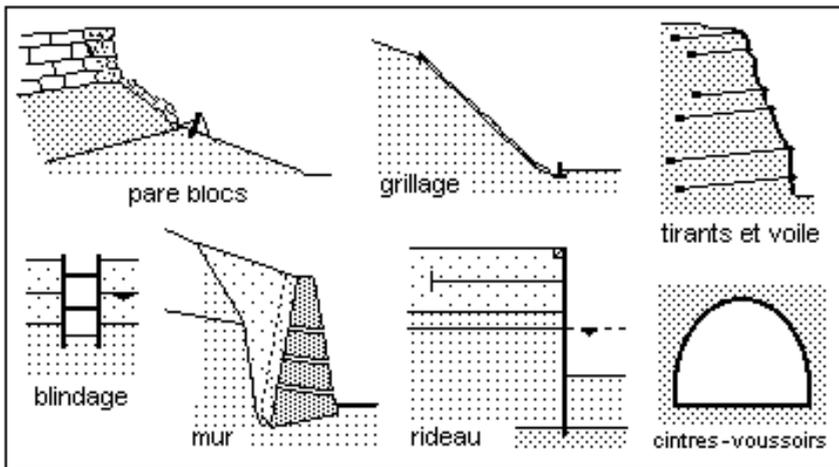


Figure 4.3.2.1.6 – Ouvrages de soutènement

Les façons de stabiliser ou de soutenir les talus naturels ou artificiels, ainsi que les parois de fouilles sont nombreuses et variées, du simple drainage qui est souvent très compliqué à étudier et à mettre en œuvre au classique mur de soutènement qui n'est efficace que s'il est bien fondé et bien drainé, comme du reste tous les autres procédés de stabilisation, gabions, enrochements, parois moulées, berlinoises, voussoirs... ; aucun n'est universel et le choix de l'un d'eux dépend du site, du type d'excavation et de l'encombrement de ses abords. Un mur de soutènement est un ouvrage isolé permanent destiné à stabiliser un talus naturel ou de remblai, mais par construction, même dans le cas de talus naturel, le matériau chargeant directement le mur est toujours du remblai ; construit en pied de talus, il s'oppose à la poussée géostatique et à d'autres permanentes ou temporaires, hydrostatique, surcharges, chocs latéraux... par la butée en pied du matériau en place et éventuellement par des tirants ou des butons disposés en arrière de sa partie libre. Si le rôle des tirants est prépondérant dans l'équilibre de l'ouvrage, le soutènement est un voile de liaison entre eux, béton, plaques d'acier, grillage... ; une batterie de tirants non reliés peut même suffire à stabiliser un matériau favorable. Le soutènement provisoire puis le revêtement d'une excavation souterraine évitent les effets des déformations

plastiques et de l'écaillage du matériau, compensent éventuellement la pression hydrostatique, plus rarement une surcharge.

On étudie d'abord la stabilité générale du site de construction de l'ouvrage, notamment s'il s'agit d'un versant naturellement instable ; l'ouvrage de soutènement n'intervient alors que par l'effet de son poids propre. On étudie ensuite la stabilité de l'ouvrage lui-même, ou plutôt de l'ensemble indissociable site/ouvrage ; on affecte le résultat obtenu d'un coefficient de sécurité qui dépend de la durée d'usage de l'ouvrage et des dommages que sa ruine entraînerait ; il ne saurait être supérieur à 1/2. S'il y a de l'eau souterraine en amont de l'ouvrage, il faut tenir compte de la pression hydrostatique et de la pression de courant qui sont nettement supérieures à la poussée du matériau soutenu ; un ouvrage mal drainé peut devenir un barrage et accroître dangereusement ces pressions. Par ailleurs la présence mais surtout l'afflux d'eau en amont d'un ouvrage de soutènement peut largement diminuer la résistance à la rupture du matériau et accroître sa capacité de gonflement. Pour les ouvrages extérieurs, des périodes répétées d'alternance saturation/dessiccation peuvent avoir des effets cumulés très dommageables à plus ou moins long terme. Plus que sur un résultat de calcul, l'expérience montre que la stabilité propre d'un ouvrage de soutènement repose sur l'efficacité de son système de drainage, la pérennité des caractéristiques mécaniques du matériau qu'il soutient, de celles du matériau sur lequel il est fondé ou dans lequel il est ancré, de surcharges et autres événements temporaires imprévus.

Au moyen de la méthode de Fellenius/Bishop et de ses dérivées informatiques, la géomécanique prétend résoudre tous les cas possibles de stabilité des parois d'excavations dans les matériaux qu'elle appelle sols, c'est-à-dire dans tous ceux dont on peut mesurer la densité, l'angle de frottement et la cohésion ; mais elle manipule très difficilement la cohésion qui, avec les effets hydrostatique et hydrodynamique, est le principal facteur de stabilité. Les talus glissent, les murs, les parois, les rideaux se renversent, les revêtements, les couvelages implorent quand la cohésion disparaît et/ou quand l'eau souterraine afflue. La géomécanique ne permet pas de traiter correctement ces problèmes ; elle est néanmoins l'outil qu'il importe d'utiliser en tous cas, mais avec circonspection, ou si l'on préfère pour préserver la crédibilité de la méthode, avec un coefficient de sécurité qui en est l'expression mathématisante, généralement dénuée de tout fondement probabiliste rigoureux ; d'innombrables programmes informatiques permettent de calculer tous les cas d'écoles possibles. Il faut ensuite valider les résultats obtenus, quelle que soit la méthode.

Par contre, on ne sait pas calculer ni même projeter rationnellement un ouvrage de confortement de paroi rocheuse instable : à plus ou moins long terme, les grillages, épingles, tirants, masques, contreforts... sont presque toujours emportés ou contournés lors des éboulements qu'ils devaient éviter et qu'au mieux, ils ont retardés et/ou amoindris. Quelle est la cohésion du granite des Grandes Jorasses qui assure la stabilité apparente de ces immenses parois subverticales ? ; cette angoissante question que se posent tous les théoriciens est un non-sens : la pose-t-on pour l'acier ou le béton d'un pilier ? : on caractérise mécaniquement ces matériaux et les géomatériaux très résistants par leur résistance à la compression simple R_c , paramètre qui synthétise c et φ ; en fait, on

constate ainsi inconsciemment que l'on ne sait pas traiter géomécaniquement le cas de la paroi d'un massif rocheux ; pas mal de gens ont essayé d'y parvenir sans grand succès, même avec un ordinateur et un logiciel fondé sur la manipulation d'éléments finis.

► Utilisation des matériaux extraits

Pour une carrière, l'utilisation des matériaux extraits est évidemment fixée avant qu'elle soit ouverte ; c'est plutôt la rentabilité de l'exploitation qu'il s'agit de déterminer, coût de l'extraction et du traitement, valeur marchande du produit final, des sous-produits et du transport vers les lieux d'utilisation...

En génie civil et plus particulièrement sur les chantiers de grandes voies de communications, autoroutes et voies ferrées, on essaie toujours d'obtenir l'équilibre déblais/remblais. Pour cela il est nécessaire d'avoir bien caractérisé les matériaux que l'on va extraire afin de décider ce que l'on va en faire, mise en dépôt, remblais courants, corps de chaussée... L'Équipement a mis au point des recommandations très efficaces pour y parvenir, les RTR (*Recommandations pour les Terrassements Routiers*) fondées sur l'identification des matériaux à mettre en œuvre, – granulométrie, limites d'Atterberg, équivalent de sable, teneur en eau... On peut ainsi classer les matériaux selon une grille qui débouche sur la façon de les utiliser et de les mettre en œuvre. Les reproches qu'on adresse à cette méthode, ont les mêmes motifs que ceux adressés à la méthode sismique pour l'extraction ; ils reposent sur un manque d'expérience et/ou sur une utilisation erronée. Il faut aussi que l'extraction soit strictement programmée et le programme bien suivi : sur l'une des attaques d'une grande tranchée d'autoroute, il y avait un calcaire qui devait fournir un excellent matériau de chaussée pour l'ensemble d'une section ce qui est rare et extrêmement profitable, alors que sur l'autre attaque, il y avait un calcaire marneux seulement acceptable en corps de remblais ; pour optimiser le déroulement de son chantier, le terrassier a attaqué du côté du calcaire et l'a mis en remblai sans que le maître d'œuvre l'en ait empêché ; quand on a fini par se préoccuper du matériau de chaussée, il n'y en avait plus car l'extraction avait atteint le calcaire marneux ; il a fallu élargir inutilement la partie calcaire de la tranchée pour se procurer le matériau indispensable que l'on avait auparavant gaspillé.

Diverses méthodes de traitement physico-chimique permettent d'améliorer des matériaux naturellement inutilisables ; après caractérisation du matériau, il est généralement nécessaire de procéder à des essais d'abord au laboratoire puis sur le terrain avant de décider quel traitement mettre en œuvre ; le coût de l'opération doit évidemment être inférieur à ceux de la mise en dépôt du matériau inutilisable et de l'approvisionnement du matériau de substitution. Certains matériaux très organiques, ne peuvent pas être traités efficacement.

4.3.2.2 Les remblais

La construction de remblais pose au moins trois problèmes géotechniques ; le premier concerne la stabilité et la préparation de l'assise, le second concerne le choix et la mise en œuvre du matériau utilisé, le troisième concerne la stabilité propre de l'ouvrage et en particulier de la plate-forme qui est son organe

fonctionnel ; il est évidemment lié aux deux autres. Dans le cas de digue ou de barrage en terre, se pose en plus le problème de l'étanchéité du massif qui impose des matériaux et des structures particuliers. Sauf dans le cas de grands ouvrages, les problèmes géotechniques de remblais sont souvent traités très légèrement avant que survienne un accident : empiler de la terre sur un terrain ne semble généralement pas une opération très compliquée et très risquée. Les dommages que peuvent subir ces ouvrages et ceux qu'ils peuvent faire subir à d'éventuels ouvrages qu'ils supportent ou voisins, prouvent largement le contraire ; pour s'en convaincre, il suffit de se promener sur une route secondaire à flanc de coteau argileux après un gros orage, ou de visiter un pavillon construit sur terre-plein mal compacté, fissuré en tous sens peu de temps après son achèvement.

La stabilité de l'assise d'un remblai pose presque toujours un problème délicat car ce type d'ouvrage est généralement implanté dans un site ingrat, fond de vallée au sous-sol peu résistant et compressible, flanc de coteau à peine stable, bord de plan d'eau.... Dans le premier cas et selon la hauteur à atteindre, on risque le classique glissement, étudié par Coulomb à l'origine de la mécanique des remblais et depuis, dans tous les ouvrages de mécanique des sols ; pour l'éviter en conservant la hauteur prévue, on peut adoucir les pentes de talus et donc élargir l'assise, préconsolider le sous-sol par surcharge, drainage, pilonnage, cloutage... utiliser un matériau léger, naturel comme le pouzzolane ou artificiel comme le polystyrène, prendre le temps de la consolidation naturelle en travaillant lentement, ou un peu de tout cela avec quelques astuces moins courantes. À flanc de coteau, le risque de glissement qui implique le sous-sol du site, impose les mêmes types de précautions que dans le cas précédent ; si l'on redoute le glissement du corps de remblais sur la surface du sol, il est nécessaire d'établir une assise en redans et de bien drainer l'ensemble et plus particulièrement, les parties amont des redans eux-mêmes. S'il s'agit d'un barrage en terre, la surface d'assise est particulièrement vulnérable car il peut s'y développer par infiltration, des pressions hydrostatiques et/ou hydrodynamiques dangereuses ; on amoindrit les infiltrations par une tranchée parafouille et les pressions par drainage.

Le choix des matériaux de remblais à mettre en œuvre et la façon dont on le fait, est essentiel pour obtenir un ouvrage stable ; les spécialistes des routes ont mis au point un ensemble cohérent d'essais préalables, de directives de chantier et d'essais de contrôle : les essais classiques d'identification, l'essai Proctor... permettent de caractériser le matériau, de connaître le résultat que l'on peut attendre d'une mise en œuvre correcte ; dans tous les cas courants et même dans ceux qui le sont moins, routiers ou autres, il est avantageux de suivre les RTR pour définir les possibilités et les modalités de son utilisation pour tel ou tel type d'ouvrage, conditions atmosphériques, traitement préalable éventuel, épaisseur de chaque couche, énergie de compactage, type et classe du compacteur utilisable... En cours de chantier, des essais de plaque et ou de densité/teneur en eau, permettent de s'assurer de la qualité de la mise en œuvre ; l'objectif minimum que l'on doit viser, est d'obtenir les valeurs suivantes des paramètres de compactage, $Ev_2 \geq 500$ bars et/ou $Ev_2/Ev_1 \leq 2$, sans trop s'attacher aux illusoires 98 % de l'optimum Proctor que les cahiers des charges imposent généralement et que l'on ne mesure pratiquement jamais, ce qui peut créer des

problèmes de réception de la part d'un maître d'œuvre trop pointilleux. Un corps de remblai ainsi caractérisé a, presque à coup sûr, une bonne résistance et son état de consolidation sera quasi stationnaire ; il y aura donc peu de risque de le voir glisser ou tasser ; la chaussée ou le dallage qu'il supportera éventuellement, seront à peu près stables. Un cas de mise en œuvre délicate est celui du corps de remblai zoné ; des conditions granulométriques strictes doivent être respectées aux frontières des zones, faute de quoi, les éléments fins du matériau d'une zone, diffusent dans le matériau plus grossier de la zone contiguë ; il peut en résulter des tassements importants. Ceux qui projettent et construisent des barrages en terre comportant généralement un noyau argileux étanche et des talus graveleux ou rocheux, le savent et en tiennent compte ; pour les petits ouvrages routiers ou pour les réseaux enterrés, on s'en prémunit au moyen de nappes de géotextile ; cela n'est économiquement pas possible pour les grands remblais multicouches que l'on met parfois en œuvre pour utiliser un matériau médiocre, associé à un matériau de bonne qualité ; quand le matériau de l'une des couches est relativement creux, il peut se produire de graves dommages : un très haut remblai autoroutier avait été construit au moyen d'un empilement de couches de marne sèche et donc relativement dure, extraite au défonceur, et de calcaire brut d'abattage et donc de granulométrie assez grossière ; le compactage avait été exécuté avec les plus puissants engins disponibles et à la réception, au vu des résultats d'essais, l'ouvrage paraissait d'une solidité à toute épreuve ; mais la marne est ce que les RTR appellent un matériau évolutif ; à mesure que le remblai vieillit, elle s'altère, se divise et pénètre dans les vides des couches calcaires ; les déformations de ce remblai tant au niveau de la chaussée que sur ses talus, sont importantes et continues ; compte tenu du volume énorme de l'ensemble, il ne peut pas être traité et la plate-forme doit faire l'objet d'une surveillance et d'un entretien constants.

La pente de talus d'un remblai, même simplement déversé, est à peu près déterminée par la nature et la compacité du matériau utilisé ; en vieillissant, si aucune action extérieure ne le perturbe, le remblai se compacte sous l'effet de son propre poids et la stabilité du talus, précaire à court terme, s'améliore. Si donc l'assise du remblai a été bien préparée, si le matériau a été bien choisi et correctement mis en place, il y a très peu de risque de le voir se ruiner ; mais la plupart des accidents affectent de bons remblais mal assis ou de mauvais remblais bien assis ; la raison en est que peu de gens pensent à résoudre en même temps des problèmes différents. Les méthodes permettant de construire des remblais stables et sûrs sont très nombreuses et variées, généralement spécifiques d'un cas ; spécifiques de chaque phase de la construction, chacune doit être particulièrement bien définie, mise en œuvre et contrôlée de façon coordonnée.

Tant en cours de construction qu'en service, les remblais peuvent être des ouvrages dangereux pour leur voisinage. Les vibrations d'un compactage trop intense peuvent causer de graves dommages à de fragiles constructions voisines ; la consolidation des matériaux d'assise peut créer ce que l'on appelle des frottements négatifs et/ou des contraintes obliques susceptibles d'affecter des fondations profondes proches comme celles des culées d'un pont auquel le remblai sert d'accès ; un remblai mal drainé peut entraîner la ruine du mur qui

devrait le soutenir ; en glissant, un remblai peut endommager un ouvrage qui se trouve à son pied...

4.3.2.3 Les chaussées

Pour l'utilisateur, la chaussée est l'organe essentiel de la route ; de sa qualité dépend sa sécurité et son confort. Du point de vue géotechnique, la construction d'une chaussée de qualité implique que la plate-forme qui va lui servir de fondation, ait des caractéristiques physiques et mécaniques précises, que sa structure soit adaptée à la portance de cette plate-forme et au trafic envisagé, que les matériaux dont elle sera constituée soient de grande qualité et correctement mis en place, que l'ensemble chaussée/plate-forme soit parfaitement drainé ; les nids de poule, flaches, ornières et autres trous en formation (*sic*) que l'on voit un peu partout, plus ou moins signalés, montrent que ce n'est pas si courant que cela. Le *Catalogue des structures types des chaussées neuves* de l'Équipement, associé aux RTR pour le choix et la mise en œuvre des matériaux, permet d'obtenir des résultats très satisfaisants quand on l'utilise bien. Les plates-formes d'assise sont classées selon leur portance au niveau de la forme, mur de la chaussée, d'après les résultats d'un groupe d'essais hérité des Américains qui l'avaient mis au point pour la construction des aérodromes de campagne durant la dernière guerre mondiale ; en fonction du trafic et des matériaux utilisés, un large éventail de structures est proposé au projeteur puis au constructeur ; les dégradations à l'usage sont généralement dues au fait qu'ils essaient toujours de tricher plus ou moins avec la stabilisation de la forme, avec les épaisseurs et/ou les compositions des couches de fondation et de base et/ou avec le drainage : sur une forme rocheuse imperméable, la chaussée de cette section d'autoroute se déformait rapidement après chaque réfection ; le corps de chaussée était bien fondé, sa structure était correcte, mais il était mal drainé : un réseau de drains a permis de régler le problème. L'expérience que l'on peut dédaigner en l'appelant empirisme, et la rigueur sont primordiales en la matière ; les calculs et constructions automatiques de chaussées ne sont pas prêts d'être efficaces dans tous les cas réels.

4.3.2.4 Les fondations

Les fondations sont les parties enterrées d'un ouvrage qui lui servent de base par l'intermédiaire d'appuis ; elles transmettent au géomatériau les charges que supportent ces appuis. Les fondations superficielles, radiers souples ou rigides, semelles quadrillées, filantes ou isolées, sont celles que l'on ancre à proximité de la surface du sol ou en fond de fouille générale, si le géomatériau qui les supporte est capable de le faire sans rompre ni même subir des déformations susceptibles d'endommager l'ouvrage ; les fondations profondes, puits, caissons, et fondations spéciales, – pieux, barrettes..., sont celles qui, en l'absence d'un tel matériau en surface, reportent les charges en profondeur, sur un matériau capable de les supporter sans risque de déformation ou de rupture.

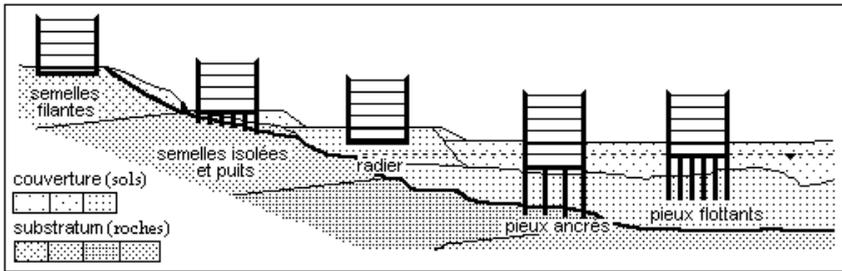


Figure 4.3.2.4 – Types de fondations

► Choix

Tout ouvrage provisoire ou permanent doit évidemment être conçu et fondé de façon qu'il demeure stable et à l'abri d'éventuels dommages. Les particularités naturelles et artificielles du site, topographie, structure, géomatériaux, eau souterraine, éventuellement exposition à des phénomènes naturels dangereux, encombrement, ouvrages voisins..., les particularités fonctionnelles et constructives de l'ouvrage devraient orienter son implantation, la forme et le type de sa structure et de son mode de fondation : on ne peut pas établir de semelles isolées sur de la vase ; il n'y a pas besoin de pieux pour fonder sur un substratum affleurant ; sur un sol susceptible de tasser, la structure doit être capable de se déformer sans dommage fonctionnel ou être assez rigide pour ne pas rompre ; sur un sol qui ne tasse pas et dans un site non sismique, la structure peut être quelconque. Il faut évidemment tenir le plus grand compte de l'exposition éventuelle du site à certains phénomènes naturels dangereux, maintenant en principe répertoriés dans les PPR (Plan de Prévention des Risques) communaux : la stabilité d'ensemble au glissement doit être contrôlée si l'ouvrage est implanté sur un versant ou en crête de talus dont il peut modifier l'équilibre par la surcharge qu'il y apporte ; on ne doit pas construire sans précaution dans les zones inondables et en zones sismiques, les constructions doivent respecter les règles parasismiques. En l'absence de réglementation locale, il serait sage de le faire partout car elle ne vient généralement qu'après l'accident ; on en est encore loin.

On choisit le mode de fondation pour adapter l'ouvrage aux caractères du site qui déterminent en grande partie ce choix, mais le type de structure de l'ouvrage ne doit pas être négligé. Il est rare qu'un seul mode de fondation convienne à un ouvrage donné dans un site donné : le géotechnicien doit toujours en proposer plusieurs car il ignore généralement les particularités de la structure de l'ouvrage projeté et entre autres son aptitude à supporter d'éventuels tassements qui ne peuvent être estimés que par une étude spécifique que l'on entreprend rarement ; il ignore aussi les possibilités de mise en œuvre et les coûts comparés de chaque mode et donc le choix que les constructeurs feront en définitive ; il ne peut que vérifier la stabilité théorique de chacun selon les données géotechniques et constructives dont il dispose. En considérant la surface d'application de l'ensemble de la structure comme un radier souple, on peut, grâce à Boussinesq ou à Westergaard, indiquer au projecteur la distribution des déforma-

tions possibles ; à lui de le traduire ensuite en contraintes dans sa structure et d'assurer sa solidité.

► **Tassements**

L'action des charges de fondation sur le géomatériau d'assise modifie son état initial. Cela peut y produire des déformations subverticales, les tassements, dont la répartition, l'amplitude, et les effets dépendront de la position de l'ouvrage dans le site, de ses dimensions, de sa forme et de sa masse, de la rigidité de sa structure ainsi que des caractéristiques de ses fondations. Si le matériau est relativement homogène et les charges régulièrement réparties et d'intensité modérée, le tassement est uniforme et n'affecte presque pas l'équilibre de l'ouvrage et l'état des contraintes dans sa structure ; mais dans la plupart des cas, en raison de l'hétérogénéité du matériau et/ou des charges, de la dissymétrie géométrique et/ou mécanique de la structure, le tassement diffère selon le point d'appui, ce qui affecte plus ou moins l'équilibre et/ou l'état des contraintes dans le matériau et provoque une certaine distorsion de la structure : la sécurité et la pérennité d'un ouvrage dépendent donc de l'aptitude de sa structure à supporter les effets de tassements différentiels que sa construction provoquera inévitablement, ou à s'adapter à eux.

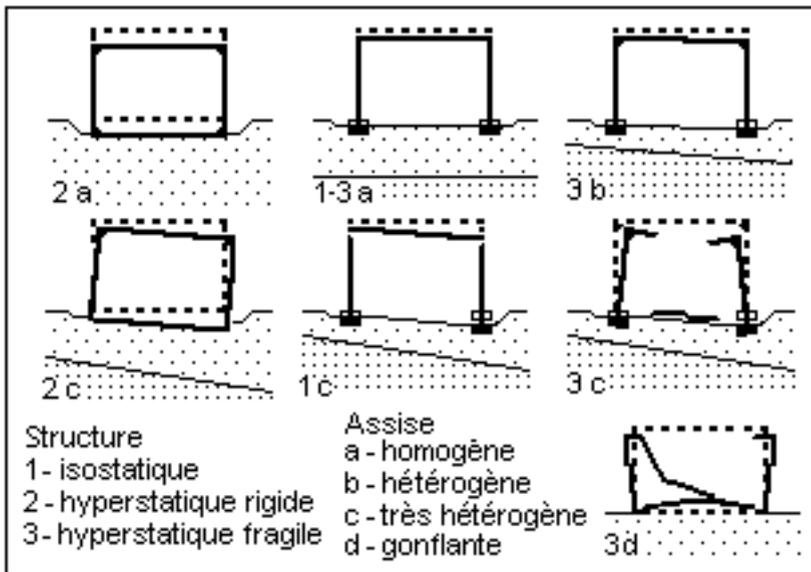


Figure 4.3.2.4.2 – Comportements d'ouvrages mal fondés superficiellement

Les structures très souples et vraiment déformables comme celles de ponts dont les tabliers reposent librement sur deux appuis, sont rares par ailleurs ; elles peuvent supporter des tassements différentiels importants sans risque de rupture mais alors l'usage de l'ouvrage peut être plus ou moins gravement affecté ; il en va à peu près de même pour des structures hybrides continues mais plus ou

moins souples et tolérantes comme celles des constructions métalliques ou en maçonnerie traditionnelle ; un ouvrage dont la structure est rigide, peut s'incliner sans rompre mais souvent au détriment de son usage ; si sa structure est fragile, les contraintes qui s'y développent y entraînent des déformations voire des ruptures : l'usage et la destination de l'ouvrage peuvent être plus ou moins affectés et à la limite, il peut en résulter la ruine. Le gonflement éventuel du matériau d'assise d'un ouvrage léger peut produire des déformations subverticales ascendantes ayant sur sa structure des effets analogues à ceux de tassements.

La tolérance de déformation d'un ouvrage dépend de son usage, de la rigidité et de la solidité de sa structure ; on la rapporte généralement à son inclinaison, fatale à plus de 1/150 pour la plupart des ouvrages, au plus égale à 1/500 pour des ouvrages courants relativement souples, moins de 1/1000 pour les structures fragiles et certains dallages industriels et même moins de 1/5000 pour les cheminées ou les bâtis de certaines machines ; c'est évidemment aux constructeurs et aux utilisateurs de la fixer dans chaque cas et au géotechnicien de leur indiquer comment y parvenir. Des ouvrages bien équilibrés comme certains réservoirs, immeubles ou plates-formes en remblais, peuvent supporter des tassements absolus de quelques décimètres à condition qu'ils soient correctement reliés à leurs abords et que leurs tassements différentiels soient limités ; les réservoirs métalliques dont le radier est souple, peuvent aussi supporter des tassements différentiels importants entre leur centre et leur périphérie, mais pas entre deux points de leur jupe. La continuité et la rigidité du système de fondation choisi peuvent plus ou moins compenser les effets des tassements sur une structure mal adaptée : des appuis isolés conviennent en l'absence de tassement ; des semelles filantes ou des pieux flottants liés par un chevêtre conviennent pour de faibles tassements ; on peut limiter les effets de forts tassements en construisant sur radiers ou sur des groupes de pieux flottants fortement liés, ou si le site s'y prête, sur pieux encastrés en pointe, ce qui supprime pratiquement tout tassement.

Un excès de charge pourrait provoquer la rupture plastique du géomatériau, ce qui entraînerait sûrement de graves dommages voire la ruine de l'ouvrage ; mais cela est facilement évitable : dans la plupart des cas, une telle charge est nettement supérieure à celle qui provoque des tassements nuisibles ; elle est donc très rarement atteinte, sauf pour les hauts remblais sur sols mous trop hâtivement montés ou pour les ouvrages dont la charge varie dans le temps et l'espace comme les groupes de silos.

Ainsi, pour le choix, la conception et la réalisation de tout système de fondation, le module et éventuellement la pression de gonflement, critères de tassement exprimant la raideur du sol et son aptitude à se déformer, sont plus contraignants que la contrainte admissible, critère de rupture exprimant la résistance ultime du sol, très rarement atteinte, sauf pour les hauts remblais sur sols mous ; c'est pourtant presque exclusivement sur ce critère que les projeteurs de structures fondent leurs études. La sécurité et la pérennité d'un ouvrage dépendront en premier lieu, de l'aptitude de sa structure à supporter les effets des tassements, forcément différentiels comme l'indique Boussinesq pour un matériau homogène et isotrope qui de plus ne l'est en réalité jamais, que sa construction

provoquera inévitablement, ou à s'adapter à eux. La répartition, l'amplitude, et les effets des tassements dépendront dans tous les cas, des dimensions, de la forme et de la masse de l'ouvrage, de sa position dans le site, de la rigidité de sa structure ainsi que des caractéristiques de ses fondations.

La définition des fondations d'un ouvrage ne devrait donc pas se limiter au contrôle de l'inéquation qui lie une descente de charge, une surface d'appuis et une contrainte admissible. On s'en contente pourtant presque toujours et parfois, on constate ensuite les effets des tassements négligés.

► **Calculs**

Les méthodes de calculs des fondations sont nombreuses et variées ; elles dépendent des habitudes locales, des appareils de sondages et d'essais, des programmes de mesures dont le géotechnicien dispose, de ce que les projeteurs ont appris à l'école et maintenant, des programmes qu'ils font tourner. Le modèle géomécanique schématique le plus simple dont devrait au moins disposer le projeteur d'une structure, est un multicouche subhorizontal qui peut être obtenu par sismique-réfraction et/ou par sondages ; le matériau de chaque couche y est caractérisé par son épaisseur et sa vitesse sismique, à laquelle on associe par mesures au laboratoire ou *in situ*, sa résistance à la compression simple ou sa pression-limite, sa raideur ou son module pressiométrique. Pour les ouvrages courants de bâtiment, le géotechnicien le fait rarement de façon explicite ; pour chaque type de fondation envisageable, il se contente alors généralement d'indiquer au projeteur qui n'en demande pas plus, une contrainte admissible, parfois une profondeur d'ancrage, rarement un mode d'exécution et pratiquement jamais, des conseils de mise en œuvre. Dans la plupart des cas, on contrôle que la charge rapportée à la surface d'appuis n'atteint pas la pression admissible que l'on égale généralement à la résistance à la compression simple du matériau d'assise à la profondeur d'ancrage ; on s'intéresse plus rarement aux tassements parce que Terzaghi a estimé que si la pression de service est au plus égale à cette résistance, le risque de rupture est sûrement écarté : le géomatériau se déforme très peu et ainsi le critère de tolérance au tassement d'une structure courante est généralement respecté ; et sauf éventuellement dans le cas du radier, s'il l'est pour chaque élément des fondations, il l'est *ipso facto* pour l'ouvrage. Cela facilite grandement le travail de la plupart des géotechniciens et des ingénieurs de structures qui suivent Terzaghi sans le savoir, en ignorant souvent le fondement de cette facilité qui peut se révéler dangereuse s'il y a des matériaux plus compressibles, moins résistants ou évolutifs sous le matériau d'assise : un modèle géomécanique fiable est donc toujours indispensable.

Mais le calcul géomécanique des fondations d'un ouvrage ne contribue que pour partie à leur définition et leur défaillance éventuelle résulte rarement d'une erreur de calcul. Et c'est effectivement presque toujours à la suite d'un défaut de conception et/ou de mise en œuvre que l'on constate une défaillance de fondation : en cas de dommage à l'ouvrage, on doit donc poser en principe que le sol n'est pas vicieux mais que l'ouvrage et/ou ses fondations ont été mal étudiés et/ou mal réalisés : le pire des matériaux naturels sur lequel on puisse construire est l'eau, densité 1, pas de frottement, pas de cohésion, pas de module, en mouvements quasi permanents et souvent violents, pires que ceux

du pire des séismes ; des bâtiments que l'on appelle aussi bateaux, sont portés par l'eau sans qu'ils subissent normalement des dommages ; certains ont des dimensions largement supérieures à la plupart des bâtiments terrestres connus : leurs structures sont adaptées au matériau qui les supportent ; quand l'un d'eux est endommagé, on accuse sa construction ou sa manœuvre, pas l'eau. Les dommages de la plupart des ouvrages de génie civil et de bâtiment résultent de l'inadaptation de leur structure aux déformations prévisibles ; pour une fondation superficielle, c'est parfois une insuffisance d'encastrement mais plus souvent, une altération du fond de fouille longtemps exposé aux intempéries entre son ouverture et le coulage du béton ; pour une fondation sur pieux, les défauts d'encastrement, les discontinuités de bétonnage au détubage, les bulles de boue de forage dans le béton, les pertes de béton dans des matériaux très mous, les poussées obliques... sont des causes de défaillances autrement graves que des indications imprécises, voire erronées de la pression admissible et/ou de la profondeur d'ancrage qui sont toujours contrôlées par les entrepreneurs sérieux.

► Mise en œuvre

Les fondations superficielles et certaines fondations profondes sont généralement réalisées par l'entreprise de gros œuvre, avec parfois l'intervention d'un terrassier soit pour établir une plate-forme stabilisée d'assise de radier, soit pour creuser les fouilles de semelles ou de puits ; cela entraîne parfois des problèmes de coordination de chantier. Les fondations spéciales sont toujours réalisées par des entreprises évidemment spécialisées, ce qui, quoi qu'on en puisse penser, n'est pas toujours une garantie de qualité. Les enregistrements continus des opérations de forages et des quantités de béton utilisées, évitent les erreurs grossières mais non les fausses manœuvres souvent dues à l'inattention ou à la précipitation.

Il n'y a en principe pas de problème de mise en œuvre des matériels de terrassement des fondations superficielles ou peu profondes qui sont essentiellement de classiques engins à godet ; des ancrages insuffisants résultent parfois de l'utilisation de godets trop larges pour la puissance de la machine et la résistance du matériau ; on risque ainsi des faux refus pour des semelles isolées qui devraient être ancrées à une profondeur proche de la limite du bras de la machine, dans un matériau dont la compacité s'accroît insensiblement avec la profondeur ; le conducteur d'engin arrête alors souvent son travail quand il devient difficile et non quand il est techniquement achevé. Les problèmes de mise en œuvre des matériels de fondations profondes sont assez rares avec les ensembles intégrés et quasi automatisés que l'on trouve sur les chantiers de grands ouvrages ; ils sont, fréquents avec les petits ateliers quelquefois vétustes qui n'exécutent que quelques pieux sur de petits chantiers de bâtiment ou d'ouvrages d'art courants dans des conditions économiques ingrates ; les taillants de tarières creuses sont parfois usés, le dernier élément est plus ou moins conique, le moteur de rotation est essoufflé, la flèche n'est pas très verticale, l'encastrement prévu est difficilement atteint, notamment dans les substratums argileux altérés dont la compacité s'accroît insensiblement avec la profondeur, le bétonnage en remontant est souvent hasardeux... : un immeuble de bureaux implanté dans une plaine alluviale, avait été fondé sur de tels pieux,

en principe ancrés dans une grave relativement compacte, après avoir traversé une quinzaine de mètres de vase, d'argile molle et de sable lâche ; il s'est rapidement déformé comme s'il subissait des tassements différentiels, inhabituels avec ce type de fondation ; à l'expertise des dommages importants qu'il avait subis, on s'est rendu compte qu'aucun pieu n'avait été correctement fait ; des uns aux autres, on obtenait un recueil d'à peu près tous les défauts imaginables de pieux ; la méthode de forage n'était pas du tout adaptée à ce genre de sous-sol, le matériel n'était pas des plus modernes et des mieux entretenus, l'équipe qui le servait, travaillant habituellement dans une région au sous-sol plus maniable, était tombée dans tous les pièges qu'elle avait rencontrés.

4.3.2.5 Captages d'eau souterraine

Les captages d'eau souterraine sont construits pour alimenter des réseaux de distribution en toute sécurité et à moindre coût. Cette évidence implique qu'ils produisent de façon permanente, de l'eau exempte de turbidité, aux débits minimums correspondant aux besoins maximums des utilisateurs, en consommant le moins d'énergie possible. La potabilité de l'eau brute est en train de passer du rang de qualité primordiale qu'elle était naguère, à celui de propriété curieuse et inattendue, tant la plupart des nappes françaises sont polluées ; le traitement bactériologique et chimique des eaux distribuées en France est maintenant quasi systématique ; celui des nitrates issus de pollutions agricoles, néfastes aux nouveaux-nés notamment, et celui du manganèse naturel, sont difficiles et onéreux.

Les techniques d'études et d'exploitation des eaux souterraines sont en principe très évoluées et bien au point. On constate à l'usage qu'en fait, beaucoup d'ouvrages et même de grands champs de captages, sont mal implantés, mal conçus, mal construits ou mal exploités et souvent, un peu tout cela à la fois. C'est que, même pour certains professionnels, les problèmes d'eau souterraine ont gardé un côté vaguement ésotérique, entretenu par le fait qu'ils sont très difficiles à résoudre ; une imprécision de 1 à 10 dans l'estimation d'un coefficient de perméabilité et donc d'un débit, est chose courante et les conditions aux limites d'un écoulement souterrain sont d'autant plus difficiles à préciser qu'elles varient sans cesse ; entre une prévision imprécise d'hydrogéologue et une indication fantaisiste de sourcier, la différence n'est souvent pas évidente pour un gestionnaire de réseau.

La conception, la construction et l'exploitation d'un champ de captage comptent sans doute parmi les opérations les plus laborieuses de la géotechnique. Celles d'un réseau karstique sont pleines d'imprévus car on manque de base théorique, et généralement, de points d'observation ; chaque réseau est un cas d'espèce ; sa structure est très complexe et son régime, particulièrement instable ; s'il n'est pas noyé en permanence et s'il n'est pas pénétrable, la possibilité de capter un de ses conduits aquifères est totalement aléatoire, comparable à la recherche d'une aiguille dans une botte de foin. S'il est pénétrable, il existe des méthodes géophysiques de pilotage de forages, qui donnent des résultats appréciables. Certains réseaux de plateaux karstiques secs en surface comme celui de l'Urgonien de La Doriaz, au NE de Chambéry, ont pu être ainsi

alimentés. L'alimentation en eau de Montpellier à partir du réseau de la source du Lez dont à l'origine seule la résurgence était captée, a fait l'objet d'études très longues et extrêmement onéreuses pour assurer la continuité de l'exploitation à l'étiage, toujours très sévère dans ce type de réseau et dans cette région. Les problèmes de protection contre la pollution d'un captage karstique sont particulièrement difficiles à résoudre, car l'eau ne filtre pas dans le réseau alors que pratiquement tous les trous naturels du plateau qui l'alimente, ont plus ou moins servi de dépotoirs. Celles d'un champ de captage de nappe alluviale sont plus faciles parce que l'on peut s'appuyer sur des bases théoriques classiques et que l'on dispose de nombreux points d'observation, puits, piezomètres... Certes, le calcul traditionnel ou informatique, ne permet pas de résoudre n'importe quel problème d'hydraulique souterraine ; mais dans la plupart des cas, la méthode de Theis, voire celle de Dupuit, conduit à des résultats satisfaisants pour peu que l'on ait correctement construit le modèle de l'aquifère que l'on veut exploiter ou que l'on exploite. Les modèles électriques naguère très efficacement utilisés, ont fait leur temps ; les modèles informatiques, bases de simulations numériques, sont maintenant classiques et bien au point ; encore faut-il qu'ils reposent sur des observations de terrain suffisamment nombreuses, des données sérieuses et qu'ils soient correctement mis en œuvre. Il arrive en effet que l'on rencontre des modèles de vastes nappes, fondés sur une carte piezométrique résultant de l'observation de quelques points d'eau existants et de quelques piezomètres mis en place à l'occasion de sondages plus ou moins coordonnés ; tout le reste, structure de l'aquifère, variations d'épaisseur, de perméabilité, limites physiques de la nappe, conditions hydrauliques aux limites, marnage... est estimé plus ou moins arbitrairement ; des modèles dont la réalisation est présentée comme un investissement profitable, sont censés faciliter la solution de n'importe quel problème qui se pose dans la nappe concernée : à l'endroit où se pose le problème, il suffirait de moduler la maille du modèle et d'interroger le programme de manipulation pour obtenir la solution, implantation d'un captage, augmentation d'un débit, gestion rationnelle des ressources, prévention d'une pollution... ; cela marche rarement comme l'espérait celui qui a financé un lourd investissement qui promettait plus qu'il ne donne.

Les ouvrages de captage eux-mêmes ne fonctionnent pas toujours très bien, soit qu'ils aient été mal conçus à l'origine, soit qu'ils se soient dégradés par défaut d'entretien. Il en résulte alors des coûts de productions importants qui paraissent naturels car le rendement d'un ouvrage est une notion quasi inconnue des exploitants ; obtenir le même débit avec un ouvrage mieux conçu ou le même ouvrage mieux exploité ou décolmaté, passe toujours pour une opération magique à qui la constate pour la première fois : un grand champ de captage des bords de la Saône alimente un très vaste district en partie urbain et en expansion ; il est sous la menace permanente de pollutions industrielles ou agricoles ; progressivement étendu depuis des lustres, on y trouve toutes sortes d'ouvrages plus ou moins profonds, puits en béton à barbacanes, puits à drains rayonnants, forages filtrants... ; seuls ces derniers atteignent le mur de la nappe, ils ont les meilleurs rendements, se colmatent le moins, sont les plus faciles à protéger de la pollution et sont de loin les moins onéreux à construire et à exploiter ; à l'origine, aucun ne l'était car ils n'avaient été forés que pour servir d'ouvrages d'essais préalablement à la construction des autres ; le contrôle

systématique du rendement de tous les ouvrages du champ a permis d'intégrer les forages filtrants d'essais à l'exploitation et d'augmenter largement la production totale tout en abandonnant certains ouvrages anciens particulièrement peu productifs et pour certains, très sensibles à la pollution agricole car relativement peu profonds ; par la suite, à mesure de l'augmentation des besoins, on n'a plus établi que des forages filtrants.

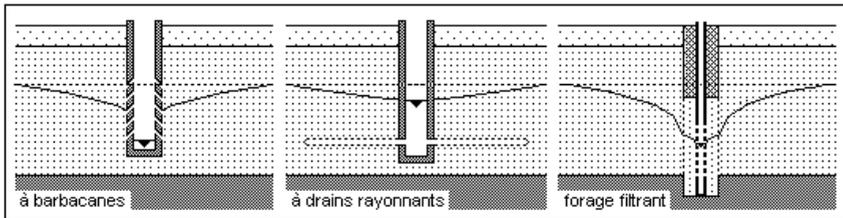


Figure 4.3.2.5 – Types d'ouvrages de captage de nappe

On ne peut pas être exhaustif à propos de défauts de captages d'eau souterraine ; chaque cas est spécifique et on en constate toujours de nouveaux et d'inattendus. En la matière, un monde sépare les principes des pratiques ; ce qui devrait être connu de tous est ignoré de chacun. Le ratage d'un captage ou le dysfonctionnement d'un champ, est toujours le fruit véreux d'une étude nébuleuse, d'un marché mal conçu et de la négligence de prosaïques règles techniques depuis longtemps éprouvées.

4.3.2.6 Réhabilitation des sites pollués

Les travaux de décontamination du sous-sol des friches industrielles et notamment des plus nombreuses dans et à proximité des agglomérations, anciens parcs de stockage d'hydrocarbures, usines à gaz, chimiques..., et des nappes polluées sont particulièrement complexes, longs, onéreux et d'efficacité douteuse ; on ne doit donc entreprendre que ceux qui sont réellement nécessaires, selon la nocivité des produits en cause et l'utilisation de la zone décontaminée que l'on se propose de faire ensuite. Les sites et les produits étant nombreux et variés, les fins souhaitées pouvant l'être tout autant, de tels travaux ne peuvent être que très spécifiques ; ils imposent des études préalables, indéterminées par manque de références et souvent même de but précis, afin de former un diagnostic, caractériser et évaluer le risque éventuel et si l'intervention se révèle alors nécessaire, à sa mise au point puis à la mise en œuvre et au contrôle de moyens spécifiques dont les résultats sont incertains : ceux du site de l'ancienne usine à gaz puis dépôt pétrolier de Saint-Denis, à l'emplacement du stade de France, n'ont pas été suffisants pour éviter de prendre énormément de précautions et néanmoins quelques risques, lors des terrassements, notamment de ceux en taupe.

Une opération de dépollution de sol et encore plus de nappe est ainsi particulièrement complexe ; elle doit donc être conduite selon une méthode rationnelle, par étapes et phases bien préparées et rigoureusement contrôlées. L'étude

détaillée géotechnique et technique du site et de ses abords est avant tout indispensable à la formulation d'un diagnostic permettant d'évaluer les risques éventuels, et si l'intervention se révèle alors nécessaire, à sa mise au point puis à la mise en œuvre et au contrôle de moyens spécifiques. Cela devrait conduire à agir après mûre réflexion et sans précipitation, en contrôlant continûment les résultats intermédiaires obtenus et en modifiant les moyens à la demande ; ce n'est pas ainsi que prétend fonctionner notre société qui se veut bien réglée, dans laquelle tout doit être programmé, financé au centime près et conduire à un résultat certain ; il en résulte que nombres d'opérations de réhabilitation de sites pollués, parfois entreprises sans qu'ils soient des facteurs de risques avérés, dans des buts plus médiatiques et/ou politiques que techniques, avortent avant que le résultat escompté ait été vraiment atteint, mais après que les crédits engagés aient été consommés ; il est rare qu'on l'avoue.

Les très nombreuses anciennes décharges non contrôlées d'ordures ménagères que l'on trouve à peu près partout et telles qu'on les exploitaient naguère ont généralement pollué et continuent à le faire de façon souvent irréversible, le sol et le sous-sol de zones plus ou moins étendues alentour, en particulier son eau souterraine qui a concentré la pollution, l'a véhiculée et l'a répandue ; elles devraient être aménagées de manière analogue, ce qui est très difficile voire à peu près impossible : quelle que soit la qualité de l'étude et de la réalisation de l'aménagement qui ressortissent en grande partie à l'hydrogéologie et à l'hydraulique souterraine dont la pratique n'est pas simple, leur innocuité à long terme est loin d'être assurée ; elles doivent donc être surveillées avec beaucoup d'attention..

4.3.2.7 Stockage des déchets

Le stockage des déchets quels qu'ils soient car il y en a peu d'inertes, impose des ouvrages étanches et il est difficile voire impossible d'en construire de tels à plus ou moins long terme car les matériaux comme le béton, certains plastiques et même l'acier inoxydable ou les verres, se dégradent et perdent peu à peu leurs qualités. La réglementation en la matière devient avec juste raison, de plus en plus contraignante pour les produits très dangereux et de très longue vie, comme les déchets nucléaires et certains déchets chimiques que l'on ne sait pas décomposer.

► Déchets courants

Les déchets ménagers et certains déchets industriels peuvent être stockés en surface dans des sites aménagés à cet effet ; ils doivent entre autres comporter des barrières de confinement étanches et drainées les entourant dessus, dessous et latéralement pour les isoler au mieux du milieu naturel, sol, sous-sol, eaux de surface et souterraines... afin d'éviter leur pollution. Ces barrières, généralement des couches de remblais argileux plus ou moins renforcés de géotextiles sont très fragiles ; elles peuvent fissurer, glisser et/ou se déformer sous l'effet des tassements incontrôlables des déchets qu'elles sont censées protéger ; elles doivent donc être correctement étudiées, réalisées et entretenues ; on ne sait toutefois pas comment elles évolueront à plus ou moins long terme.

► Déchets dangereux

Les caractéristiques naturelles des sites de stockage de déchets dangereux, chimiques et nucléaires, et la façon de les aménager sont loin d'être clairement définies et évoluent à mesure qu'on les étudie et qu'on accumule les expériences, souvent à la suite d'accidents ; à long terme, le granite est-il plus étanche que le sel et que deviendra l'ouvrage dans plusieurs siècles ou millénaires ? Saura-t-on même encore où il se trouve ? Techniquement, on ne sait pas répondre à ces questions, de sorte que l'on donne aux problèmes de stockage de déchets, des solutions politiques et émotionnelles dont on n'est pas capable d'estimer l'efficacité ; ces ouvrages ne sont pas des cadeaux aux générations futures.

Les cavités naturelles ne devraient jamais être utilisées pour le stockage souterrain de tels déchets, car l'eau peut y circuler de façon tout à fait incontrôlable. Le stockage souterrain doit en effet être effectué dans une cavité rigoureusement étanche, implantée dans une vaste formation imperméable, sel, argilite, schiste, granite... Ce peut être un réservoir enterré, métallique, enrobé de béton, lié au sous-sol par des injections de collage et d'étanchéité, une ancienne mine demeurée sèche après son abandon et réaménagée à cet effet, une galerie au rocher, une poche de dissolution ; la pérennité de l'étanchéité de ces ouvrages est préoccupante : à très long terme, une formation rocheuse, et notamment sa perméabilité, peut évoluer de façon imprévisible, jouet de phénomènes telluriques aux effets irrésistibles ; on ne sait pas trop ce qui se passerait en cas de séisme violent, ou plus généralement à la suite d'éventuelles déformations tectoniques.

Leur stockage superficiel impose une enceinte, radier et merlons périphériques, étanche et drainée ; on la construit par corroyage, remblayage et/ou bétonnage ; elle présente toujours des défauts, sous-estimation de la perméabilité des matériaux naturels et/ou améliorés, fissuration du béton... qui imposent son entretien rigoureux et la surveillance attentive de ses abords, notamment de son sous-sol, en particulier s'il est aquifère. Les implantations de tels dépôts sont évidemment préférables dans des régions au sous-sol imperméable et à l'atmosphère sèche, plutôt que dans des régions au sous-sol perméable et aquifère, à l'atmosphère humide et éventuellement corrosive.

4.4 L'accident géotechnique

Selon les lieux et les circonstances, l'effet pernicieux d'un événement intempêtif naturel, séisme, inondation... ou induit, tassement, glissement..., imprévu ou mal prévenu est un danger que courent de nombreux aménagements et ouvrages et parfois même à travers eux, les personnes, en raison de leur inadaptation au site et/ou aux circonstances. L'expression de ce danger est la dérive économique, le dysfonctionnement, le dommage, l'accident, la ruine, la catastrophe : le séisme abat l'immeuble, la tempête détruit la digue, la crue emporte le pont, inonde le lotissement, la ville manque d'eau en période d'étiage, le pavillon fissure sous l'effet de la sécheresse, les caves sont périodi-

quement inondées, l'immeuble voisin d'une fouille fissure et/ou s'affaisse, la paroi moulée s'abat, le remblai flue, la chaussée gondole, le talus de la tranchée routière s'éboule à chaque orage, le mur de soutènement s'écroule, le groupe de silos ou le réservoir s'incline, le barrage cède ou ne se remplit pas, le coût de l'ouvrage en construction s'envole en raison d'un aléa géologique réel ou non..., j'en passe et de pires. Un livre entier ne suffirait pas à énumérer les accidents géotechniques majeurs ou mineurs, passés, présents ou futurs.

Si le danger est clairement identifié et correctement analysé, on peut le réduire, s'en prémunir, en gérer l'expression qui est un sinistre susceptible d'être garanti par une assurance contractée par le maître d'ouvrage, les constructeurs, le propriétaire... ; si l'aléa est naturel et ses effets désastreux, les victimes sont indemnisées sur fonds publics au titre de « catastrophe naturelle ».

Les causes des accidents géotechniques sont souvent nombreuses mais l'une d'elles est généralement déterminante : – étude géotechnique absente, insuffisante, erronée, mal interprétée – vice ou modification inadéquate d'usage : implantation irréfléchie, conception inadaptée, mise en œuvre défectueuse, malfaçons... – actions extérieures : phénomènes naturels, travaux voisins... Mais beaucoup plus que techniques, les causes effectives sont comportementales : économies abusives, ignorance, incompetence, négligence, laxisme...

Nous devons nous accommoder d'un événement dommageable, éviter qu'il se produise ou d'être où et quand il est susceptible de se produire ; nous devons nous comporter, aménager et construire nos ouvrages en tenant compte de l'éventualité de tels événements et de ce que les juristes appellent le risque du sol. Car la nature n'est pas capricieuse, le sol n'est pas vicieux ; ils sont neutres. Les phénomènes sont naturels et les catastrophes sont humaines ; néanmoins, les textes législatifs et réglementaires qualifient les catastrophes de « naturelles » et le sol de « vicieux ».

4.4.1 Prospective

Les phénomènes susceptibles de produire des événements dangereux sont maintenant assez bien connus ; leurs cours sont compliqués mais intelligibles ; leurs manifestations intempestives sont plus ou moins fréquentes, irrépressibles mais normales ; dans une certaine mesure, elles peuvent être prévues, leurs effets peuvent être prévenus, les dommages aux ouvrages peuvent être limités voire évités, les personnes peuvent être protégées : on ne peut donc évoquer le hasard qu'à propos d'événements inconnus. Dans l'état de notre connaissance de la Terre, il n'y en a pratiquement plus. Les phénomènes connus peuvent l'être de façon plus ou moins précise.

Les phénomènes simples sont ceux qui ressortissent à la physique classique comme la gravité. Ils sont déterminés et leurs effets sont déductibles des circonstances ; la relation de cause à effet est certaine. Ils s'expriment par des lois simples, des égalités qui lient des variables sous la forme de fonctions comme l'équation du second degré pour la trajectoire des corps en chute libre. La courbe cartésienne représentative de chacun est unique, droite, parabole...

Les phénomènes complexes sont des réunions de phénomènes simples dont la nature et l'influence relative sont plus ou moins bien connues. Leurs événements paraissent plus ou moins aléatoires ; en fait, ils se produisent de façon à peu près connue, mais les relations de cause à effet qui semblent les régir sont incertaines et imprécises ; elles s'expriment sous forme statistique, intervalle de définition et occurrence de production ; à la valeur précise d'une variable, correspond la valeur probable d'une autre avec une fréquence donnée. La représentation cartésienne est un semis de points duquel on tire avec plus ou moins d'imagination, une courbe représentative plus ou moins continue ; elle ne peut généralement pas se traduire par une expression analytique simple. La crue de rivière est un des phénomènes naturels les mieux connus ; en un lieu donné, son intensité dépend principalement de la morphologie de l'amont, immuable, topographiée mais à petite échelle, des quantités d'eau qui s'évaporent, s'infiltrant et y ruissellent après un orage et ne peuvent être que très grossièrement évaluées, et de l'état de l'atmosphère à très court terme qui détermine l'intensité et la durée de la précipitation dont la crue résulte en fin de compte. Même avec un ordinateur très puissant, il n'est pas question de concevoir et d'exploiter une formule qui intégrerait tous ces paramètres et quelques autres négligés, et qui permettrait de prévoir la crue. Dans certains bassins particulièrement exposés, comme ceux des fleuves côtiers du Roussillon, il existe des procédures d'alerte très efficaces. Ailleurs, des estimations d'intensité plus ou moins fiables sont disponibles : la crue décennale est susceptible d'atteindre tel niveau sous tel pont, mais rien ne permet d'indiquer quand il s'en produira une.

Les événements mal connus sont identifiés, parfois expliqués mais leurs manifestations sont aléatoires et les relations de causes à effets, indéterminées ; aucune représentation mathématique ne peut en être faite ; ils ne sont pas prévisibles. C'est le cas des chutes de météorites ; la géologie historique montre que des chutes de tels objets extrêmement volumineux se sont produites de tout temps et ont eu des effets considérables. Il s'en produit toujours, mais on ignore tout de la prochaine chute.

On ne peut évidemment rien dire d'événements inconnus, sauf à faire de la science-fiction qui n'a pas sa place ici.

4.4.2 L'accident

Un concours de circonstances possible mais incertain entraîne qu'en un endroit donné, à un moment donné, un événement spontané ou induit, provoque un dommage, un accident, une catastrophe. Il n'y a pas forcément de relation directe entre l'intensité de l'événement et la gravité de l'accident.

La chute d'une pierre en montagne est un événement naturel banal, du type complexe ; la pierre tombe d'un talus rocheux de tranchée ou d'une falaise naturelle plus ou moins fissurée, à la suite d'un orage, au moment du dégel... Son énergie en fin de chute est plus ou moins déterminée par la loi de Newton, selon que sa trajectoire a été directe ou faite de bonds successifs. Quelle que soit son énergie, elle peut ne provoquer aucun dommage si elle tombe en pleine nature où elle peut alimenter un éboulis ; si elle tombe sur une route, elle peut

faire un trou dans la chaussée et ne pas causer d'accident s'il n'est pas très grand ou s'il est rapidement rebouché. Si un homme est sur la trajectoire de la pierre, selon son énergie et l'endroit où elle l'atteint, il peut à peine la sentir, être plus ou moins grièvement blessé, ou mourir ; si l'homme est isolé, il s'agit d'un accident individuel. S'il conduit un autocar dont la vitre est ouverte et perd le contrôle de son véhicule, ce dernier peut percuter un parapet et quelques passagers peuvent être blessés ; s'il n'y a pas de parapet, l'autocar peut tomber dans un ravin et tous les occupants, mourir ; c'est une catastrophe et elle n'a rien de naturel.

Les facteurs d'un accident sont multiples mais appartiennent à deux groupes nécessairement associés. Certains sont naturels comme la survenance d'une crue dans le lit majeur d'une rivière ; ils déterminent l'intensité de l'événement. D'autres sont humains comme la présence d'un lotissement ou d'un camping dans le lit majeur ; ils en déterminent la gravité.

Lors de la construction d'un ouvrage, l'accident résulte parfois d'une étude géotechnique défectueuse ou d'une façon incorrecte voire fautive de l'exploiter, si toutefois on en a effectué une, de défauts de conception et/ou de construction, mais plus généralement de l'inadaptation de l'ouvrage au site.

4.4.2.1 Selon les dommages

On a l'habitude de classer les accidents selon l'importance des dommages qu'ils causent ; un accident est d'autant plus grave que plus de personnes sont blessées ou y laissent la vie et/ou que les dégâts matériels sont plus coûteux. Ce classement est celui de la protection civile et des médias ; il convient mal à la géotechnique.

À petites causes grands effets et à mêmes causes effets différents, ce sont souvent des accidents géotechniques mineurs qui sont ici à l'origine de grandes catastrophes et sont là, à peine remarqués. Le séisme d'Agadir en 1960 (M_L 5,8) a fait plus de 15 000 victimes ; des séismes de telle magnitude se trouvent à l'origine de la plupart des ravages périodiques qui affectent certaines régions des Andes, de l'Amérique centrale ou du Moyen Orient ; ce sont presque des accidents banals au Japon. Le pont d'une petite route secondaire, emporté la nuit par une crue, devra seulement être reconstruit et ses usagers habituels seront condamnés pendant quelque temps à un petit détour ; celui d'une voie ferrée dont seulement une pile s'affaisse immédiatement avant le passage d'un train de voyageurs, est à l'origine d'une ample catastrophe et le trafic sera longtemps perturbé. De deux immeubles dans le même site, l'un se fissurera gravement et l'autre, mieux étudié et mieux construit, ne subira pas le moindre dommage.

4.4.2.2 Selon la cause

On les classe aussi en accidents naturels quand la cause est extérieure à l'ouvrage (séisme, crue, tempête, écroulement de falaise...), ou en accidents par vice du sol, selon la formule du Code civil, quand c'est l'ouvrage lui-même qui induit l'événement cause de l'accident (glissement de talus de déblais) et/ou qui subit le dommage (défaillance de fondations). Là encore, l'opinion commune ne

peut être totalement admise par le géotechnicien ; il sait en effet qu'en dernier ressort, nous sommes objectivement toujours responsable d'un accident géotechnique : les sites ne sont intrinsèquement ni favorables, ni hostiles, les sols ne sont ni bons ni mauvais et sûrement pas vicieux ; ce sont là des qualités humaines et non minérales et l'on ne saurait être à ce point animiste à propos de matériaux et de phénomènes aussi spécifiquement neutres, qui sont ce qu'ils sont ; à nous de nous en accommoder ou d'éviter leur fréquentation. Évidemment, ce sont les phénomènes géodynamiques actuels qui sont naturels, et non les accidents consécutifs aux risques que nous prenons en occupant les sites dans lesquels ils se manifestent ; les effets de ces phénomènes ne sont catastrophiques qu'autant que nous occupons ces sites sans prendre de précautions. C'est jouer sur les mots que de présenter ce que l'on appelle communément les catastrophes naturelles comme imprévisibles ; il faut dire qu'en fait, elles sont les conséquences d'événements géodynamiques normaux, aléatoires dans la mesure où, dans un site donné, on ne peut effectivement pas déterminer la date de leur avènement et leur intensité, mais parfaitement possibles sinon probables et logiquement prévisibles dans ce site : quelle que soit son intensité, une crue en pleine nature est, comme n'importe quel autre événement géodynamique, parfaitement normale. Elle devient catastrophique dans le seul cas où elle affecte un site habité non protégé, sans que généralement, il soit alors besoin qu'elle atteigne une intensité exceptionnelle. Or, on sait maintenant assez bien déterminer l'intensité et la fréquence des crues, et quand on ne dispose pas d'éléments d'archives pour y parvenir, l'examen attentif de la morphologie d'un site permet toujours de définir correctement l'étendue du lit majeur d'une rivière qui est à coup sûr, périodiquement plus ou moins inondé. On pourrait ainsi, dans la majorité des cas, se prémunir des effets désastreux des crues et de la plupart des autres événements géodynamiques qui, au moins, sont toujours relativement faciles à localiser.

Ce ne sont donc pas les caprices de la nature ou la perversité du sol qui causent les accidents géotechniques, mais nos imprudences ou notre inconscience à négliger d'adapter leurs ouvrages aux particularités naturelles des sites que nous occupons ou aménageons. Un accident géotechnique n'est alors fatal, c'est-à-dire déterminé d'avance de façon inévitable, que dans la mesure où nous avons créé certaines circonstances dont le concours entraîne l'enchaînement d'événements que l'on appelle catastrophe ; et bien évidemment, il ne nous atteint qu'à travers nos propres ouvrages : il ne saurait donc être naturel.

4.4.2.3 Apprécier le risque

Pourtant, on a construit de tout temps dans des sites inhospitaliers, souvent par légèreté mais rarement par erreur. Le goût du risque parfois évoqué à ce propos, n'a rien à voir à l'affaire : on ne construit pas un pont sur une rivière pour voir si c'est une crue décennale ou centennale qui l'emportera et engager des paris à ce sujet, mais pour la traverser en espérant que la crue millénaire, si cette notion a un sens, ne le détruira pas. Et si certains agriculteurs habitent des plaines alluviales périodiquement inondées, ce n'est pas pour avoir le plaisir de se voir de temps en temps sur un écran de télévision alors qu'ils sortent de chez eux en barque, après avoir enjambé l'appui d'une fenêtre du premier étage de leur

ferme, mais parce que ce type de plaine est particulièrement fertile ; leurs ancêtres n'ont pourtant pas poussé le vice jusqu'à construire leurs fermes dans des cuvettes régulièrement inondées, mais plutôt sur des buttes que l'eau atteint le moins souvent possible.

En fait, on peut toujours s'accommoder d'un site difficile, si les avantages que l'on tire de son utilisation compensent largement les inconvénients qui résultent de son occupation. Il est parfaitement normal d'accepter en toute connaissance de causes, qu'un ouvrage puisse éventuellement subir des dommages mineurs respectant son intégrité ; il serait tout à fait aberrant d'en envisager la ruine en toute sérénité. Utiliser un site inhospitalier se traduit donc toujours par une charge économique soit *a priori*, pour définir le risque et prendre des dispositions pour éviter l'accident possible, soit *a posteriori* si l'accident se produit. Le problème de l'accident géotechnique est ainsi essentiellement économique, c'est-à-dire encore une fois, humain et non naturel.

On doit donc classer cet accident à la fois selon la nature et l'intensité de l'événement qui en est la cause et selon la charge économique qui en résulte pour le prévenir ou pour le supporter. L'accident résultant soit d'un événement ignoré, soit d'un événement imprévisible dans l'état actuel de notre connaissance, comme la chute d'une météorite, soit de l'intensité maximum concevable d'un phénomène connu comme un séisme de magnitude 10, encore jamais observé ou une crue d'occurrence théorique plus que millénaire, conduit généralement à la ruine totale de l'ouvrage frappé. Il ne peut être prévenu que par une attitude négative, ne rien faire dans le site concerné, car la mise en œuvre d'une protection efficace est hors de portée, sinon de notre technique, du moins de notre économie. L'accident qui résulterait d'un événement connu dont la manifestation pourrait être considérée comme fortuite dans le site concerné ou bien de l'intensité maximum prévisible d'un événement déjà observé, seulement envisageable avec une probabilité quasi nulle, ne peut être économiquement prévenu. On doit néanmoins en retenir l'éventualité, mais on est alors conduit à renoncer à assurer l'intégrité de l'ouvrage et à accepter de lui voir subir des dommages graves, tout en préservant les vies humaines, en s'arrangeant pour éviter sa ruine totale et en conservant la possibilité de pouvoir le réparer. Pour l'accident consécutif à la manifestation d'un événement connu, avec une intensité déjà observée mais rarement dans le site concerné, on peut encore considérer que le risque est assez exceptionnel et accepter que l'ouvrage supporte des dommages dont l'importance dépend de leur coût prévisible par rapport à la charge qu'entraînerait leur prévention. Enfin, l'accident qui résulterait de l'intensité normale d'un événement bien connu, ne pourrait être envisagé que comme la conséquence d'une sorte de pari, pour un ouvrage provisoire et peu onéreux comme un batardeau de fouille temporaire. Il doit autrement être considéré comme inadmissible et l'ouvrage courant doit être construit pour que le risque de le voir se produire soit pratiquement nul.

4.4.2.4 Assurer la sécurité

Quand l'ouvrage est ancien, le danger qui le menace doit être identifié, apprécié et des dispositions opportunes de protection, de prévention, d'intervention et de

réparation, doivent être prises ; c'est la responsabilité du propriétaire ou de la puissance publique.

Quand l'ouvrage n'est qu'un projet, le maître doit non seulement apprécier l'opportunité et la rentabilité de son investissement, mais aussi dégager les moyens d'en assurer la sécurité. C'est son intérêt et sa responsabilité et souvent même ceux de la société, mais il n'en a pas toujours conscience ou l'ignore délibérément ; il est difficile de croire que les constructeurs et la puissance publique ignoraient que tel terrain de bord de rivière était inondable avant que la première crue un peu inhabituelle ait envahi le lotissement qu'ils y ont implanté.

Pour s'assurer de la sécurité de son futur ouvrage, le maître doit se tourner vers le géotechnicien et éventuellement vers d'autres spécialistes, afin que l'adaptation de l'ouvrage au site soit efficace. En effet, dans l'état actuel de son développement, la géotechnique permet l'étude à peu près rationnelle de la plupart des comportements site/ouvrage ; ce serait une véritable faute de pas faire entreprendre une telle étude ou de ne pas dégager les moyens suffisants d'en réaliser une correctement.

Que peut faire le géotechnicien pour évaluer le risque, c'est-à-dire pour imaginer l'accident et ses causes, définir la probabilité de le voir se produire et participer à la mise au point des solutions techniques propres à l'éviter ou du moins, à en amoindrir les effets ? Il ne peut qu'interroger la théorie et mettre en œuvre la technique, en essayant de ne rien oublier et de ne pas se tromper, sans être trop timoré. C'est difficile car, à un moment donné et dans un cas donné, la théorie est limitée par la connaissance, et la technique, par les moyens matériels et économiques.

Grader rigoureusement le danger géotechnique est donc presque toujours fondamentalement impossible. Pour y parvenir, il faudrait en effet, selon la méthode préscientifique, renouveler un certain nombre de fois la même expérience dans des conditions analogues jusqu'à l'accident, ce que le simple bon sens interdit mais aussi la possibilité puisqu'il n'existe pas de sites ou d'ouvrages rigoureusement semblables et que l'on est loin de savoir définir toutes les conditions de manifestation d'un événement naturel éventuellement destructeur. Il n'en demeure pas moins que l'on sait par expérience, dans un très grand nombre de cas, jusqu'où il ne faut pas aller trop loin.

C'est l'histoire locale qui permet le mieux d'apprécier un danger naturel ; la sismicité de la France qui, à quelques exceptions locales près, n'est pas très dangereuse, a ainsi fait l'objet d'études historiques détaillées de la part du CEA (Commissariat à l'énergie atomique) et d'EDF, afin d'apprécier le risque sismique des centrales nucléaires ; c'est aussi elle qui permet d'apprécier la hauteur d'une crue sous un pont à construire, mais à constater les erreurs de tirant d'air qui affectent certains ouvrages récents, il est vraisemblable que l'on n'y recourt pas souvent.

Pour les ouvrages en projet, le géotechnicien aide à définir la limite au-delà de laquelle le risque n'est plus acceptable et s'assure qu'elle ne sera pas transgressée. Il doit se montrer d'autant plus prudent qu'il se sait plus ignorant ; son appréciation du risque dans un cas donné est donc en partie subjective ; il n'est pas toujours écouté.

4.4.3 Les causes

Les accidents géotechniques peuvent résulter d'événements naturels ou induits par un défaut de l'ouvrage, mais surtout de notre légèreté, de notre inconscience, de nos attitudes et/ou décisions aberrantes...

4.4.3.1 Causes naturelles

Les causes naturelles des accidents géotechniques sont innombrables et si l'on peut dire, leurs effets le sont davantage, puisque la même cause peut avoir des effets différents sur des ouvrages différents, ou bien des intensités différentes selon l'endroit et l'époque. Celles qui sont extérieures à l'ouvrage sont bien connues du public car elles sont très souvent à l'origine de catastrophes régionale ou nationale, séismes, crues, tsunamis... Ces catastrophes résultent généralement de l'occupation traditionnelle de sites dangereux comme les *alluvions* du delta du Pô, les séismes japonais ou californiens, les éruptions du Vésuve... Quand un accident se produit dans un site récemment aménagé, il implique souvent un événement localisé, peu évident, ignoré des non-spécialistes, éboulement de falaise, glissement de coteau, coulée de boue, éboulement ou affaissement de toit de cavité naturelle ou artificielle, avalanche... Il résulte en fait d'une méconnaissance profonde du milieu naturel, conséquence d'un mode de vie de plus en plus artificiel et de la prise en main des projets par des physiciens qui n'ont pratiquement aucune connaissance et aucune préoccupation de naturaliste. Les aménagements touristiques de montagne ont souvent été étudiés et réalisés trop hâtivement, loin du site et sans tenir compte de l'avis des plus vieux du pays ou, plus rationnellement, du contenu des archives locales ; des crues quasi annuelles inondent les lotissements construits dans les lits majeurs de rivières, même très calmes comme celles du Bassin parisien...

Le catalogue des phénomènes naturels dommageables ou éventuellement destructeurs ne peut pas être exhaustif tant ils sont nombreux et variés. Parmi les phénomènes d'origine interne, il s'agit essentiellement des séismes et des éruptions volcaniques, ainsi que de leurs effets secondaires. La plupart des phénomènes d'origine externe sont liés à la gravité, instabilité des versants, des talus et des cavités, tassements, ou à l'eau, érosion, alluvionnement, crues, tempêtes... Selon les lieux et les circonstances, leurs intensités et leurs effets sont extrêmement variés. Les ouvrages mal implantés et/ou mal construits, non parasismique dans une zone sismique, lotissement dans une zone inondable, route à flanc de coteau instable..., qui en subissent les effets sont toujours plus ou moins endommagés et en cas de paroxysme, ils leur résistent rarement. Dans la plupart des cas, ce sont les ouvrages défaillants et non les effets directs des phénomènes qui déterminent la gravité des accidents.

La loi sur l'indemnisation des « catastrophes naturelles » a évidemment multiplié ces événements dont certains se sont révélés très politiques ; la fissuration systématique de la plupart des pavillons mal construits d'un lotissement à la suite d'une sécheresse relative, a souvent été déclarée telle, alors que manifestement, la mauvaise qualité des constructions était seule en cause ; il en va de même des constructions dans les lits majeurs des rivières à crues...

Relativement rares même pour les volcans les plus actifs, les éruptions sont toujours différentes et totalement irrésistibles : on ne peut que les constater sans pouvoir intervenir directement sur leur déclenchement et leur déroulement : elles peuvent provoquer des dommages matériels considérables aux abords du volcan par les coulées de lave, les projections de cendres et blocs, les lahars... et dans certains cas à l'échelle planétaire par la pollution atmosphérique de gaz et cendres durant des mois voire des années.

Contrairement à tous les autres événements dangereux, ce n'est pas le séisme lui-même qui l'est, mais les ouvrages qu'il affecte s'ils ne sont pas parasismiques ou, plus simplement, bien construits : la protection des personnes passe obligatoirement par la fiabilité des aménagements et des ouvrages ; construire parasismique, y loger et y accueillir le plus de monde possible est ainsi la seule action réellement efficace pour se prémunir du danger sismique ; dans certaines zones très peuplées de pays peu développés, des séismes de magnitude relativement modérée font des ravages, alors que dans des zones aussi peuplées de pays développés, des séismes de magnitude analogue sont souvent des événements remarqués mais sans grave conséquence.

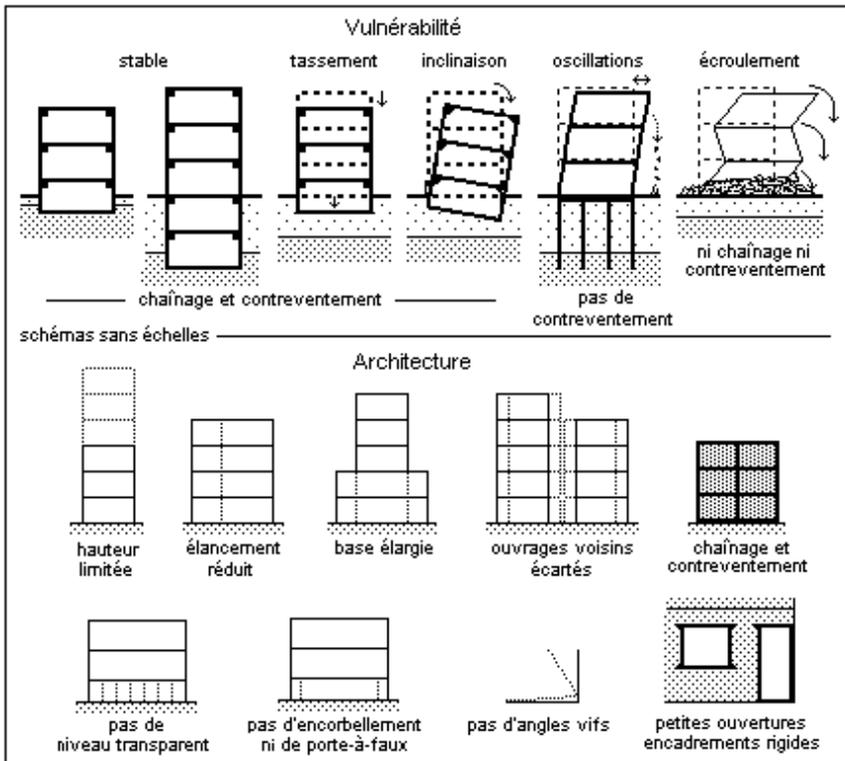


Figure 4.4.3.1 – Génie parasismique

Le but principal du génie parasismique est donc que, pour une valeur estimée de l'accélération redoutée, une construction ne subisse éventuellement que des dommages ne mettant pas en cause sa stabilité ultime afin de protéger les vies des occupants ; cela est toujours faisable ; on en a la preuve sur tous les sites de grands séismes où l'on observe que les immeubles, même très élevés, construits réellement parasismiques, subsistent au milieu des ruines. Cela ne vaut que pour le neuf ; pour l'existant, c'est-à-dire la très large majorité des constructions, à quelques exceptions près de confortement prévisionnel, il ne reste pratiquement que l'organisation et la mise en œuvre des secours. Enfin, il faut souligner que le génie parasismique ne s'intéresse que très superficiellement, sinon pas du tout, aux dégâts subis par les réseaux enterrés, notamment à ceux de gaz dont les ruptures déclenchent ou aggravent les incendies, et à ceux d'eau qui permettraient de les combattre.

4.4.3.2 Accidents induits par l'ouvrage

Les accidents géotechniques directement induits par l'ouvrage inadapté à son site ou même résultant de décisions et/ou d'actions aberrantes, sont plus ou moins graves, mais les véritables catastrophes comme les écroulements de barrages, sont heureusement rares ; ils affectent l'ouvrage lui-même ou les mitoyens et plutôt les biens que les personnes ; ils sont généralement connus des seuls initiés et en particulier, des assureurs, des tribunaux et des experts. Ils représentent moins de 10 % de l'ensemble des accidents affectant les chantiers, les ouvrages ou les mitoyens ; il s'agit essentiellement de fissurations, d'inondations, d'éboulements, de tassements, d'inclinaisons, de menaces d'effondrement... Heureusement, la plupart d'entre eux se produisent durant les travaux, ce qui n'entraîne généralement pas une altération de la solidité de l'ouvrage achevé ou bien ce sont des fissures affectant davantage l'esthétique de la construction que sa solidité. Leur prévention implique que, durant les travaux, on demeure attentif à contrôler et éventuellement à perfectionner l'adaptation de l'ouvrage au site, en particulier ses fondations, et à prévenir les incidents et accidents de chantier. Il est très rare que, pour ce faire, on demande à un géotechnicien d'être présent sur un chantier ; on attend généralement l'accident pour lui demander son avis et souvent même, pour essayer de lui faire endosser des responsabilités qu'on ne lui avait pas confiées.

À peu près la moitié des accidents géotechniques et parmi les plus graves, se produiraient ainsi durant la construction et ces accidents seraient pratiquement toujours les conséquences de fautes d'exécution imputables à l'entrepreneur, très souvent parce qu'il est mal encadré par le maître d'œuvre. L'autre moitié se produirait durant la décennie qui suit la construction et près de la moitié d'entre ceux-là, aurait des causes sans rapport avec la construction des ouvrages accidentés ; à leur propos, on évoque pourtant presque toujours le vice du sol, bouc-émissaire commode des dommages difficiles à expliquer pour des experts qui ignorent à peu près tout de la géotechnique. Pour la raison juridique qu'après dix ans la plupart des plaintes ne sont plus recevables, on manque évidemment de renseignements relatifs aux accidents survenus plus de dix ans après la construction ; mais avec le temps, la ruine d'un ouvrage est presque uniquement due à une cause extérieure ou à un défaut d'entretien.

Naguère, la moitié des accidents géotechniques connus concernaient des immeubles collectifs, un quart environ des habitations individuelles et un quart des ouvrages de génie civil et des bâtiments industriels. Pour les deux premiers cas, ces proportions étaient sans doute éloignées de la réalité ; la plupart des réclamations connues émanaient de syndicats professionnels d'immeubles collectifs, plus au courant des lois et des procédures que la majorité des propriétaires d'habitations individuelles, qui s'accommodaient assez facilement de défauts de construction mineurs et qui hésitaient à engager un procès trop technique dont ils entrevoyaient mal l'issue. En fait, l'application de la loi de 1978 sur l'assurance-construction (cf. 7.2) a montré que les accidents géotechniques affectant les habitations individuelles sont particulièrement nombreux, bien que l'assurance obligatoire et la loi sur l'indemnisation des « catastrophes naturelles » les aient manifestement multipliés ; cela justifierait la réalisation préalable à leur construction, d'études géotechniques évidemment assez succinctes ; la simple visite d'un géotechnicien sur le terrain où l'on aurait creusé deux ou trois trous à un ou deux mètres de profondeur, éviterait la plupart des accidents géotechniques affectant ce genre de construction qui sont souvent des fissures qu'une construction correcte aurait évité. Quant aux ouvrages de génie civil et aux bâtiments industriels, on peut s'étonner qu'ils soient affectés d'accidents géotechniques en proportion aussi élevée, alors que ceux qui les projettent et les construisent, sont à coup sûr des spécialistes parmi les plus avertis, qui devraient consacrer à leur sécurité le maximum de soins ; il paraît donc que l'on peut être un bon ingénieur de génie civil sans pour autant être un bon géotechnicien.

La moitié des accidents se produit au moment des travaux, à la suite de fautes d'exécution et près de la moitié de ceux qui se produisent après ont des causes indépendantes de la construction de l'ouvrage. Il reste donc un peu plus du quart des accidents géotechniques, accidents de fondations dus pour la plupart à des erreurs de conception, commises par des maîtres d'œuvre ou des ingénieurs, éventuellement spécialisés en géotechnique. Il se trouve que près des 2/3 d'entre eux seraient imputables à des maîtres d'œuvre et près du tiers restant, à des ingénieurs n'ayant aucune qualification géotechnique ; les quelques cas restants seraient imputables à des bureaux d'études polyvalents, théoriquement capables d'assumer la fonction de géotechnicien, mais dont la réelle qualification géotechnique est très souvent douteuse.

Moins de 5 % de la totalité des accidents géotechniques seraient donc survenus alors qu'un géotechnicien dûment qualifié était effectivement intervenu dans l'étude de l'ouvrage accidenté ; et dans la plupart des cas, les causes de l'accident étaient alors extérieures à l'ouvrage et donc à l'activité du géotechnicien. Les assureurs savent depuis longtemps que l'activité du géotechnicien, apparemment dangereuse pour eux, est en fait bénéfique à l'ouvrage et à sa sécurité. Les risques de voir se produire un accident après l'intervention d'un géotechnicien paraissent donc bien limités.

En France mais sans doute aussi ailleurs, les causes d'accidents géotechniques sont essentiellement l'absence ou l'insuffisance d'étude géotechnique, le défaut de prise en compte des conclusions de l'étude, le défaut de contrôle géotechnique des études techniques et des chantiers... Les déficiences proprement

géotechniques sont souvent inattendues ou surprenantes de la part d'un géotechnicien, comme l'exécution bâclée de sondages et/ou d'essais voire la tricherie sur la profondeur des sondages ou même leur non-exécution, les erreurs de repérage de sondages ou d'échantillons, la description des carottes par le seul ouvrier sondeur, l'erreur d'interprétation d'observations, de sondages ou d'essais, le défaut d'appréciation ou de compréhension du comportement du géomatériau, le défaut de connaissance géologique... La liste de ces déficiences ne peut pas être exhaustive ; celles répertoriées sont abondantes et il s'en constate régulièrement des nouvelles, toujours aussi inattendues.

► Déblais

Les accidents consécutifs aux terrassements en déblais sont relativement assez nombreux et plus ou moins graves selon qu'ils se produisent en sites urbains ou en rase campagne ; certains sont spectaculaires. Il s'agit d'éboulements ou de glissements de talus provisoires ou définitifs, d'éboulements de parois provisoires blindées ou non, d'écroulements, déplacements ou fissurations de murs de soutènement dus à une sous-estimation de la poussée hydrostatique ou de la poussée des terres, à une surestimation de la butée en pied ou de la traction des ancrages, de dommages occasionnés aux mitoyens par la création de renards ou par la consolidation de matériaux compressibles à la suite de pompages d'épuisement ou de rabattement de nappe, la décompression ou le gonflement du sous-sol, les vibrations produites par les compactages, les tirs de mines... Les reprises en sous-œuvre de bâtiments mitoyens de fouilles profondes, peuvent leur entraîner de sérieux dommages quand elles ont été mal étudiées ou mal exécutées.

► Remblais

Les accidents de remblais sont peu fréquents et généralement sans gravité à moins que le remblai ne supporte directement un ouvrage ou que, très élevé, il en domine un. On peut citer les glissements ou tassements excessifs à la suite d'un mauvais choix de matériau ou à une mise en œuvre vicieuse, ou bien en raison de la faible résistance ou de la forte compressibilité du sous-sol d'assise, les défauts d'ancrages et de drainage à flanc de coteaux. La surcharge de hauts remblais peut provoquer le soulèvement d'ouvrages mitoyens, l'inclinaison, la rupture par cisaillement ou le poinçonnement de pieux, la déformation ou la rupture d'ouvrages de soutènement... Les plates-formes mixtes sont les sources de nombreux dommages ; on les établit souvent sur des flancs de coteaux dont la stabilité naturelle est douteuse et quand elles sont mal conçues ou mal drainées, elles ne l'améliorent pas. Quand elle est routière, la partie en remblai qui glisse oblige au pire à fermer la route et au mieux à établir une circulation alternée, le temps de la réparation. Quand la plate-forme supporte un bâtiment, la défaillance du remblai peut provoquer d'une simple fissure à l'écroulement de sa partie aval.

► Fondations

Les accidents de fondations sont les plus nombreux, un peu moins de 5 % de l'ensemble des sinistres du bâtiment. Le coût des fondations d'un bâtiment varie

de moins de 1 % de son coût total dans le cas de fondations superficielles simples, à 5 % au plus dans le cas de fondations profondes ; le coût d'une étude géotechnique est infime par rapport à lui ; le coût de réparation d'un accident de fondations dont les effets se répercutent plus ou moins à l'ensemble de l'ouvrage, peut atteindre 50 % du coût total initial de ce dernier et parfois même dépasser ce coût lui-même, ce qui peut poser le problème de l'opportunité de sa réparation ; on reste ainsi confondu du peu d'attention que les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre attachent à la prévention de tels accidents, puisque environ 70 % des bâtiments construits ne font actuellement l'objet d'aucune étude géotechnique sérieuse ; quelques sondages et essais effectués presque au hasard et interprétés sans trop se soucier du contexte, n'en constituent pas une.

À l'expert, de nombreux sinistres de ce genre donnent du reste l'impression de résulter de fautes inadmissibles. Ce point de vue doit être nuancé car on ne saurait penser à tout ni tout prévoir et parce qu'il est plus facile de définir les causes d'un accident qui vient de se produire, que d'imaginer *a priori*, les conditions de sa production éventuelle. Il reste néanmoins que, pour à peu près la moitié des accidents de fondations superficielles et pour environ les trois quarts des accidents de fondations profondes, le sol et le sous-sol n'ont fait l'objet d'aucune étude, ou bien l'étude a été insuffisante ou ses résultats mal interprétés parce que réalisée par un non-spécialiste. L'exemple le plus typique d'une telle étude est la traditionnelle campagne de sondages implantés sans tenir compte des particularités naturelles du site, et dont les échantillons ne font l'objet que d'un rapide coup d'œil lors d'une visite de chantier et de quelques essais classiques de laboratoire, dont les résultats ne seront même pas sérieusement analysés. Ceci est loin de vouloir dire que les géotechniciens soient directement responsables des autres accidents car, et c'est très fréquent, les résultats d'une bonne étude peuvent être très mal exploités voire négligés ou même abusivement utilisés par le maître d'œuvre et/ou l'ingénieur de structure.

Parmi les accidents affectant les fondations superficielles, on peut citer, dans l'ordre décroissant de leur fréquence, le cas des assises sur remblais ou sur plates-formes mixtes, celui de l'altération des caractéristiques mécaniques du sous-sol par modification de la teneur en eau des argiles, retrait ou gonflement, ou par effet du gel/dégel, celui de constructions homogènes sur sols très hétérogènes, plus ou moins consistants selon l'endroit, ou bien de constructions hétérogènes mais continues sur sols homogènes peu consistants, celui de la décompression du sous-sol autour ou en fond de fouille, celui des structures inadaptées à supporter les effets de tassements différentiels inévitables, celui des niveaux d'encastres insuffisamment profonds ou trop chargés...

Parmi les accidents affectant les fondations profondes, il s'agit principalement de conséquences de défauts d'exécution, faux refus de battages trop rapides ou dus à l'autofretage provisoire de pieux rapprochés dans des matériaux peu perméables, pieux trop courts n'atteignant pas le niveau résistant ou plus rarement, trop longs dans une couche résistante peu épaisse surmontant une couche peu résistante, défauts de bétonnage de pieux coulés en place... On peut ensuite citer les altérations du béton et parfois des aciers dans un sous-sol contenant de l'eau agressive et plus rarement des minéraux instables. Enfin, on

connaît des accidents de pieux par surcharge, flexion ou même cisaillement, résultant de modifications de l'état des contraintes du sous-sol environnant, en liaison avec des travaux mitoyens, remblais, radiers, fouilles... D'autre part, la mise en œuvre de pieux, battus principalement, peut induire dans le sous-sol des vibrations susceptibles de provoquer des dommages aux mitoyens.

Les énumérations d'accidents géotechniques induits par les ouvrages, sont évidemment loin d'être exhaustives.

4.4.3 Le risque économique

Il arrive souvent, en cours de travaux ou plus ou moins longtemps après leur achèvement, que l'influence néfaste de particularités naturelles d'un site, négligées ou sous-estimées, soit telle qu'elle détermine d'importants dommages et impose des travaux imprévus parfois longs et toujours onéreux tant en eux-mêmes qu'à cause des retards qu'ils entraînent sur le programme général d'exécution de l'ouvrage, et parfois à tel point que l'économie du projet et ce programme s'en trouvent bouleversés. Il peut alors apparaître, mais trop tard, qu'il aurait été plus rentable de modifier le projet dès l'abord ou même d'abandonner le site choisi pour un autre plus favorable. Beaucoup plus rarement, cette influence peut avoir des effets catastrophiques qui ne sont pas les conséquences de la fatalité.

En fait, toute construction et toute maintenance d'ouvrage sont plus ou moins risquées financièrement et/ou matériellement. Si le risque est seulement économique, le maître d'ouvrage peut envisager de le prendre à condition que le phénomène en cause soit parfaitement connu et que la gravité de ses conséquences possibles soit clairement établie. Avant d'en décider, il a dû l'évaluer et le confronter aux avantages qu'il pouvait attendre à le prendre ; c'est une analyse difficile et subjective qui peut avoir été biaisée, volontairement ou non, en minimisant le risque et en exagérant les avantages. S'il s'agit d'un phénomène tellurique, c'est sa probabilité statistique qui permet de décider ; s'il s'agit d'un effet induit, il faut en faire l'étude détaillée. On peut aussi faire une évaluation sous-estimée pour forcer une décision : c'est très dangereux mais de pratique courante. Prendre le risque de voir se produire quelques désordres n'affectant ni la solidité ni le bon fonctionnement de l'ensemble d'un ouvrage peut à la rigueur être décidé par un maître d'ouvrage particulièrement économe ; prendre celui de voir la solidité ou le fonctionnement de l'ouvrage compromis au point de le rendre dangereux ou inutilisable ne peut évidemment être admis en aucun cas.

4.4.4 Effets pervers des aménagements

Tout ce qui se creuse, construit, exploite ou rejette partout dans le monde a presque toujours des effets pervers : on ne saurait penser à tout. Quel qu'ils soient, quels que soient leur usage et leurs dimensions, même s'ils sont conçus et réalisés le mieux possible, s'ils sont bien conformes à leur destination, un

aménagement, un ouvrage ne sont jamais totalement bénéfiques ni inoffensifs ; on ne s'en aperçoit souvent que de façon indirecte et parfois longtemps après leur mise en service, à la faveur de la recherche des causes d'une anomalie constatée ailleurs.

Les exemples d'effets pervers des aménagements sont innombrables et leurs types principaux sont connus pour la plupart.

Les endigages de fleuves, les assèchements de marais, les activités minières, agricoles... peuvent entraîner l'érosion des sols, la désertification... ; la mer d'Aral a été en partie asséchée par les prélèvements d'irrigation subis par ses tributaires.

Les effets de l'exploitation incontrôlée et/ou excessive d'eau de surface ou souterraine peuvent aller de la désertification d'une contrée par des pompages d'irrigation dans ses cours d'eau, à l'assèchement d'un puits par un rabattement de nappe ou un drainage, en passant par la salinisation des nappes côtières, la dégradation de l'alimentation d'une ville à l'étiage, l'affaissement d'ouvrages ou même de régions entières par drainage et consolidation de géomatériaux très peu denses. La déforestation, le remembrement, les labours dans le sens de la pente, les amendements excessifs... sont des causes avérées d'accroissement d'érosions, d'amplification de crues, de pollutions... Les exploitations souterraines de solides, de liquides et de gaz sont souvent des causes de séismes, d'affaissements, d'effondrements, d'assèchements, de tarissements... Sur les cours d'eau et les littoraux, les aménagements mal conçus, les ouvrages hydrauliques mal calibrés et souvent même les ouvrages de défense trop spécifiques et localisés, peuvent bouleverser de façon inattendue et souvent surprenante, des sites proches ou même éloignés, aggraver des dangers que l'on voulait éviter, créer des risques là où il n'y en avait pas...

Les dommages aux ouvrages voisins de chantiers en cours, ainsi que les dommages aux ouvrages eux-mêmes sont d'ordinaire les effets d'études et/ou de travaux défectueux, même s'ils ne provoquent pas d'effondrement. Les travaux souterrains ont presque toujours des effets nocifs, notamment sur les eaux souterraines dont le cours peut être perturbé ou qui peuvent être polluées, parfois gravement, par les produits d'injections. Les extractions de graves et de sables dans les lits des cours d'eau, sur les plages et même au large, peuvent déstabiliser des ouvrages parfois lointains et notamment les ponts anciens à travées multiples, généralement fondés à profondeur relativement faible, des digues et des quais de ports, ou d'imprudentes villas sur les dunes.

Les grands barrages ont entre autres, un rôle de régulateurs de régime et d'écrêteurs de crues qu'ils remplissent jusqu'à ce que l'on soit obligé de laisser passer une crue qui met le barrage lui-même en danger, provoquant des ravages d'autant plus grands, qu'un lâcher rapide amplifie l'onde de crue, et que la confiance et l'inconscience avaient conduit à aménager l'aval comme s'il ne pouvait plus s'y produire d'inondations. D'autre part, les retenues sont des pièges à sédiments qui manquent ensuite aux plaines de l'aval, aux marécages d'estuaires et de deltas, ainsi qu'aux plaines littorales ; cela accentue la tendance au recul de ces sites fragiles. En fait, un barrage perturbe fortement le

régime hydraulique du cours d'eau et par là, le fonctionnement de l'écosystème de tout son bassin versant.

Il est heureusement possible de largement réduire les effets pervers en étudiant et en réalisant correctement les aménagements et les ouvrages. Pour les aménagements, les études d'impact sont maintenant la règle, parallèlement aux études techniques dont on se contentait naguère ; en général, elles privilégient les effets biologiques, sociologiques, administratifs, esthétiques... immédiats, au détriment d'effets techniques peu apparents, souvent néfastes sinon dangereux à plus ou moins long terme, que l'on peut minimiser pour faciliter l'adoption d'un projet contesté. Les effets pervers des ouvrages isolés peuvent être évités en réalisant de bonnes études géotechniques des sites d'implantations, en adaptant correctement ces ouvrages à ces sites et aux existants voisins, en les construisant selon les règles de l'art.

4.4.5 Comportements aberrants

Par inconscience, intérêt, présomption, insouciance, bêtise... devant une bonne affaire, une difficulté, un danger... il arrive que les décideurs adoptent des comportements dont les suites dommageables, parfois catastrophiques, montreront qu'ils étaient aberrants.

Le cas le plus fréquent est l'installation, parfois anarchique, dans un site dangereux, sans aménagement spécifique, comme un bord de torrent dévastateur, une plaine inondable, un coteau instable, un pied de falaise éboulouse, un volcan... Les exemples de telles aberrations sont innombrables, de tous lieux et de tout temps.

Les accidents de chantiers de terrassements sont très fréquents ; la plupart résultent de ce que l'on n'a pas pris d'élémentaires précautions de blindage, notamment en période pluvieuse, parce que l'on est pressé, que cela coûte cher, que la phase critique doit être courte, que ceux qui attirent l'attention sur le danger passent pour timorés et/ou pessimistes...

En fait, presque tous les accidents géotechniques sont plus ou moins issus de comportements aberrants.

4.4.6 La pollution

La pollution, pose des problèmes dont on ne se préoccupe que depuis peu. Quelle qu'elle soit et quelque milieu qu'elle touche, une pollution affecte le sol et le sous-sol d'une zone plus ou moins étendue, en particulier son eau souterraine qui la concentre, la véhicule et la répand.

La potabilité de l'eau brute est en train de passer du rang de qualité primordiale qu'elle était naguère, à celui de propriété curieuse et inattendue, tant la plupart des nappes françaises sont polluées. Les nappes à surface libre sont particulièrement sensibles aux pollutions diffuses directes, notamment agricoles, phosphates, nitrates, pesticides... de circulation automobile, d'accidents de

transport, d'accidents ou de déversements d'usines, de fuites de réservoirs ou de canalisations et notamment d'oléoducs, de désherbage des voies routières ou ferrées... et aux pollutions des cours d'eau avec lesquels elles sont en relations constantes d'échanges ; les nappes captives sont moins vulnérables, à condition que la zone d'infiltration, souvent très vaste, soit saine et que les ouvrages de captages n'altèrent pas l'imperméabilité de son toit ; la très grande lenteur et la non moins grande longueur des déplacements de l'eau de ce type de nappe, fait qu'une pollution peut n'apparaître au captage que très longtemps après qu'elle s'est produite, alors que l'état de la nappe est devenu tout à fait irréversible. Dans les régions karstiques où l'on trouve encore des gouffres dépotoirs, l'eau souterraine peut être très dangereuse : en temps de crue, elle y est parfois pire que l'eau superficielle ; son utilisation doit être soumise à un contrôle géologique et sanitaire rigoureux.

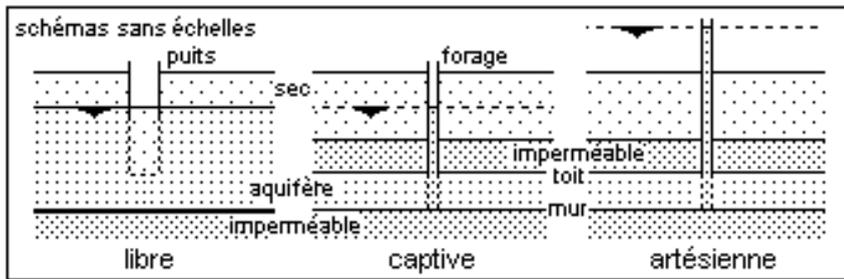


Figure 4.4.6 – Types de nappes d'eau souterraine

Les pollutions agricoles et pétrolières les plus fréquentes et quasi permanentes, sont pratiquement inévitables et très difficiles à résorber : certaines pollutions pétrolières résultant d'accidents médiatisés sont célèbres ; plus insidieuses sont celles qui se produisent dans tous les sites où l'on traite, stocke, transporte des hydrocarbures et dans lesquels roulent des automobiles ; en France, il s'en disperse de façon diffuse et incontrôlable, pratiquement partout. Les hydrocarbures infiltrés dans le sous-sol y sont extrêmement mobiles et y ont une tendance à la concentration naturelle parfaitement connue, dont résultent la plupart de leurs gisements. Ainsi, on en voit quelquefois affleurer brusquement, en quantité importante et à un endroit souvent éloigné d'une source potentielle soit pour une cause naturelle, émergence d'eau souterraine, fortes précipitations... soit à la suite de travaux souterrains comme une simple excavation de tranchée urbaine. Le comportement des hydrocarbures dans le sous-sol est heureusement favorable à leur résorption naturelle et les pollutions, même importantes, finissent toujours par se diluer et disparaître ; il s'en évapore d'abord une quantité importante et les huiles non miscibles à l'eau, se séparent assez rapidement de ceux qui le sont, sulfates et phénols. Les huiles demeurent en grande partie à la surface de la nappe, se fractionnent, sont biodégradées et s'oxydent petit à petit jusqu'à disparaître ; les phénols se concentrent dans la frange capillaire, les sulfates et autres sels minéraux s'ajoutent à ceux que la nappe contient naturellement et en proportions si faibles qu'ils passent très

rapidement inaperçus. Attendre que les choses se passent naturellement est toutefois rarement possible ; au moment d'une découverte ou d'un accident, personne ne veut se fier à l'auto-épuration. Les travaux de décontamination sont longs, onéreux et leurs résultats incertains comme ceux du site de l'ancien dépôt pétrolier de Saint-Denis (cf.). Les ouvrages de protection sont les barrages souterrains et les pompages, souvent associés, tout aussi onéreux, à l'efficacité tout aussi incertaine et parfois même à l'effet inverse de celui espéré sont très difficiles à projeter, mettre en œuvre et contrôler. La façon dont l'eau circule dans le sous-sol d'un site n'est jamais très facile à établir et à contrôler. Alors, quand des hydrocarbures ou n'importe quoi d'autre est mêlé à l'eau... !

La protection des captages est nécessaire, mais devient de plus en plus inefficace, voire illusoire, car elle ne peut être pratiquée que dans les environs du champ, alors que la pollution peut avoir une origine lointaine et/ou endémique et compte tenu de la très faible vitesse de l'eau dans les nappes, arriver à un captage très longtemps après la pollution d'origine que l'on ne peut même plus localiser. La classique protection périmétrique est une opération fondamentale de prévention ; celle d'une nappe alluviale a été facile tant qu'il ne s'est agi que de pollution bactérienne résorbée par filtration naturelle ; ce n'est plus le cas, car les rivières qui alimentent ces champs sont pratiquement toutes polluées chimiquement ; la protection d'un captage karstique est particulièrement difficile, car l'eau ne filtre pas dans le réseau, alors que pratiquement tous les trous naturels du plateau qui l'alimente sont irrémédiablement et lourdement pollués.

La meilleure façon de traiter une pollution, est de l'éviter à la source ; cela paraît aller sans dire et pourtant, on le fait rarement, même pour des pollutions potentielles concentrées et connues : la résorption d'une pollution d'eau souterraine est difficile et coûteuse. Pour les eaux de consommation irrémédiablement gâtées ou plus généralement vulnérables, le traitement des pollutions bactériologiques est réalisé par divers procédés classiques, très au point, parfaitement efficaces, même s'ils ne satisfont pas le goût de tous les consommateurs ; les éléments chimiques indésirables sont extraits dans des usines spécialisées, généralement par précipitation puis filtration ; le manganèse le plus souvent naturel, les nitrates et les pesticides agricoles le sont avec pas mal de difficultés et pour des coûts souvent élevés ; l'arrivée impromptue d'éléments rares et coriaces, peut troubler le fonctionnement d'une usine, voire entraîner son arrêt jusqu'à l'identification de ces éléments et la mise au point d'un traitement spécifique ; c'est dire l'importance de la prévention des pollutions, d'abord au champ de captage et au-delà, dans tout le bassin versant ; c'est rarement possible.

Le fragile équilibre des nappes côtières peut être définitivement détruit en faveur de l'eau marine si on extrait en arrière du littoral plus d'eau qu'elles n'en véhiculent ; petit à petit, l'eau marine envahit l'aquifère terrestre jusqu'à rendre son eau saumâtre et donc impropre à l'usage pour lequel on exploitait la nappe ; dans la plupart des cas, il est pratiquement impossible de renverser efficacement la tendance en limitant la production ou en établissant des ouvrages de défense ; l'aquifère terrestre est irrémédiablement pollué.

L'excès d'utilisation d'eau souterraine pour l'irrigation entraîne la salinisation de plus en plus importante du sol, jusqu'à le rendre irréversiblement stérile.

Les eaux des réseaux calcaires sont généralement polluées tant bactériologiquement que chimiquement ; les eaux trop salées des réseaux de gypse et de sel ne sont pas utilisables.

4.4.7 Paradoxe géotechnique

Le sous-sol d'un site est très complexe, mais il n'est pas désordonné et son comportement n'est pas erratique ; il n'y a pas n'importe quoi n'importe où, il ne s'y passe pas n'importe quoi n'importe où, n'importe quand et n'importe comment. Les sites dangereux sont donc localisés et si dans certaines circonstances, certains accidents y paraissent possibles, il s'en produira à peu près sûrement un dans un délai que l'on peut en principe estimer par sa probabilité. En fait, on sait où et comment peut se produire n'importe quel événement naturel ou induit, mais on ne sait pas quand il atteindra une intensité éventuellement génératrice d'accident, qui ne sera pas une anomalie dans le cours du phénomène générateur. Cela explique que l'on puisse clairement caractériser un danger géotechnique sans que l'on sache le localiser précisément et en prévoir la réalisation ; par contre, on peut en prévenir les effets après avoir positivement identifié et analysé le danger, établi la probabilité de sa réalisation, prévu ses conséquences, notamment en y adaptant les ouvrages exposés.

4.4.8 Les interventions

Si le danger redouté a une cause naturelle, les interventions permettant de l'éviter ou d'en atténuer les effets ne peuvent être efficaces dans chaque cas, que s'il est bien caractérisé, si le site et l'ouvrage menacés sont bien connus ; cela concerne tout particulièrement la géotechnique. Ensuite, en cas de crise puis éventuellement d'accident, seules la puissance publique et la population peuvent intervenir. Il est toujours bon que ces interventions aient été préparées.

4.4.8.1 La prévention

Possible pour la majeure partie des phénomènes connus, mais seulement pour des ouvrages nouveaux et jusqu'à une certaine intensité qui dépend de l'optimisme des décideurs et de leurs moyens financiers, la prévention est toujours efficace mais pas autant qu'on le souhaiterait car aucun événement n'est identique au précédent. En Californie (1989, 7 M_L), à Kobé (1995, 7 M_L) et ailleurs, des ouvrages modernes, réputés parasismiques, ont été gravement endommagés et certains, ruinés ; ils n'étaient pas adaptés au séisme qui s'est produit là où on ne l'attendait pas ; mais les victimes et les dommages y ont été infimes, par comparaison avec ceux du séisme d'Arménie (1988, 7 M_L) où pratiquement aucune mesure de prévention n'avait été prise. La nouvelle réglementation française pour la prévention de ce qu'on y appelle des catastrophes naturelles, prévoit que les sites très dangereux soient déclarés *non aedificandi* ; c'est radical et efficace. Pour ceux qui le sont moins, elle impose que les constructeurs prennent des précautions spécifiques destinées à assurer la sécurité de leurs ouvrages. Le problème est alors

de savoir si l'ouvrage doit tout supporter quoi qu'il arrive, supporter une certaine intensité et/ou subir un certain type de dommage, assurer un temps de ruine suffisant pour qu'arrivent les secours.

Sur le versant nord de la Romanche, en aval de Séchilienne, un éboulement et une coulée coupent de temps en temps la route de Grenoble à Briançon au lieu-dit Les Ruines ; au pire, il pourrait barrer la vallée, détruire une zone presque suburbaine et à la rupture du barrage, provoquer une inondation particulièrement catastrophique à l'aval ; dans une première phase de prévention, on a détourné la rivière et la route protégée par un merlon, et le versant est surveillé par un dispositif automatique ; le hameau de L'Île Falcon a été en partie évacué à la suite d'une décision administrative contestée par certains occupants. La prévention est donc en grande partie conditionnée par la politique ; c'est une des raisons pour lesquelles, on en réalise rarement d'efficace, l'autre étant la quasi-impossibilité technique de la définir clairement ; les avis des experts sont rarement unanimes.

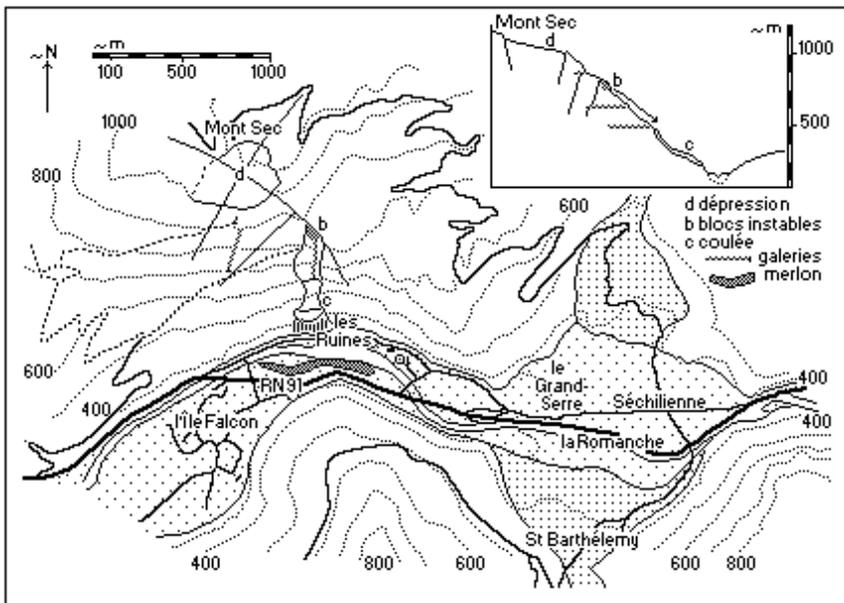


Figure 4.4.8.1 – Les Ruines de Séchilienne

Le problème des constructions existantes et de la sécurité des habitants dans un tel site n'est soluble que dans un petit nombre de cas et la solution n'est pas toujours sûre ; les digues évitent les inondations jusqu'à ce qu'elles soient submergées ou qu'elles rompent ; les habitants du delta du Rhône en ont fait la triste expérience au cours de l'hiver 1993/94. Les immeubles d'El-Asnam avaient été construits en tenant compte des enseignements du séisme précédent (1954, 6,9 M_L), quand la ville s'appelait Orléansville ; ils n'ont pas résisté au séisme suivant (1980, 7,2 M_L). En 1994, les hautes vallées du Var et du Verdon ont subi une crue

catastrophique ; des bâtiments, des parties de routes et de voie ferrée ont été emportés sur une cinquantaine de kilomètres du cours de chaque rivière. La plupart des ouvrages détruits avaient été construits par remblayage en bordure des lits de divagation ; le risque qu'ils couraient était donc évident ; à l'emplacement de certains d'entre eux, on a même retrouvé d'anciens ouvrages de protection qui avaient été couverts pour élargir une voie, implanter un bâtiment... ; sur le haut Verdon, le barrage de Castillon a tout laissé passer, de sorte qu'il y eut des dommages importants jusqu'en aval de Castellane : les barrages hydroélectriques ne sont pas toujours les organes régulateurs que l'on avance souvent pour justifier leur construction ; les évacuateurs de crue sont conçus pour laisser passer la crue maximale. La probabilité indéterminée des événements catastrophiques que l'on voudrait prévenir, est un argument classique des opposants à ce type d'intervention ; les ouvrages préventifs de Saint-Étienne-de-Tinée ou de Séchillienne sont loin de faire l'unanimité des riverains plus ou moins exposés ; ils ont été très onéreux et les mouvements paraissent s'être sinon stabilisés, du moins fortement ralentis ; pour combien de temps ?

4.4.8.2 La prévision

Les chances de prévoir la date de la manifestation d'un phénomène destructeur quel qu'il soit, dans un site que l'on sait y être exposé, sont pratiquement nulles. On sait à peine où et comment cela pourrait arriver ; à propos des séismes, j'ai expliqué pourquoi on ne sait pas dire quand ; cela peut s'appliquer plus ou moins à tous les autres. À l'aval, les crues de certaines rivières très surveillées peuvent être prévues quelques heures avant l'arrivée de l'onde destructrice. En 1992, l'inondation catastrophique de Vaison a rappelé que cela ne marchait pas toujours ; la météorologie était extrêmement pessimiste mais on ne l'a pas crue ; les rivières du Vaucluse sont bien connues pour leurs caprices ; cela n'avait pas empêché d'installer des campings, des parkings, de construire des villas dans le lit majeur de l'Ouvèze ; tout cela a été emporté, comme le tablier du pont moderne ; le pont romain a bien été submergé mais il est resté en place. En 1980, la prévision erronée de trois séismes 7 à 9 M_L à Lima au cours de l'été de l'année suivante, a provoqué un fort malaise bien compréhensible dans la population. Aux États-Unis, ce genre de prévision irresponsable est depuis, tempéré par l'avis d'un comité d'experts. L'éruption du mont Saint-Helens était prévue pour la fin du siècle ; elle s'est produite en 1980.

4.4.8.3 La protection

En cas d'annonce de crue sur le Bas-Rhône, on ferme les égouts, les canaux et éventuellement les portes des remparts d'Avignon pour éviter que la vieille ville soit inondée ; les organes de Protection civile sont en alerte et la population est informée.

La protection doit évidemment avoir été bien préparée avant que survienne une crise. Si l'on prévoit un événement dangereux à moyen terme, on peut encore informer les habitants menacés afin qu'ils prennent quelques autres mesures de protection passive. Si l'on en prévoit un grave à court terme, voire imminente, l'intervention, purement sociale et politique, se limite à la décision de faire ou

non évacuer le site ou la région. Elle est très difficile à prendre car on ne sait que très rarement dire quand il faudrait le faire, parce que les gens acceptent très mal de partir et parce qu'ils le prennent encore plus mal si on les a déplacés pour rien. À Pompéi, selon Pline et les archéologues, alors que la plupart des gens étaient partis de leur propre initiative, certaines victimes étaient restées avec leurs biens ou, impatients, étaient revenus en emporter davantage. Au Liaoning puis à Tianshan, les Chinois ont montré les limites de la méthode. À Saint-Barthélemy-de-Séchilienne, sur la rive opposée de la Romanche, les habitants d'un lotissement très exposé à l'éboulement maximum, ne veulent pas partir. Sur la Soufrière de la Guadeloupe, les Français ont surtout montré leur goût pour le débat public dans des circonstances qui auraient exigé plus de sang-froid et de retenue. Aux environs du mont Saint-Helens, pourtant quasi inhabités, il n'a pas été possible de faire partir tout le monde ni même d'empêcher quelques curieux de venir y mourir. Les Japonais sont particulièrement bien informés des risques sismiques qu'ils encourent, les prennent très au sérieux et font périodiquement des exercices de protection civile ; le séisme de 1995 à Kobé, a tout de même surpris les habitants et les autorités et a eu des effets catastrophiques.

4.4.8.4 Les secours

À chaud, on fait ce que l'on peut avec les moyens dont on dispose. Le secours organisé est souvent la seule chose réellement efficace et sérieuse que l'on puisse faire. Son organisation préalable est plus ou moins efficace selon la connaissance du phénomène et de ses effets, l'efficacité de la prévision, l'appréciation de la vulnérabilité des ouvrages dans le site et la qualité propre de l'organisation. C'est en grande partie une affaire de professionnels qui doivent imaginer les scénarios possibles et préparer leur intervention tout en sachant que cela ne se passera jamais comme cela avait été prévu ; un glissement de terrain ou un pont emporté sur un itinéraire d'accès ou de dégagement peut perturber considérablement les secours. On sait qu'en cas de grande catastrophe, les moyens locaux ne suffisent pas et qu'une collaboration nationale, voire internationale, est nécessaire, même dans les pays développés.

4.5 Le site

Objet spécifique de la géotechnique, le site est un ensemble évolutif indissociablement constitué d'un massif de géomatériau, infime portion de la subsurface terrestre siège de phénomènes naturels, et d'un ouvrage induisant dans ce massif des actions spécifiques qui modifient plus ou moins le cours des phénomènes naturels, certaines caractéristiques du géomatériau et plus ou moins l'état initial, naturel ou déjà modifié du massif, en particulier sa stabilité. Dans un laps de temps plus ou moins long, le massif va s'auto-organiser (*cf.* 3.1.2.7) pour acquérir une stabilité plus ou moins différente de celle de son état initial ; c'est ce qui se passe lors d'un glissement de talus de déblais, quand le sous-sol tasse sous un immeuble, quand une digue de cours d'eau rompt... Un site de risque « naturel » est appelé bassin de risque.

Tant pour des raisons techniques qu'économiques, le site de n'importe quel ouvrage doit être décrit, étudié et modélisé spécifiquement.

4.5.1 Dimensions

Les dimensions temporelles et géométriques d'un site géotechnique ne peuvent pas être définies *a priori*, en particulier en ne considérant que l'emplacement de l'ouvrage comme on le fait généralement ; elles dépendent évidemment de la nature, des dimensions et la durée de vie attendue de l'ouvrage, mais aussi de la nature et de la structure du massif, de la façon spécifique dont il réagira sous son influence et de l'intensité à partir de laquelle on pourra considérer que ses réactions ne seront plus sensibles ou mesurables. En fait, on se limite aux phénomènes et à l'intensité de leurs effets susceptibles d'influencer directement le fonctionnement de l'ouvrage durant sa vie ; le site d'un immeuble est son emplacement et ses environs immédiats ; celui d'un barrage est la région aux limites de laquelle des fuites inévitables et incontrôlables, suffisamment importantes pour altérer le bon fonctionnement de la retenue sont susceptibles de se produire ; celui d'un site inondable est tout le bassin amont du cours d'eau ; celui d'un glissement est tout le versant qu'il affecte...

4.5.1.1 Par rapport au temps

Les phénomènes naturels qui se produisent dans un site y ont éventuellement des effets dommageables dont il importe d'estimer le temps de retour comme ceux d'une crue pour un site inondable ; l'ouvrage y a des effets spécifiques plus ou moins durables comme le rabattement d'une nappe alluviale par un pompage d'assèchement de fouille ou d'exploitation d'eau, le tassement d'un immeuble... : le temps est donc une dimension intrinsèque du site, généralement négligée par la géotechnique.

4.5.1.2 Par rapport à l'ouvrage

Les dimensions géométriques d'un site dépendent des dimensions de l'ouvrage ; celles du site d'une section d'autoroute en rase campagne sont très supérieures à celles du site d'un immeuble urbain. Elles dépendent également du type de l'ouvrage ; dans une même plaine alluviale, le site d'un puits exploitant de l'eau souterraine, défini par son domaine d'influence sur le niveau de la nappe, qui peut s'étendre très loin de cet ouvrage de petites dimensions, est beaucoup plus grand que celui d'un immeuble dont la construction n'influence pratiquement que la portion du sous-sol immédiatement située sous lui...

4.5.1.3 Par rapport à la structure géologique

Elles dépendent aussi de la structure géologique de la région dans laquelle est implanté l'ouvrage. Un site couvre en général des formations organisées à l'échelle d'une unité structurale et la région lui sert alors de cadre ; mais il y a des sites à l'échelle d'une formation dont le cadre est alors l'unité structurale, et

des sites à l'échelle d'une région dont le cadre est une ou plusieurs provinces géologiques. Cela n'implique pas qu'il y ait forcément une relation entre cette échelle structurale et l'échelle de dimensions de l'ouvrage.

Dans une région structurale simple comme un bassin sédimentaire, le site d'un grand ouvrage peut n'être qu'une seule formation plus ou moins homogène ; c'est ainsi que le tunnel sous la Manche a été presque entièrement foré sans réelle difficulté, dans la craie bleue de l'Albien du bassin anglo-parisien ; son profil en long sinueux épouse rigoureusement les variations de pendage de cette formation particulièrement propice, car pas trop dure et pratiquement étanche.

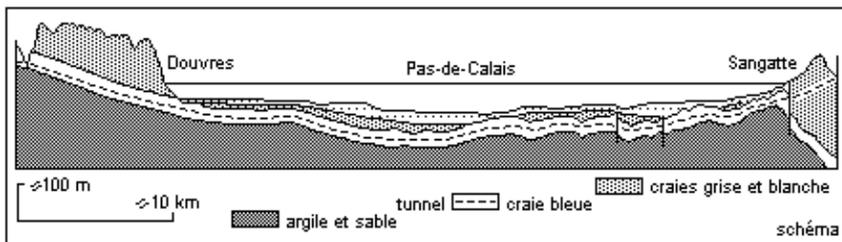


Figure 4.5.1.3 – Le tunnel sous la Manche

Par contre, dans une région de structure complexe comme une chaîne de montagne, le site d'un petit ouvrage peut couvrir plusieurs unités ou formations dont on ne pourra établir les corrélations qu'en s'intéressant à la structure d'ensemble de la région ; c'est le cas d'une galerie hydraulique alpine, courte et de faible section, implantée sur un contact structural majeur ; en quelques centaines ou même quelques dizaines de mètres, elle peut successivement traverser au prix de grandes difficultés techniques, du granite, du grès, du gypse, de la marne, du calcaire et autres roches plus ou moins broyées.

Ces différences structurales sont particulièrement évidentes quand on cherche à apprécier les risques de fuites d'une retenue de barrage : dans une région granitique homogène, peu favorable aux infiltrations et aux circulations profondes et lointaines d'eaux souterraines, le site est limité aux abords de l'ouvrage et de la retenue, alors que dans une région sédimentaire fracturée, où l'on trouve des formations calcaires propices aux infiltrations abondantes et aux circulations lointaines, le site peut s'étendre très loin de l'ouvrage ; c'est ainsi que les risques de pertes de la retenue de Sainte-Croix, implantée sur le Verdon, à la sortie de ses célèbres gorges, au nord des grands plateaux de calcaires karstiques du Haut-Var, ont imposé des observations hydrogéologiques dans le bassin de l'Argens qui, de ce point de vue, appartient donc en partie au site de l'ouvrage, à plus de 50 km de lui, sur la bordure sud de ces plateaux.

4.5.1.4 Par rapport aux phénomènes

Elles dépendent encore de la nature des phénomènes induits envisagés, de l'intensité à partir de laquelle on considère que leurs effets ne sont plus observables, soit par les sens, soit par les instruments et enfin, de celle au dessous de

laquelle ils n'ont plus d'effets éventuellement nuisibles sur le comportement de l'ouvrage ou sur celui d'ouvrages voisins : la décompression des roches autour d'une galerie a des effets dommageables sur l'ouvrage lui-même comme les coups de toit, les foisonnements de planchers ou les déformations de pieds-droits ; ils peuvent aussi en avoir en surface comme les affaissements parfois importants qui affectent le sol des bassins miniers où ils endommagent de nombreux édifices. Ils y sont plus généralement peu sensibles mais mesurables au moyen d'un réseau de repères de tassements tels qu'on en établit dans les villes, pour l'étude des tracés d'égouts ou de métropolitains, afin d'éviter que les bâtiments sus-jacents subissent des dommages importants.

4.5.1.5 Par rapport à l'échelle d'observation

Elles dépendent enfin de l'échelle d'observation : pour assurer l'alimentation en eau d'une agglomération, le site hydrogéologique est d'abord un ou plusieurs bassins versants, pour y caractériser un endroit particulièrement aquifère comme une plaine alluviale ; cette plaine et ses abords deviennent le site hydrogéologique dans lequel on choisit une zone favorable à l'implantation d'un champ de captage ; c'est cette zone qui constituera enfin le site hydraulique du captage. Il en va de même pour une grande voie nouvelle, autoroute ou TGV ; on passe progressivement de la recherche du tracé dans un large fuseau à l'échelle de la région, aux terrassements du tracé retenu et aux fondations d'un ouvrage courant, à l'échelle de quelques centaines de mètres carrés.

4.5.2 Modélisation

On entreprend la modélisation d'un site géotechnique d'abord pour le définir et le décrire, puis pour caractériser les phénomènes qui s'y produisent, prévoir les phénomènes qui s'y produiront et plus particulièrement ceux qu'y induira la construction de l'ouvrage, c'est-à-dire pour prévoir l'évolution de l'ensemble site/ouvrage. C'est l'opération fondamentale de la géotechnique, celle dont dépendra la qualité de l'ouvrage ; si elle est ratée, le chantier et/ou l'ouvrage subiront des dommages financiers et/ou matériels plus ou moins graves.

La modélisation de forme d'un site géotechnique est en partie analogique pour représenter son aspect géologique et en partie numérique pour représenter son aspect physique ; il ne peut être correct que si on le bâtit en considérant le site comme un ensemble structuré et organisé soumis à des phénomènes naturels et induits connus ; elle est essentiellement géologique. La modélisation du comportement est essentiellement numérique, mais elle doit respecter les données géologiques, car la géomécanique ne connaît et ne sait manipuler que des modèles simples et le géomatériau ne l'est pas vraiment.

4.5.2.1 Modélisation géométrique

Le modèle géométrique du site est le plus difficile à établir ; il doit être conforme aux modèles types de la géologie structurale et de la géomorphologie

qui sont très nombreux et variés. Les milieux homogènes, isotropes, semi-infinis... figurent seulement des conditions aux limites simples nécessaires à l'intégration d'équations différentielles et à l'application des formules qui en résultent : les couches homogènes, horizontales et d'épaisseurs constantes, le versant à pente constante, le glissement circulaire, la loi de Coulomb... sont des images simplistes d'une réalité beaucoup plus complexe.

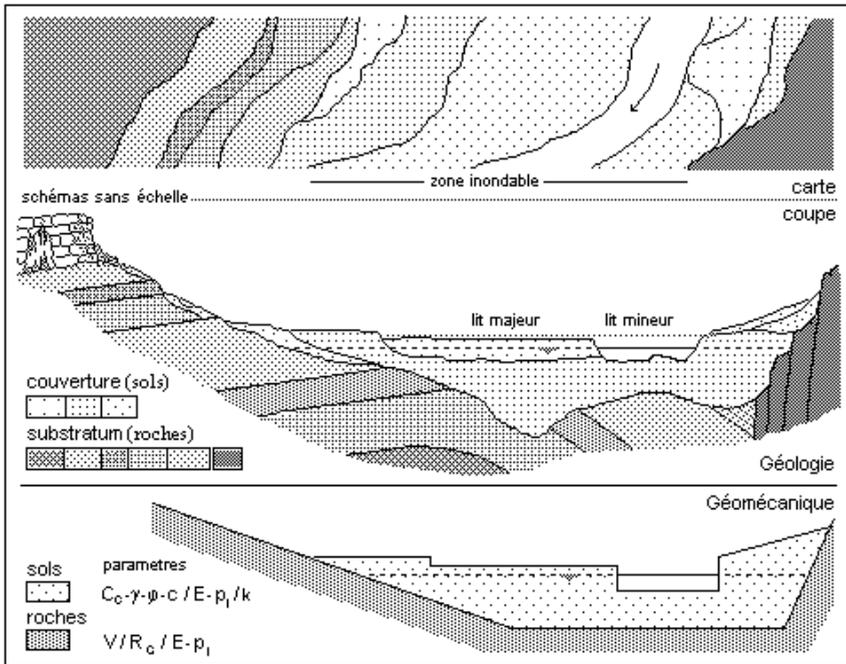


Figure 4.5.2.1 – Modèles de formes

À petite échelle, une plaine alluviale, un versant de colline, une formation sédimentaire, un massif granitique, un volcan... présentent des compositions et des structures assez caractéristiques et suffisamment différenciées pour que sur la base d'observations de surface, on ne risque pas de les représenter par des modèles aberrants. Aux grandes échelles, le risque est plus important ; on doit en effet intégrer au modèle type, les caractéristiques spécifiques des géomatériaux du sous-sol du site, de façon que le modèle correspondant soit compatible avec le type. Si une telle donnée ne s'intègre pas à ce modèle, c'est le plus souvent qu'il est erroné ; il faut alors chercher et corriger l'erreur, et ne pas bâtir un modèle s'écartant du modèle type pour inclure la donnée perturbatrice ; mais la démarche la plus fréquente est de construire un modèle de forme facilitant l'intégration de l'équation différentielle que l'on va utiliser comme modèle du comportement auquel on s'intéresse.

Concrètement, le modèle géométrique du site consiste en des cartes et des coupes bâties au moyen de l'ensemble des données géologiques et géoméca-

niques disponibles, interprétées synthétiquement ; il est susceptible de devoir être modifié à mesure que s'accroît le nombre de données.

4.5.2.2 Modélisation du comportement

Pour bâtir le modèle de comportement d'un site, on a intérêt à puiser dans le catalogue de modèles types que propose la géodynamique ; ils sont nombreux et variés ; les modèles géomécaniques qu'on peut leur faire correspondre, sont au contraire très peu nombreux et relativement analogues puisque la plupart sont bâtis pour faciliter l'intégration analytique ou numérique d'une équation différentielle. La modélisation comportementale d'un site doit donc être en premier lieu et principalement fondée sur la géodynamique ; c'est rarement le cas et le modèle géomécanique de comportement qu'on utilise exclusivement ne représente finalement que lui-même : un glissement de terrain est un phénomène complexe qui affecte un site dont la stabilité n'est qu'apparente ; sa production implique de nombreux paramètres parmi lesquels le temps est l'un des plus influents bien que toujours négligé ; pour que le glissement se produise, il doit se préparer, ou plutôt le matériau dont est constitué le site doit évoluer jusqu'à atteindre le moment où les paramètres de Coulomb qu'utilise le modèle géomécanique de Fellenius-Bishop, aient atteint des valeurs telles que le glissement se produise ; ce ne sont pas forcément celles du calcul ; ensuite, le matériau va continuer à évoluer jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre s'établisse, c'est-à-dire jusqu'à ce que les paramètres aient retrouvé des valeurs telles que le site redevienne stable... en attendant le prochain glissement : les paramètres constants de la géomécanique, il faudrait dire de la géostatique, sont en fait des variables de la géodynamique.

Les seuls modèles géomécaniques qui tiennent compte du temps sont ceux liés à l'écoulement de l'eau, qui par nature, n'est pas un phénomène statique. C'est la raison pour laquelle le modèle de tassement de Terzaghi est un des rares modèles réellement efficaces de la géomécanique ; il rend bien compte de l'évolution du tassement dans le temps ; les modèles de plastorupture la traitent comme un phénomène statique, ce qui est assez surprenant ; on ne doit donc pas trop s'étonner de leur manque d'efficacité. De même en hydraulique souterraine, le modèle du régime transitoire de Theis montre l'évolution dans le temps du niveau d'une nappe aquifère sous l'effet d'un pompage, tandis que le modèle de l'écoulement permanent de Dupuit ne montre que de son état final tel qu'il sera au bout d'un laps de temps indéterminé.

Concrètement, les modèles de comportement d'un site sont dans les cas simples ou simplifiés, des formules permettant de calculer un état final à partir d'un état initial et traduisant une relation de cause à effet ; dans les cas de phénomènes complexes, ce sont des modèles numériques ou des descriptions s'appuyant sur des mesures de paramètres variables dans le temps, comme une série de cartes et de coupes établies à des dates successives, pour représenter un glissement de terrain dans sa phase de déformation plastique, avant que l'on puisse calculer la rupture selon Fellenius/Bishop ou autre.

Le but pratique de l'étude géotechnique est de permettre l'adaptation spécifique de l'ouvrage au site, afin de limiter les risques « naturels » et induits, autant que faire se peut ; il consiste à informer le maître d'ouvrage et les constructeurs de la nature et des comportements du site afin qu'ils puissent définir et justifier les solutions techniques qu'ils devront concevoir, adopter et mettre en œuvre pour réaliser leur aménagement et/ou leur ouvrage en toute sécurité et à moindre coût.

Ce but paraît souvent éloigné des préoccupations de certains géotechniciens qui font ce qu'ils ont l'habitude de faire, une étude stéréotypée quels que soient le site et l'ouvrage, ce qui entraîne souvent des déconvenues. On pourrait attendre plus de réalisme des constructeurs ; mais en général ils négligent le fait que l'ouvrage doit être adapté au site et que cette adaptation n'est possible que sur la base d'une bonne étude géotechnique : quand seules les grandes lignes de leur projet sont définies, ils se préoccupent rarement du site avant de prendre des options irréversibles qui se révéleront parfois malencontreuses. Les particularités naturelles du site sont pourtant les seules contraintes qui leurs sont imposées dans leurs moindres détails : ils peuvent s'en accommoder, pas s'en libérer. De façon très illogique, on inclue pratiquement toujours le coût de l'adaptation du site au coût de l'ouvrage alors qu'il faudrait normalement l'inclure dans la charge foncière.

5.1 Intérêt de l'étude

On projette, on étudie et on réalise de plus en plus rapidement des ouvrages de plus en plus complexes dans des sites de plus en plus difficiles à aménager ; il en résulterait un accroissement inadmissible des risques de tous ordres, si l'on négligeait l'étude géotechnique de ces sites. D'autre part l'industrialisation de plus en plus complète de la réalisation des projets d'aménagement du sol et du sous-sol, impose que l'on prévoie de programmer de façon de plus en plus rigoureuse leur exécution qui doit être aussi rapide que possible pour que l'ouvrage conçu puisse être mis en service dans les délais les plus brefs après qu'a été prise la décision de son financement. Cela impose, entre autres, la mise en œuvre de procédés et de matériels très complexes de très haut rendement comme les ateliers de parois moulées, les tunneliers... dont l'exploitation, très onéreuse, n'est rentable qu'à condition d'être continue et exactement conforme à leur domaine d'emploi ; c'est à la géotechnique de définir ces domaines.

Des méthodes d'ordonnancement très élaborées, pour la mise au point de programmes d'étude et d'exécution, permettent d'obtenir à peu près de telles

conditions, quand elles ne traitent que de techniques classiques et éprouvées. Mais très généralement, l'incidence des études et des impératifs géotechniques est nettement sous-estimée dans ce genre de programme ; il en résulte que, par la suite, on est conduit soit à négliger l'étude soit à bouleverser dès l'abord le programme, ce qui, dans les deux cas, ne peut qu'aboutir aux retards plus ou moins importants que l'on voulait éviter. Quand, plus rarement, on essaie de tenir compte de cette incidence, on s'aperçoit que quoi que l'on fasse, les études géotechniques demeurent sur le chemin critique et on se voit contraint de harceler constamment le géotechnicien en prétendant qu'il retarde la mise au point du projet, ce qui ne facilite évidemment pas son travail ; or il n'est pas possible qu'il en aille autrement, puisque le géotechnicien ne peut intervenir qu'après l'achèvement d'une étape de l'étude technique, alors que l'on attend ses conclusions pour engager l'étape suivante.

En effet le projet technique est généralement très avancé quand on songe à faire appel au géotechnicien. Enfin consulté, il doit prendre connaissance du projet, juger le site, prévoir un programme d'étude, le réaliser et en tirer les renseignements pratiques que les autres attendent. Tout cela lui prend du temps, souvent même davantage qu'il l'avait initialement prévu, à cause de difficultés d'abord insoupçonnées, pendant lequel le projeteur attend ou passe outre. Il n'est possible d'aplanir de telles difficultés qu'en laissant au géotechnicien une liberté de manœuvre et un délai suffisants pour qu'il puisse s'organiser et travailler par étapes. Il doit, entre autres, avoir son mot à dire dans la mise au point du programme général d'étude du projet ; mais on lui en donne rarement l'occasion.

L'intérêt d'une étude géotechnique doit bien entendu être défini par rapport au projet ; on demande à la géotechnique d'en définir le cadre, de contrôler sa faisabilité, éventuellement de proposer des variantes, de valider les dispositions retenues, d'éviter les risques, d'évaluer les coûts..., de préparer sa réalisation et la suivre. Son intérêt scientifique demeure accessoire mais ne doit pas être négligé, car il est toujours possible d'y trouver des éléments utiles à la progression de la connaissance.

Au niveau de l'étude du projet, l'étude géotechnique est d'abord utile au maître d'œuvre, en particulier quand il importe de connaître les caractères généraux du site pour définir les possibilités pratiques de réalisation du projet. Dans le cas où plusieurs variantes sont techniquement possibles, l'étude géotechnique peut contribuer à faire choisir celle qui est préférable ou tout au moins à orienter le choix vers elle. Dès ce niveau, l'étude peut étayer l'évaluation de l'incidence du facteur site dans le budget du projet, incidence qu'il faudra ensuite préciser ; elle peut aussi permettre d'établir de façon aussi précise que possible, le programme d'exécution du projet, en évaluant au mieux les durées des opérations en relation directe avec le sous-sol ; elle peut enfin servir à la rédaction des cahiers de prescriptions spéciales des marchés d'exécution, en particulier pour la définition de certaines opérations et de leur mode de rémunération, en évitant autant que possible les imprévus et les travaux en régie. Cette étude peut d'autre part être utile à l'entrepreneur pour étudier sa proposition sur des bases solides et notamment, choisir les méthodes et le matériel qu'il devra mettre en œuvre pour réaliser chaque opération prévue dans l'appel d'offre, proposer éventuel-

lement des variantes de détail et apprécier au plus juste les délais d'exécution qu'il devra respecter. Si les résultats de l'étude sont suffisamment dignes de foi et précis, il lui sera possible, sous certaines conditions à définir avec le maître d'œuvre et le géotechnicien, de traiter forfaitairement les travaux de terrassements ou de fondations.

Au niveau de la réalisation, l'exploitation des résultats de l'étude géotechnique permet une analyse rapide de petits faits imprévus qui peuvent se manifester malgré le soin pris à essayer de les éviter. On peut ainsi adapter de façon rationnelle, les méthodes mises en œuvre et les moyens matériels dont on dispose déjà et rectifier en conséquence le programme d'exécution.

Au moment de la réception de l'ouvrage, si le chantier a été constamment suivi du point de vue géotechnique, les renseignements recueillis servent de base objective aux discussions entre maître d'œuvre et entrepreneur pour régler un contentieux éventuel.

Durant la vie de l'ouvrage enfin, la somme des renseignements géotechniques recueillis lors de l'étude et de la réalisation permet de mieux entretenir l'ouvrage et éventuellement de le réparer pour prévenir les accidents ou une ruine prématurée.

Ainsi, à tous les niveaux de la conception, de l'étude et de la réalisation d'un projet, une étude géotechnique bien conduite accroît toujours, et souvent de façon déterminante, la rentabilité, la pérennité et la sécurité de l'ouvrage.

5.1.1 Adaptation de l'ouvrage au site

Naguère, les techniques artisanales relativement simples de la construction, évoluaient peu ; les travaux étaient lents, dirigés et exécutés par quelques praticiens peu spécialisés, ayant acquis en majeure partie leur expérience sur le tas. Il était donc facile d'adapter certaines parties de l'ouvrage à la demande ou au besoin sans que cela ait des effets sensibles sur l'ensemble. Selon cette tradition, les constructeurs modernes sont toujours plus ou moins persuadés que quoi que l'on fasse au moment de l'étude du projet, des imprévus, souvent du reste paradoxalement prévus dans les cahiers des charges, surgiront au moment de la construction de l'ouvrage et qu'ils imagineront finalement au moment opportun, une astuce technique permettant de s'en accommoder sans compromettre leur œuvre. Or les techniques industrielles très rigides de construction strictement programmée d'ouvrages complexes, évoluent rapidement et la plupart des travaux sont exécutés dans de courts délais préfixés au moyens de matériels spécialisés par tâches ; au besoin, il est ainsi très difficile de modifier à l'improviste certaines parties de l'ouvrage sans affecter l'ensemble. Le coût effectif de la mise en œuvre de l'astuce et surtout sa répercussion sur le coût général du projet peuvent largement dépasser la somme à valoir forfaitaire prévue au marché, représentant une faible part du montant de l'ensemble des travaux.

Et, effectivement, le projet mal étudié sera finalement réalisé, mais à quel prix ? S'il s'agit de projets publics, la rémunération des imprévus inhérents aux caractères géotechniques du site se fera sur la base des travaux effectués en régie,

justifiés par un aléa géologique ; généralement substantielle, elle permettra à l'entreprise déclarée adjudicataire par référence à des prix courants trop tirés et dont la stricte application l'aurait mise en difficulté, de réaliser des bénéfices ; ce qui est presque devenu un système résulte en fait de la légèreté ou du manque d'études préalables et en particulier de la méconnaissance des caractères géotechniques du site. S'il s'agit d'un projet privé, le coût imprévu ou sous-estimé de fondations pour le coup réellement spéciales, est un prétexte traditionnel qui viendra souvent grever lourdement le budget prévisionnel proposé au maître d'ouvrage par l'entrepreneur pour l'allécher ; il lui permettra en cours de travaux, de justifier une rallonge assurant la rentabilité de son marché, douteuse au départ.

Avant d'entreprendre l'étude spécifique d'un ouvrage dans un site donné, on doit formuler d'abord tous les problèmes géotechniques susceptibles de s'y poser, on précise ensuite dans quelles conditions ils se posent, on fixe les limites de variation du projet, on imagine les solutions techniques possibles et on en évalue le coût ; cela peut conduire à envisager de modifier ou parfois d'abandonner le projet si ces solutions s'avèrent trop onéreuses, ou bien d'en poursuivre l'étude en effectuant éventuellement des travaux complémentaires sur le site afin d'en préciser localement le modèle, si leurs estimations s'avèrent raisonnables. On doit donc définir la documentation spécifique qu'il est nécessaire de réunir pour résoudre ce ou ces problèmes, choisir la nature et définir le volume des travaux qu'il faut exécuter pour réunir cette documentation, et enfin préjuger sa valeur et apprécier la précision des solutions auxquelles elle aboutit.

5.1.1.1 L'adaptation d'un immeuble

L'exemple simple d'un immeuble implanté dans une plaine alluviale montre que dans un site donné et pour un ouvrage donné, de nombreux problèmes souvent liés, se posent ; ils peuvent être résolus de diverses façons, difficiles à tous imaginer dès l'abord.

Le sous-sol de cette plaine est constitué d'une couche superficielle de limon compressible, d'une couche moyenne de grave compacte aquifère et d'un substratum marneux, décomprimé à proximité de son toit. L'immeuble doit comporter dix niveaux de superstructures et deux ou trois niveaux de sous-sol. La première phase de l'étude a permis de définir le niveau de la nappe aquifère, l'épaisseur de chaque couche et l'importance de ses variations, ainsi que les caractéristiques mécaniques moyennes et extrêmes du matériau de chacune. Le premier problème à résoudre est celui de l'implantation du bâtiment ; si l'épaisseur des couches et les caractéristiques des matériaux varient peu, on implante l'immeuble où l'on veut dans le site. Par contre, si le sous-sol est très hétérogène, on cherche à implanter l'immeuble dans une zone où il est le plus homogène possible et où de préférence, la nappe est la plus profonde, le limon le moins épais et le substratum le moins profond. Quand le bâtiment est implanté, on résout les problèmes posés par la construction des sous-sols et par la conception de ses fondations. Auparavant ou en cours d'étude, on peut être amené à préciser certaines caractéristiques mécaniques et hydrauliques des matériaux, selon les problèmes à résoudre.

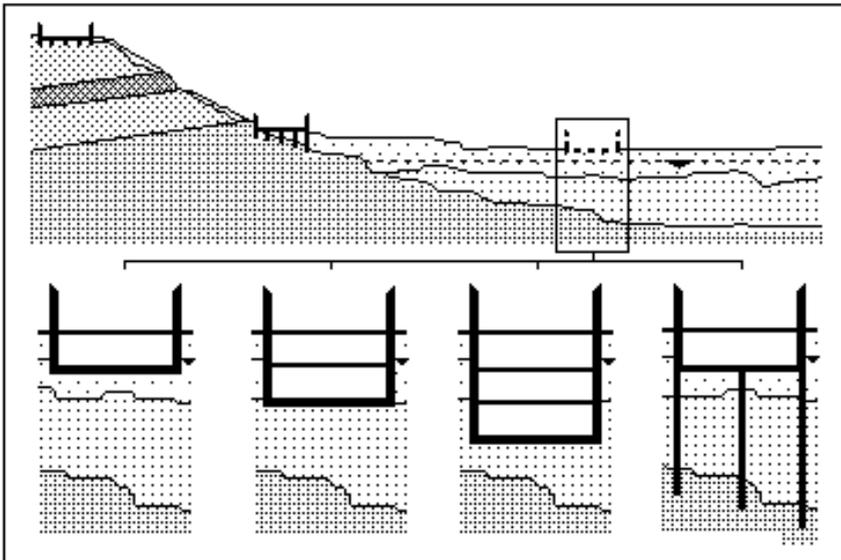


Figure 5.1.1.1 – Adaptation d'un immeuble dans une plaine alluviale

Si le niveau de la nappe alluviale est inférieur au niveau du troisième sous-sol, il suffit d'étudier la façon de réaliser les terrassements et en particulier d'assurer la stabilité des parois provisoires de la fouille, soit en talutant s'il y a de la place, soit en étayant par panneaux alternés ou par rideaux ancrés s'il y a des ouvrages mitoyens. Le problème des fondations peut être résolu indifféremment de deux façons, soit sur semelles ou radier en fond de fouille, soit sur pieux au substratum. La première solution est mieux adaptée à une structure de voiles banchés porteurs tandis que la seconde est mieux adaptée à une structure de poteaux porteurs. Du point de vue géotechnique, le choix dépend de la contrainte admissible en fond de fouille, des risques de tassements et de la profondeur du substratum. Dans le cas de fondations superficielles, on définit la contrainte admissible des matériaux sous le fond de fouille. Si ce fond est encore dans le limon, cette contrainte est faible et on s'oriente vers la solution de radier ou de semelles quadrillées ; des tassements sont alors prévisibles et il faut apprécier leur ordre de grandeur. Si la grave est atteinte, la contrainte peut être plus élevée et le tassement est négligeable ; on adopte donc la solution de semelles filantes. Dans le cas de fondations sur pieux, on détermine l'ancrage dans la marne en tenant compte de sa profondeur et de ses caractéristiques mécaniques puis la portance d'un pieu en fonction de sa longueur et de son diamètre. Selon que les charges des poteaux sont identiques ou très différentes, on choisit un ou plusieurs diamètres de pieux et une ou différentes longueurs d'ancrage. Selon le matériel dont on dispose, on peut, même en cas de charges différentes, utiliser un seul diamètre de pieu mais grouper les pieux par deux ou plus, pour supporter les poteaux très chargés ou bien adapter le diamètre de chaque pieu à la charge qu'il doit porter. Enfin, on peut aussi avoir à choisir entre différentes sortes de mises en œuvre de pieux, battage, forage, vibrofonçage... et entre différents procédés, selon la compacité de la grave, la

longueur moyenne prévue, le ou les diamètres choisis et les conditions économiques du marché. Les murs périphériques et le plancher du troisième sous-sol doivent être doublés d'un réseau de drainage extérieur pour récolter les eaux infiltrées le long des murs mais il n'est pas nécessaire de prévoir un cuvelage étanche.

Si le niveau de la nappe est situé entre les planchers du deuxième et troisième sous-sol, on peut avoir avantage à supprimer le troisième sous-sol et être ainsi ramené au problème précédent ; ou bien, si le niveau de la nappe varie annuellement de sorte qu'il est plus bas que le niveau du troisième sous-sol durant une période assez longue pour que les travaux d'infrastructures soient réalisés avant la remontée des eaux, on peut procéder comme précédemment, mais on traite alors les murs et le plancher du sous-sol en cuvelage étanche. En particulier, le plancher doit être un radier résistant à la poussée hydrostatique, ce qui peut valoriser par rapport aux autres, la solution de radier pour les fondations de l'immeuble.

Si le niveau de la nappe est toujours plus haut que celui du plancher bas du sous-sol, l'exécution des terrassements est très délicate ; si la puissance de la nappe est faible, la profondeur des terrassements sous son niveau peu importante et si l'on ne craint pas de provoquer des dommages à des ouvrages voisins fondés sur le limon dont la consolidation s'accélérera par drainage, on peut effectuer un rabattement ; sinon, on construit une enceinte provisoire ou définitive, ancrée ou non dans la marne, combinée ou non à un rabattement partiel de la nappe et ancrée en tête par tirants ou bien buttonnée ou contreventée de l'intérieur, suivant que la marne est plus ou moins profonde, la grave plus ou moins compacte, la fouille plus ou moins profonde et les terrains mitoyens plus ou moins dégagés ; cette enceinte peut être provisoire et réalisée en palplanches ou définitive, parois moulées qui sert ensuite de murs périphériques des sous-sols, contreventée par les planchers. Une telle enceinte ancrée dans la marne, est à peu près étanche ; le plancher du dernier sous-sol n'est donc pas nécessairement un radier important, mais il est faut le drainer. D'autre part, les parois moulées peuvent servir de fondations aux façades et aux pignons ; le même matériel permet aussi de réaliser le reste des fondations sur parois ou barrettes de sorte que si la solution de fondations sur radier paraît mieux indiquée dans les deux premiers cas de terrassement, la solution de fondations profondes est préférable dans le troisième.

Ainsi, dans un cas aussi simple, les solutions aux divers problèmes géotechniques qui se posent sont nombreuses et variées. Certaines sont plus ou moins interdépendantes et le choix de l'une pour résoudre l'un d'entre eux, peut favoriser le choix d'une autre qui n'aurait pas été choisie *a priori* pour en résoudre un autre ; dans tout cela, les solutions mathématiques de la géotechnique ne sont que de simples outils d'estimation et de contrôle. Si le modèle du site n'est pas établi quand on définit le mode de fondation de l'immeuble ou le nombre de sous-sols économiquement acceptable, on risque de commettre de graves bévues qui se traduisent par de lourdes pertes de temps et d'argent à l'exécution. La règle est donc de ne poser un problème spécifique que quand le site est suffisamment connu pour en permettre la résolution.

La résolution des problèmes géotechniques est la dernière phase de l'étude et non la première ou la seule, ainsi qu'on le fait habituellement en adoptant *a priori* une solution, sans pouvoir déterminer si elle est la meilleure possible. Quand le site est connu, on peut définir les problèmes susceptibles de se poser et ainsi, ne pas en oublier un ou en sous-estimer l'importance.

5.1.1.2 L'eau souterraine

Les problèmes que pose la présence d'eau souterraine dans le sous-sol d'un site sont généralement négligés ou sous-estimés par les géotechniciens qui abordent leurs études en mécaniciens.

La profondeur du niveau de l'eau et la perméabilité du matériau aquifère influence nettement la conception de l'infrastructure d'un immeuble. En fait, les effets de l'eau souterraine en géotechnique déterminent l'instabilité des talus, murs, parois, dallages, chaussées... ; c'est l'ignorance de la pression de courant, due à la circulation de l'eau dans la roche d'un de ses appuis, qui est à l'origine de la catastrophe du barrage de Malpasset sur le Reyran, en 1959. De nombreux soutènements mal drainés s'écrouleront encore contre une roche pratiquement imperméable, au faible débit de fuite en cours d'exécution de fouille, avant que l'on ait compris que la pression de courant n'a pas grand-chose à voir avec la pression hydrostatique ; une paroi mal drainée contre une roche presque imperméable, au débit de fuite insignifiant, peut être plus dangereuse que contre une roche très perméable au débit de fuite spectaculaire ; dans le premier cas, la pression de courant, très variable peut être temporairement beaucoup plus élevée que prévu ; dans le second la pression hydrostatique est quasi permanente, facile à prendre en compte dans les calculs.

5.1.1.3 Contourner la difficulté

La bonne connaissance de l'ensemble du site, permet d'affirmer que le problème à résoudre se pose effectivement, qu'il fait partie des problèmes les plus importants qui se posent pour l'ensemble du projet à l'étape en cours de l'étude et qu'il est impossible de l'éviter en modifiant légèrement le projet. Ainsi, entre Saint-Maximin et Brignoles dans le Var, le tracé de l'autoroute A8 Aix/Nice traverse une région au relief très accidenté, dont le sous-sol présente une structure complexe : schématiquement, les vallées de certains ruisseaux comportent des sections tantôt profondes et larges et l'on y trouve alors une très épaisse couche de vase couvrant un substratum de gypse très corrodé, mêlé à de l'argile molle, tantôt étroites et encaissées et l'on y trouve alors du calcaire subaffleurant ; le problème géotechnique du franchissement de ces vallées, particulièrement difficile à résoudre dans le premier cas, ne se pose pratiquement pas dans le second ; dans chaque vallée, un ajustement local sans incidence sur le tracé général, a permis de passer dans une zone calcaire, c'est-à-dire d'escamoter le problème. Cela a été possible parce que l'on s'était donné la peine d'étudier systématiquement la structure des abords du site et non seulement celle des abords immédiats de l'ouvrage. Si on ne l'avait pas résolu ainsi, le problème des franchissements de ces vallées aurait été l'un des plus difficiles à résoudre de l'ensemble du projet. Sa résolution aurait longtemps

mobilisé l'équipe et les crédits d'étude, au détriment d'autres problèmes initialement négligés par rapport à lui et qui par la suite, se sont révélés beaucoup plus difficiles à résoudre.

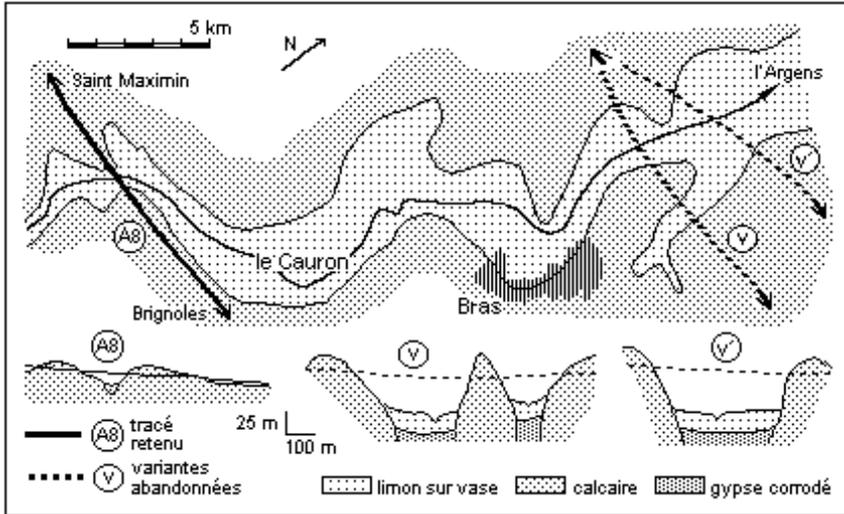


Figure 5.1.1.3 – Autoroute A8 – études de variantes – choix du tracé

Un problème dont la négligence peut avoir de lourdes conséquences de délais et de coûts, est celui des accès des grands ouvrages de communication, tunnels et viaducs en zones montagneuses ; on consacre tous les crédits d'étude à l'ouvrage principal en laissant quelques miettes aux grands terrassements d'accès, qui par la suite, le font payer cher et longtemps.

5.1.2 Justification de l'étude

Pour se conformer à une tradition ou à une obligation administrative, sans conviction, on demande parfois à un spécialiste (?) une rapide visite du site qui apporte quelques succincts renseignements généraux, plus ou moins intéressants mais souvent inutilisables et généralement négligés. Sans méthode et sans but nettement défini, on fait ensuite exécuter quelques sondages sans donner de directive ; on confie enfin, sans lui donner d'instructions, quelques échantillons à un laboratoire qui ne sait trop qu'en faire et effectue à tout hasard sur eux une coûteuse série plus ou moins « complète » (?) d'essais en partie inutiles. Les renseignements ainsi recueillis sont rarement exploités de façon profitable ou ils le sont dans le cadre trop étiqué de la géomécanique. On se contente le plus souvent de les inclure à l'état brut dans les dossiers d'appel d'offres, laissant aux consultés le soin de les utiliser comme bon leur semble ; il est bien rare que ceux-ci en tiennent compte de façon rationnelle en étudiant leur proposition, soit faute de compétence soit parce qu'ils doutent et souvent avec juste raison,

de la valeur des résultats présentés qui ont été obtenus en dehors de leur contrôle ; ils préfèrent se fier à leur intuition et voir venir : l'indétermination étant source de contentieux, ils pensent qu'elle ne peut que leur être financièrement favorable et essaient rarement de la faire lever.

Et il arrive souvent, en cours de travaux ou plus ou moins longtemps après leur achèvement, que l'influence néfaste de particularités naturelles d'un site, négligées ou sous-estimées, soit telle qu'elle impose d'importants travaux imprévus parfois longs et toujours onéreux tant en eux-mêmes qu'à cause des retards qu'ils entraînent sur le programme général d'exécution de l'ouvrage et souvent à tel point que l'économie du projet et ce programme s'en trouvent bouleversés. Il peut alors apparaître trop tard qu'il aurait été plus rentable de modifier le projet dès l'abord ou même d'abandonner le site choisi pour un autre plus favorable. Beaucoup plus rarement cette influence peut avoir des effets catastrophiques qui sont rarement des conséquences de la fatalité : les trois quarts des dépassements de devis et des accidents impliquant le sous-sol, seraient dus à des défauts d'étude et/ou de mise en œuvre. Mais le « mauvais » sol imprévu est le prétexte classique de ce genre d'affaires ; quand il s'agit d'accidents, le fait que le Code civil qualifie éventuellement le sol de vicieux, même s'il rend les constructeurs responsables de ne s'en être pas préoccupé, est là pour le confirmer ; quand il s'agit de dépassements de devis, l'aléa géologique est l'euphémisme courant du langage des entrepreneurs qui veulent justifier leurs réclamations. Peut-être donc que, pour conserver ce genre d'atout dans son jeu, l'ensemble des constructeurs préfère que les études géotechniques soient aussi discutables que possible pour charger le géotechnicien de ses éventuels « défauts ».

Dans la majorité des cas, il est pourtant certain que la réalisation d'une étude géotechnique correcte, a pour effet d'aplanir la plus grande partie de ces difficultés ; il est tout aussi certain que la réalisation d'une telle étude assure à la fois l'économie et la sécurité de la plupart des ouvrages ; c'est une opération difficile dont dépend en grande partie la qualité de l'ouvrage concerné ; au cas par cas, en raison de la complexité de la démarche géotechnique, il n'est pas possible d'en proposer un programme type et d'en évaluer la durée d'exécution : les problèmes géotechniques à résoudre ne sont jamais les mêmes car le site et l'ouvrage sont différents dans chaque cas. On doit donc conduire l'étude géotechnique selon un schéma général très souple, mais néanmoins organisé, logique et rigoureux, en tenant compte des caractères naturels du site, des particularités de l'ouvrage, de la nature des problèmes géotechniques que posent son étude et sa construction ; même si certains sont posés dès l'abord, d'autres connus ou non, attendus ou non, pourront se poser à n'importe quelle étape de l'étude géotechnique, selon les données recueillies à mesure qu'elle progresse ; cela implique que cette étude soit conduite de façon continue, parallèlement à l'étude et à la construction de l'ouvrage, par le même géotechnicien expérimenté, en relation permanente avec le maître d'œuvre et les ingénieurs de structure et de chantier.

5.2 La méthode

L'étude géotechnique est une opération qui consiste à mettre en œuvre de façon cohérente et rationnelle, certaines théories et techniques des géosciences et de la physique, certaines techniques du bâtiment et du génie civil, pour caractériser un site, le décrire et le schématiser ; cela conduit à bâtir un modèle du site généralement représenté par des cartes, des profils, des formules et des modèles numériques ; on peut alors prévoir son évolution en étudiant les phénomènes naturels ou induits qui l'affectent ou l'affecteront et ainsi, lui adapter l'ouvrage qui y sera implanté, en résolvant les divers problèmes que posera cette implantation.

Cette étude doit fournir rapidement et au moindre coût, les renseignements nécessaires et suffisants sur les caractères naturels d'un site, pour préciser la conception d'un projet, organiser et contrôler son exécution, et prévoir le comportement futur de l'ensemble site/ouvrage.

La façon de conduire une étude géotechnique dépend de la conception personnelle du géotechnicien qui en est chargé ; mais quel que soit le schéma général qu'il a l'habitude de suivre, il doit l'adapter à chaque cas en tenant compte des caractères naturels du site, des particularités du projet et bien souvent aussi, du budget qu'il propose au maître d'ouvrage et/ou que ce dernier met à sa disposition. Il n'est donc pas possible de proposer un programme-type d'étude géotechnique, mais seulement une méthode dont seules les grandes lignes ont un caractère général.

5.2.1 Nécessité d'une méthode cohérente

Technique aussi vieille que l'humanité, mais science jeune et en constante évolution, la pratique de la géotechnique vogue au hasard de modes favorisant temporairement une théorie ou une technique très spécialisée et donc d'une utilité trop limitée, suivies tour à tour par les tenants d'écoles dissemblables, n'ayant pratiquement entre eux que des relations de concurrence apparemment doctrinale, mais en fait commerciale. Elle ne dispose donc pas d'une méthode générale cohérente, base logique d'une indispensable évolution rationnelle comme doit en avoir toute science confirmée. Elle propose seulement de nombreux recueils de recettes souvent excellentes mais trop spécifiques, à l'aide desquels il est presque toujours difficile de produire des études rationnelles et efficaces pour de nombreuses raisons :

5.2.1.1 Des sites difficiles à aménager

La tendance actuelle est de construire de plus en plus vite, des ouvrages traditionnels de plus en plus complexes ou des ouvrages nouveaux, dans des sites mal connus ou difficiles à aménager. Pour un usage donné, on commence évidemment toujours par occuper les sites les plus favorables, de sorte que les bons sites naturels ont été progressivement utilisés jusqu'à saturation par nos prédécesseurs et que l'on ne trouve déjà plus de sites naturels à la mesure de

certains de nos besoins traditionnels. Nombre de nos besoins nouveaux nous obligent même à utiliser des sites vierges, parfois dans des régions tout à fait hostiles.

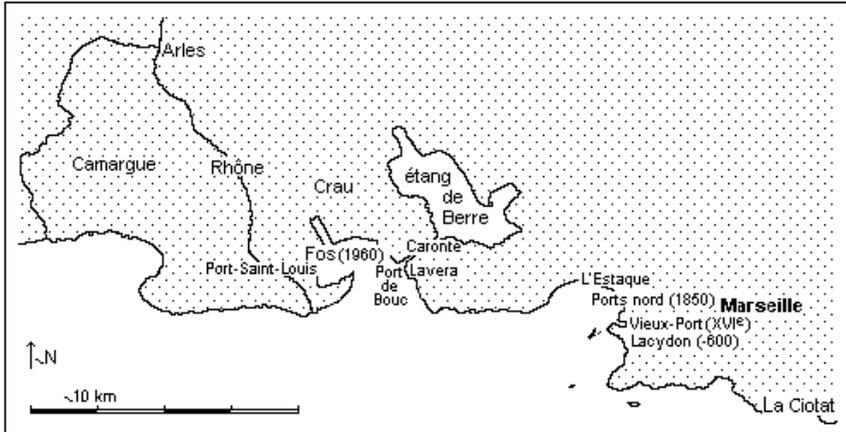


Figure 5.2.1.1 – Complexe portuaire marseillais

On peut prendre pour exemple de cette tendance, l'évolution du port de Marseille. De l'Antiquité à la fin du xv^e siècle, l'anse naturelle du Lacydon a pu recevoir de petites unités au très faible tirant d'eau, qui pouvaient s'échouer sur ses grèves ou accoster des quais rudimentaires. La construction des premiers quais modernes débuta au xvi^e siècle, quand il fallut faire accoster de grandes nefs au tirant d'eau important. Elle a continué jusqu'à ce que, vers le milieu du xix^e siècle, l'avènement de la vapeur et le début des aventures coloniales imposent une extension des quais hors des limites du Lacydon, devenu trop petit. La côte nord de la rade, jugée avec juste raison plus favorable à un aménagement portuaire, fut préférée à la côte sud. À partir de 1845, une importante digue parallèle à la côte fut construite sur des fonds de - 15 m, considérables pour l'époque, afin de créer les bassins artificiels de la Joliette. Et en une centaine d'années, à mesure des besoins et sur le même principe, cette digue fut progressivement allongée vers le nord et de nouveaux bassins furent aménagés jusqu'à l'Estaque. La côte change là de direction et de nature, mettant un terme aux possibilités d'extension du port de Marseille dans son site d'origine.

Parallèlement à ce développement, des sites annexes furent aménagés pour des installations spécialisées. C'étaient des chantiers navals, très anciens à La Ciotat vers l'est et plus récents à Port-de-Bouc vers l'ouest. À l'embouchure du Rhône, Port-Saint-Louis assurait à la place d'Arles trop éloignée dans les terres, le transfert du cabotage nord-méditerranéen à la navigation rhodanienne. À partir des années 20, Lavera, Caronte et l'étang de Berre ont été aménagés pour approvisionner l'industrie pétrochimique qui pouvait se contenter d'installations maritimes assez sommaires, mais qui avait besoin de grands espaces terrestres, impossibles à trouver dans le site même de Marseille. Enfin, la mise en service de navires gros porteurs, pétroliers, minéraliers et porte-conteneurs, qui ont

souvent des tirants d'eau supérieurs à 25 m et qui exigent des moyens de déchargement très puissants et très rapides, conjuguée avec l'installation à proximité du littoral de l'industrie lourde approvisionnée par ces navires, imposèrent la création d'un énorme ensemble portuaire au fond du golfe de Fos. C'était le seul site de la région où l'on trouvait à la fois des fonds rapidement importants, un arrière-pays entièrement désert, la plaine de la Crau, et évidemment des communications faciles avec le centre et le nord de l'Europe par la vallée du Rhône, principale raison d'être de l'ensemble portuaire marseillais. Mais l'aménagement de cette côte sableuse, basse et désolée, n'offrant aucun abri naturel et dont l'arrière-pays est un vaste marécage, imposa des travaux considérables, réalisés en quelques années. En effet, alors que le Lacydon, devenu depuis le Vieux-Port, avait été utilisé pendant plus de 1 500 ans sans être réellement aménagé, que son aménagement progressif avait duré plus de 300 ans, que les ports nord furent entièrement réalisés en un peu plus d'un siècle, il a fallu moins de dix ans dans les années 60, pour étudier, décider et réaliser les premières installations de Fos dont l'ensemble est maintenant achevé. Entre temps, les chantiers navals de Port-de-Bouc puis de La Ciotat, devenus obsolètes, ont été remplacés par des ports de plaisance.

5.2.1.2 Un milieu naturel mal connu

L'aménagement de sites vierges dans des régions mal connues comme la haute montagne, les zones polaires, désertiques ou de grandes forêts, le plateau continental et même les grands fonds marins, impose que des spécialistes recueillent rapidement un ensemble aussi complet que possible de renseignements, géotechniques entre autres, qu'ailleurs des générations d'occupants ont progressivement rassemblés par une expérience commune et quotidienne. La méthode géotechnique courante, essentiellement instrumentale, peut à la rigueur convenir et plutôt mal à l'étude de sites connus, dont il ne s'agit en fait que de préciser certains détails. Elle est par contre tout à fait inadaptée à celle des sites vierges dont il est nécessaire d'avoir à la fois une connaissance analytique et une vue synthétique.

Et même, dans les régions occupées depuis longtemps, un mode de vie de plus en plus artificiel nous a progressivement conduits à une quasi ignorance du milieu naturel que nos anciens connaissaient par tradition et expérience. Plutôt que prendre la peine de se transporter soi-même sur le terrain, opération certes désuète et prosaïque mais généralement très efficace pour bien connaître un site, on a maintenant de plus en plus tendance à transporter le terrain dans son confortable bureau, après l'avoir schématisé en cartes de plus en plus fréquemment établies par photogramétrie, en photographies, maquettes, échantillons, tableaux de mesures et rapports. La plupart des techniciens travaillant à un projet se soucient peu ou pas du site et ne savent même pas lire un paysage ; il faut donc que des spécialistes et en particulier les géotechniciens, le fassent pour eux. Seulement, ces derniers ne disposent pas d'une méthode suffisamment générale qui leur permette de le faire avec une efficacité optimum car la méthode actuelle, essentiellement fondée sur la mesure et le calcul, conduit à une schématisation quasi squelettique du géomatériau.

5.2.1.3 Mesures et calculs

En géophysique et en hydraulique souterraine les mesures et les calculs ne posent pas de problème particulier ; les appareils et les formules sont peu nombreux et très spécifiques ; aucun ne fait double emploi. Il n'y a qu'une façon de réaliser un sondage en sismique-réfraction ou de calculer le débit d'un puits en régime transitoire... En géomécanique, c'est plus compliqué ; l'exemple de la détermination de la contrainte admissible d'une fondation superficielle est démonstratif et peut laisser perplexe ; plusieurs appareils tant de terrain que de laboratoire, fournissent des paramètres de rupture et utilisent des formules qui n'ont de commun que l'usage que l'on en fait.

In situ (Fig. 5.7.3.1.1), avec les pénétromètres dynamiques, c'est le nombre de coups de mouton d'une certaine énergie pour une certaine hauteur d'enfoncement et une formule plus ou moins proche de celle dite des Hollandais ; avec les pénétromètres statiques, c'est la résistance de pointes de divers angles et surfaces et diverses formules à peu près analogues mais utilisant des coefficients de forme différents ; avec le pressiomètre, c'est la pression limite ou plutôt, l'une d'entre elles sans que l'on sache bien laquelle et une formule protéiforme, inutilement alambiquée... Les appareils de laboratoire (Fig. 5.7.4.2), boîte de Casagrande ou triaxial, mesurent c et j sans que là encore, on sache bien lesquels ; Terzaghi (Fig. 2.1.1.2.2) a établi une formule tenue pour semi-empirique par les calculateurs rigoureux, qui utilise ces mesures à travers des coefficients notés N_c , N_q et N_g , obtenus au moyen d'abaques. Caquot, le DTU 13-1 (Document technique unifié) et quelques autres, ont repris la même formule mais avec d'autres coefficients, issus de calculs pas tout à fait les mêmes ; c'est s'être donné beaucoup de mal pour pas grand-chose car les résultats obtenus diffèrent au plus de 20 % et sont appliqués après une correction par un coefficient de sécurité de 1/3 ! La répartition des contraintes en profondeur selon Boussinesq, Westergaard, Newmark et d'autres, les modules issus du pressiomètre, de la table, de l'œdomètre ou même, ce qui est un comble, du pénétromètre statique, ainsi que les calculs correspondants de tassements, les calculs de stabilité de talus à partir de méthodes, de courbes, de paramètres divers... obéissent, si l'on peut dire, aux mêmes règles. Mais les coefficients de sécurité qui minorent tous ces calculs, sont tels que tout cela n'a pas d'autre effet que de compliquer inutilement des choses simples.

5.2.1.4 Des techniciens multiples

Alors que naguère, le maître d'œuvre était capable de mettre au point un projet et de faire construire un ouvrage en s'entourant d'un nombre limité de collaborateurs qui étaient plutôt des aides dont il dominait parfaitement les spécialités, un grand nombre de techniciens de haut niveau doit maintenant l'assister. Chacun utilise la méthode et le langage propres à sa spécialité. Or les méthodes mais surtout les langages qu'ils emploient habituellement, peuvent donner aux autres l'illusion de bases scientifiques et techniques solides et élaborées, alors qu'il en est rarement ainsi car les méthodes sont souvent incertaines et les langages, ésotériques. Il en résulte des risques d'incompréhension et de contresens dommageables à l'étude du projet et à la construction de l'ouvrage.

La géotechnique étant certainement la discipline dont les constructeurs sont les moins familiers, ces risques sont particulièrement élevés à son propos.

5.2.1.5 Confondre études et sondages

Une raison déterminante de la nécessité de proposer une méthode cohérente de la géotechnique, tient au fait que, d'une part les professionnels des géosciences, trop peu spécialisés comme certains géologues ou trop spécialisés comme certains mécaniciens, et d'autre part, certains architectes, ingénieurs ou hommes de chantier, s'occupent de géotechnique sans en connaître tous les aspects et les ressources, et donc sans savoir la mettre en œuvre ou l'utiliser correctement.

Les cahiers de prescriptions spéciales de la plupart des marchés géotechniques en donnent de fréquents exemples ; ils définissent des programmes de travaux et non d'études ; en général, on y décrit longuement les sondages et les essais ; on en chiffre rigoureusement les quantités ; on en repère exactement les emplacements, alors que l'on n'y consacre que quelques lignes assez vagues à la définition de l'étude proprement dite, du reste considérée le plus souvent comme une simple interprétation des sondages et essais, peu ou pas rémunérée.

Ceux qui lancent de tels programmes voudraient pouvoir considérer le géotechnicien comme un quelconque entrepreneur dont ils définiraient et contrôlèrent strictement l'intervention, tout en exigeant négligemment de lui, en prime bénévole, quelques recommandations désintéressées dont il assumerait évidemment la responsabilité, comme par exemple de projeter cet organe tout à fait secondaire que seraient les fondations d'un immeuble ! Cet état d'esprit concrétise bien le malentendu fondamental contre lequel bute toujours le développement rationnel de la géotechnique et qui consiste à confondre volontairement ou non l'exécution de sondages et d'essais et la réalisation d'une étude géotechnique. Cette confusion est tellement ancrée dans les habitudes des utilisateurs de la géotechnique qu'actuellement, il est pratiquement impossible de proposer une étude cohérente à l'un d'entre eux, à moins de jouir de son entière confiance, auquel cas il l'acceptera souvent sans être tout à fait convaincu de son efficacité et ne s'inclinera devant l'aspect positif de ses résultats qu'en tranquillisant son esprit par l'attribution à son géotechnicien d'une espèce de don divinatoire analogue à celui d'un sourcier.

Or, la confiance aveugle que l'on fait par exemple aux résultats des sondages implantés en quinconce, généralement imposés dans ce genre de document et qui sont les piliers de l'actuelle méthode géotechnique, est réellement mal placée et leur interprétation relève effectivement en grande partie de la divination. Imaginons en effet que l'on veuille définir le sous-sol de l'ensemble du territoire français sans étude structurale préalable en y exécutant selon ce schéma, cinq sondages en quinconce, c'est-à-dire en l'occurrence, quelque part en Bretagne, puis dans les Vosges, dans la partie axiale des Pyrénées occidentales, dans le Mercantour ou l'Estérel et enfin dans le Massif central. En considérant les résultats obtenus au moyen de ces sondages, on pourrait conclure que le sous-sol de la France est entièrement constitué de massifs anciens, ce qui est évidemment très loin d'être le cas.

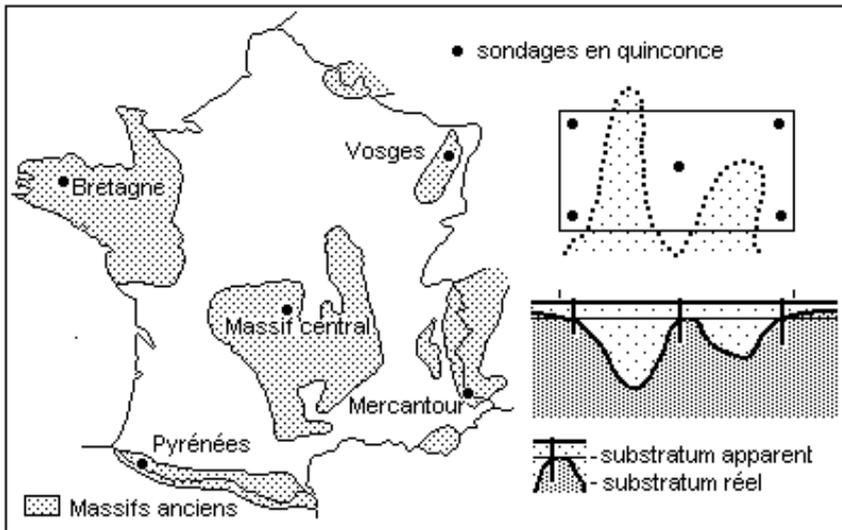


Figure 5.2.1.5 – Sondages en quinconce

5.2.1.6 Site et étude géotechnique

Cet exemple outrancier illustre parfaitement le danger d'une interpolation de sondages dont la répartition ne reposerait pas sur une connaissance préalable de la structure générale du site étudié, c'est-à-dire le danger d'une interprétation qui n'entrerait pas dans le cadre d'une étude géotechnique cohérente, telle que j'essaierai d'en esquisser les grandes lignes.

La méthode que je propose s'appuie ainsi sur un objet matériel, le site, et sur un processus logique, l'étude géotechnique. Contrairement à ce que pourraient penser certains ingénieurs généralistes qui ne s'intéressent souvent qu'au sous-sol de l'emprise de l'ouvrage lors du projet d'exécution, cette méthode doit être appliquée quelles que soient l'échelle du projet et l'étape de l'étude. Les moyens employés sont les mêmes, comme la façon de les mettre en œuvre, seule la densité des travaux change, de plus en plus forte à mesure que le projet se précise. Démarrer une étude à l'étape du projet d'exécution comme dans le cas d'immeubles urbains, n'exclut pas que l'on doive s'intéresser au contexte géotechnique, ne serait-ce que pour bien définir les travaux de terrain, éviter l'inflation de sondages et essais en partie inutiles, critiquer la valeur des résultats obtenus, éviter les dommages dus aux effets secondaires de la construction dans ses environs...

L'étude d'un même ouvrage quelles qu'en soient la nature et l'importance ne saurait évidemment être conduite de la même façon et avec les mêmes moyens, dans un fond marécageux, sur un coteau argileux, un plateau karstique, une croupe granitique...

5.2.2 Esquisse d'une méthode

Exposer l'adaptation à la géotechnique de la méthode de la géologie appliquée qui privilégie l'observation sans négliger la mesure et le calcul à la géotechnique peut paraître superflu ; c'est pourtant nécessaire, ne serait-ce que pour souligner que la géotechnique est avant tout une géoscience appliquée, ce dont ne tiennent pas compte la plupart des géomécánicos qui n'en retiennent que sa forme mathématisée, négligeant ainsi la majeure partie de ses caractéristiques, de ses moyens et de ses possibilités.

5.2.2.1 Justification et limites

Mais si cette méthode paraît effectivement bien adaptée aux études géotechniques préliminaires, quand le projet n'est défini que dans ses grandes lignes et que l'implantation de l'ouvrage n'est pas tout à fait arrêtée, ainsi qu'aux études de grands projets linéaires comme les voies de communication, il peut sembler qu'elle complique inutilement les études spécifiques de petits ouvrages dont le projet et l'implantation sont arrêtés.

Pour ces petits ouvrages, la méthode classique des sondages et des essais *in situ* et/ou au laboratoire serait préférable. Elle consiste à aller droit au particulier sans tenir compte du général ; elle conduit à la lourdeur et à l'imprécision : en admettant que le sous-sol d'un site soit assez homogène pour qu'on puisse l'appliquer sans risque, ce que l'on ne peut pas savoir *a priori*, il faudrait néanmoins disposer de critères objectifs pour choisir les moyens d'étude les mieux adaptés au cas considéré, sondages carottés et essais de laboratoire, pénétromètres statiques et/ou dynamiques, sondages rapides et pressiomètre, pour ne citer que les plus fréquemment mis en œuvre, car aucun d'entre eux n'est universel et fiable. Ces critères font référence au cadre géologique de l'étude, c'est-à-dire que leur définition implique l'existence d'un modèle géologique du site. Et ce n'est pas en mesurant systématiquement, en fait au hasard, quelques paramètres du géomatériau que l'on en construit un de la façon la plus objective : conduire une étude au hasard, sans idée directrice, est un non-sens technique et économique.

► Échelles

Le point de vue de l'étude change totalement selon les échelles respectives de l'objet ou du phénomène étudié et de l'observateur ; ces échelles sont simultanément ou indépendamment, des échelles géométriques et/ou chronologiques.

Un observateur perçoit un objet à son échelle comme un individu ; il peut agir sur lui de façon déterminée et peut interpréter les phénomènes qui le concernent selon des lois déterministes de causes à effets ; la forme analytique correspondante est celle de l'élément fini. Il perçoit un objet à une échelle supérieure à la sienne comme un ensemble d'individus ; il ne peut pas agir sur cet ensemble pour en modifier l'organisation et ne peut appréhender les phénomènes qui le concernent que par l'interprétation subjective d'informations limitées qui ne sont qu'un aspect schématique du réel ; la forme analytique correspondante est celle de l'intégration. Il ne perçoit pas un individu d'une échelle inférieure mais

peut plus ou moins l'appréhender sans le distinguer individuellement en agissant sur l'ensemble d'échelle supérieure auquel il appartient ; les phénomènes qui l'affectent ne peuvent s'interpréter qu'au moyen de lois statistiques ; la forme analytique correspondante est la différenciation.

Nos échelles géométrique et chronologique naturelles sont étroitement définies et nous n'en sommes pas maîtres ; nous ne sommes à l'aise que dans l'espace à portée de notre main et de notre regard ainsi que dans le présent. Par l'instrumentation et la spéculation, nous essayons constamment de changer d'échelle et nous n'y parvenons jamais correctement. L'échelle de prédilection de la géotechnique est celle du site qui est toujours supérieure à la nôtre tant du point de vue géométrique que chronologique ; à l'échelle du site, l'objet est en effet la roche, faciès naturel local de la formation, elle-même objet de l'échelle supérieure, celle de la région, tandis qu'à notre échelle, l'objet est l'échantillon ou la zone d'essai, portion artificielle limitée de la roche. Étudier un site géotechnique selon la seule méthode des sondages et des essais, peut donc s'interpréter comme une grave confusion d'échelles ; elle est fondée sur la méconnaissance de l'hétérogénéité ordonnée du géomatériau qui conduit à poser dès l'abord le problème quasi insoluble du passage des échantillons au site, alors que le bon cheminement est de passer d'abord du site aux échantillons pour revenir ensuite au site.

► Sondages et échantillons

Les termes de sondage et d'échantillons appartiennent aux langages de la statistique et de la géotechnique. La théorie du sondage a été développée en statistique ; il est donc utile d'en rappeler les principales acquisitions que l'on pourra appliquer à la géotechnique sans grande modification mais en jouant un peu sur les mots.

Dans les deux cas, ces termes ont des sens logiques très proches bien qu'ils couvrent des populations d'objets différentes ; effectuer un sondage, c'est sélectionner au moyen de critères préalablement définis, un échantillon à l'échelle humaine que l'on prétend pouvoir ainsi considérer comme représentatif d'un ensemble d'échelle supérieure, afin que, ayant déterminé un certain caractère de l'échantillon, on puisse apprécier par extrapolation ce même caractère de l'ensemble. Il s'agit donc d'une méthode fondée implicitement sur une opération de changement d'échelle ; elle permet d'étudier avec une certaine précision, un ensemble trop peuplé ou trop complexe pour être traité de façon détaillée, en effectuant le moins d'opérations possibles dans un temps et pour un coût minimum. Le résultat d'un sondage est fondamentalement approximatif puisqu'il est issu d'une extrapolation ; il est donc affecté d'une imprécision systématique irréductible, fonction de la qualité et de l'effectif de l'échantillon ainsi que de l'homogénéité et de l'effectif de l'ensemble.

La théorie voudrait que l'échantillon soit choisi au hasard et qu'il soit nombreux ; toutes choses égales d'ailleurs, la précision d'un sondage croît en effet comme la racine carrée du nombre de l'échantillon. Cela irait évidemment à l'encontre de l'objectif de la méthode puisqu'une telle opération d'échantillonnage serait longue et onéreuse ; on est alors amené à travailler sur un petit échantillon ; mais travailler sur un échantillon limité conduit à un résultat limité.

Il importe donc d'avoir préalablement défini clairement l'ensemble étudié, ce que l'on veut connaître à propos de cet ensemble, et avec quelle précision : un vaste programme de recherche très général sur un ensemble complexe ne peut être abordé ainsi ; le petit échantillon doit être d'autant plus convenablement choisi, qu'il est plus réduit. Avant de recueillir un tel échantillon, il importe donc de construire d'abord un modèle de l'ensemble, approprié à l'étude que l'on se propose d'entreprendre ; mais, au départ tout au moins, on n'est pas sûr que le modèle retenu soit finalement représentatif de l'ensemble puisque c'est précisément pour étudier cet ensemble que l'on effectue le sondage. On doit donc aussi disposer de nombreux moyens d'ajustement et de recoupement pour établir ce modèle et critiquer le résultat d'un sondage. Il est ainsi absolument nécessaire de réfléchir avant, pendant et après, tant sur l'objet de l'étude et sur la précision souhaitée, que sur la nature de l'ensemble et la valeur relative de l'échantillon, pour éviter qu'un échantillonnage soit un ramassis incohérent de données disparates.

L'exécution du sondage et l'étude de l'échantillon ne peuvent donc être que les derniers éléments d'une longue suite ordonnée d'opérations de plus en plus complexes et spécifiques dont la réalisation correcte implique la référence à une méthode. Pour chaque projet, spécifiquement, la géotechnique doit faire appel aux techniques les mieux appropriées pour obtenir les résultats recherchés avec la précision souhaitée, en réduisant autant que possible la durée et le coût de la phase d'étude correspondante. Qu'il soit possible dans un site dont le sous-sol est bien connu comme un site urbain, ou bien pour une étude limitée dans un site simple, de simplifier la méthode, ne change rien au fond ; il faut bien recueillir préalablement, d'une façon ou d'une autre, les éléments qui permettent d'affirmer que le sous-sol du site est simple ou bien connu. Il ne s'agit évidemment pas de conduire une étude géotechnique en faisant abstraction de tout ce qui est déjà acquis ; il faut seulement la conduire logiquement, sans idée préconçue et sans rien négliger, en utilisant éventuellement un acquit de référence, mais alors en le soumettant à une critique préalable permettant de tenir compte de sa valeur et de ses limites.

5.2.2.2 Un programme spécifique

Il importe de noter dès l'abord que, s'il est possible d'organiser et de conduire logiquement une étude géotechnique, on ne peut toutefois pas en standardiser le programme ni les moyens mis en œuvre pour le réaliser, car les problèmes géotechniques à résoudre dans chaque cas, sont différents. On ne construit en effet presque jamais deux ouvrages strictement identiques et quand ils le sont, comme certains ouvrages préfabriqués ou de modèles courants, on les construit en divers endroits dont les sous-sols sont sûrement différents ; ainsi la notion de prêt à construire ne prend en fait de sens que quand l'adaptation au sol, terrassements et fondations, si succincte soit-elle, est achevée.

Chaque site doit donc être étudié spécifiquement, selon un programme sur mesure, adapté à chaque étape de l'étude et éventuellement même susceptible d'être à tout moment modifié en fonction des résultats obtenus, en mettant en œuvre les moyens qui fourniront à meilleur compte les renseignements les plus

précis et les plus complets. Chaque moyen a évidemment sa valeur mais aussi ses limites ; aucun n'est *a priori* inutile, mais aucun n'est universel. à chaque étape de l'étude, employer ceux qui lui sont les mieux adaptés, conduit certainement à une meilleure précision de résultats et à d'appréciables économies de temps et d'argent.

Pour qu'il soit possible de le faire, le programme spécifique de chaque étude doit avoir été soigneusement préparé en tenant compte à la fois des caractères naturels du site et des particularités techniques du projet. Le géotechnicien doit donc collaborer avec le maître d'œuvre, pour mettre au point ce programme, le réaliser et en exploiter les résultats ; il ne doit pas être un fournisseur vendant des heures d'ingénieur, des points de géophysique, des mètres de sondage, des essais à l'unité ou à l'heure d'équipe, sans trop se soucier de ce qu'en feront les constructeurs laissant au maître d'œuvre la responsabilité de la définition et de l'implantation des travaux, puis de l'exploitation de leurs résultats.

► Du début à la fin

Une étude géotechnique doit être une opération continue, débutant avant le choix définitif du site, quand seules les grandes lignes du projet sont esquissées et s'achevant au plus tôt à la fin de la construction de l'ouvrage. En fait, les choses se passent rarement ainsi parce que cette conception est loin d'être entrée dans les mœurs ; actuellement, dans de nombreux cas, on ne demande la collaboration d'un géotechnicien, quand toutefois on le fait, que s'il se pose un problème géotechnique assez complexe pour que le maître d'œuvre et ses collaborateurs techniques habituels soient convaincus qu'ils ne sauraient pas le résoudre eux-mêmes, et on limite généralement son intervention à la stricte résolution théorique du problème, en lui accordant un minimum de temps et de budget. On peut aussi demander cette collaboration pour obtenir une attestation d'assurance, mais on peut alors être certain que les moyens que l'on donnera au géotechnicien friseront l'indécence.

L'organisation de l'étude est alors fort simple, mais peu satisfaisante.

► Un programme évolutif

L'organisation correcte d'une étude géotechnique implique qu'elle soit confiée à un géotechnicien expérimenté qui doit la conduire par phases et de façon de plus en plus détaillée. Il est en effet impossible d'imaginer dès l'abord dans le détail, tout ce qu'il faudra faire pour réaliser une étude satisfaisante ; le site, pratiquement inconnu au début, devient en effet de mieux en mieux connu à mesure que progresse l'étude et certains problèmes d'abord envisagés, se résoudront beaucoup plus facilement que prévu, alors que d'autres plus difficiles à résoudre, ne se révéleront qu'au cours de l'étude.

Dans les contrats d'études définissant dans leurs moindres détails la mission du géotechnicien et les moyens mis à sa disposition pour la remplir, on prétend établir une fois pour toutes, un programme et un devis d'étude géotechnique et envisager de s'y tenir scrupuleusement quoi qu'il advienne. Une telle disposition est particulièrement dangereuse, plus apparentée à l'inconscience qu'à la sagesse. Elle est malheureusement justifiée par la dérive fréquente des dépenses

en cours d'étude, imposée aux maîtres d'ouvrages par la découverte de difficultés qualifiées d'imprévues, mais souvent plus commerciales que réelles.

En fait, l'exercice de la géotechnique s'apparente plus à l'artisanat qu'à l'industrie ; c'est une des raisons de la difficulté qu'éprouvent à s'entendre le géotechnicien d'une part et les constructeurs de l'ouvrage d'autre part. Chaque étude présente un certain aspect de recherche fondamentale qui rend vain tout essai de codification et de production en série ; il n'y a pas et il ne peut y avoir de recette géotechnique suffisamment générale pour être utilisée sans risque, n'importe où, par n'importe qui et à propos de n'importe quoi. La plupart de ceux qui avaient imaginé d'imposer une méthode, généralement fondée sur l'usage exclusif d'un appareil, comme seule capable de résoudre n'importe quel problème géotechnique, ont dû se résoudre à proposer sans trop de conviction commerciale, un éventail de moyens dont ils ne maîtrisent pas toujours l'utilisation, mais dont l'efficacité est maintenant reconnue.

5.2.2.3 Par le site ou par l'ouvrage

Il y a deux façons d'aborder une étude géotechnique, soit par le site, soit par l'ouvrage, dont le choix dépend de qui en est chargé.

Selon la première, si le géotechnicien est plutôt géologue, il étudie d'abord objectivement et complètement le site en mettant en œuvre les techniques les mieux adaptées à ses particularités naturelles et il essaie ensuite de résoudre les problèmes géotechniques posés par le projet, afin d'adapter au mieux l'ouvrage au site ; il doit commencer par faire l'inventaire de ce qui est pour essayer de comprendre et de prévoir ce qui sera. C'est évidemment ainsi qu'il faut procéder.

Par contre, s'il est plutôt mécanicien, le géotechnicien définit *a priori* les modalités de l'étude qu'il va entreprendre en fonction de ses connaissances techniques limitées à l'exploitation d'essais et des caractères de l'ouvrage, sans trop tenir compte de ceux du site, ce qui revient à décider *a priori* de ce qui sera avant de connaître ce qui est. Il assimile ainsi implicitement le site à un élément quelconque du projet, sans se rendre compte que cet élément est en fait le seul qui lui soit effectivement imposé dès l'abord, c'est-à-dire celui qu'il importe de bien connaître en premier lieu, quand le projet est encore susceptible d'être modifié. Car les caractères du site préexistent dans leurs moindres détails au projet et sont difficiles à adapter à ses impératifs techniques, alors que ceux de l'ouvrage peuvent n'être définis que dans leurs grandes lignes puis être adaptés aux caractères naturels du site quand ils seront connus. On peut faire ce que l'on veut du projet, mais on est bien obligé de faire ce que l'on peut du site.

En abordant l'étude par le site, toutes les données des problèmes géotechniques susceptibles de se poser, pourront être connues dès l'abord, ce qui permettra d'étudier le projet et de réaliser l'ouvrage de la façon la plus rationnelle et la plus sûre, rapidement et à moindre frais, en adoptant en toute connaissance de cause dans les calculs techniques, des coefficients de sécurité nécessaires et suffisants. Par contre, en l'abordant par l'ouvrage, les problèmes géotechniques se poseront les uns après les autres, parfois sans que cela ait été prévu et chacun

sera étudié et résolu de façon spécifique ; cela conduira souvent à entreprendre de façon désordonnée et hâtive, plusieurs études particulières dont les relations naturelles pourtant évidentes, seront généralement mal appréhendées ; il en résultera toujours d'importantes pertes de temps et d'argent, surtout si certains problèmes ne se posent qu'au moment de l'exécution, ce qui se produit généralement ; dès l'étude du projet, il sera de plus nécessaire de surdimensionner les parties de l'ouvrage en relation avec le sous-sol, car on saura mal définir les coefficients de sécurité dont il faudra affecter les résultats des calculs, en raison du doute qui subsistera sur l'existence éventuelle d'hétérogénéités locales dans le sous-sol.

En langage de mécanicien, on peut dire qu'aborder un problème géotechnique par le site revient à considérer que la variabilité du matériau terrestre est ordonnée, ce qui est vrai, alors que l'aborder par l'ouvrage revient à considérer qu'elle est aléatoire, ce qui est faux malgré les apparences.

Aborder l'étude par l'ouvrage consiste par exemple à entreprendre une étude géotechnique selon un programme préétabli et immuable ; c'est la manière que l'on adopte le plus fréquemment en exécutant des sondages implantés aux angles et au centre de l'ouvrage, atteignant une profondeur fixée en fonction de sa largeur ou de la profondeur qu'atteindra une fondation profonde, selon des normes issues de curieux calculs et en imposant de prélever des échantillons ou bien d'exécuter des essais *in situ* à des niveaux prédéterminés régulièrement espacés, tous les mètres quand on est riche ou soupçonneux, tous les 3 ou 5 mètres quand on est pauvre ou optimiste.

L'exécution de sondages et d'essais ne peut pas être considérée comme une méthode géotechnique. Dans un site dont la structure ne serait pas parfaitement homogène, ce qui est le cas général, une campagne de sondages implantés en quinconce comme on le fait habituellement selon une maille imposée par le budget de l'étude, réservera sûrement des surprises désagréables. Fixer *a priori* une profondeur de sondage conduit, soit à exécuter des sondages trop courts n'atteignant pas une formation profonde susceptible d'influencer le comportement de l'ouvrage, soit à sonder une formation sans intérêt pour le projet ; pour un immeuble de 15 m de large par exemple, un classique sondage de 20 m est trop court si le substratum du site est à 25 m de profondeur ou trop long s'il est à 5 m. Quant à prévoir ce que sera la longueur d'un pieu avant d'avoir réalisé l'étude... !

Enfin, prélever des échantillons ou exécuter des essais à des profondeurs régulières et prédéterminées, peut être surabondant si le sous-sol est à peu près homogène, ou insuffisant s'il est très hétérogène. La meilleure façon d'apprécier l'homogénéité d'un site ne consiste sûrement pas en l'exécution d'un grand nombre de sondages et d'essais et en l'exploitation des résultats statistiquement ; en raison de leur coût et de leur durée, il est tout à fait impossible d'en faire un nombre suffisamment grand pour que l'ensemble de leurs résultats ait une réelle valeur statistique. C'est par contre une excellente opération commerciale pour l'entrepreneur de sondages et pour le laboratoire d'essais. C'est sans doute la vraie raison du succès de cette méthode.

5.2.3 La méthode

La méthode usuelle de la géotechnique, en fait de la géomécanique elle-même calquée sur celle du dimensionnement d'ouvrage, consiste en général à réaliser en une seule étape non définie selon un programme reposant essentiellement sur le coût d'un devis arbitraire et chiche, quelques sondages mécaniques à l'emplacement de l'ouvrage projeté et à mesurer des paramètres de géomatériau au moyen d'essais *in situ* ou sur échantillons pour finalement extraire de ces mesures les valeurs de paramètres de calculs qu'utilisera librement l'ingénieur de structure, sans même demander au géotechnicien de contrôler la pertinence de son usage. Cette méthode convient plus ou moins à l'étude d'ouvrages courants de petite emprise au sol implantés dans des sites connus dont la structure est simple, mais la moindre complication locale peut la mettre en défaut. Elle est évidemment inadaptée à l'étude d'aménagements et ouvrages dont l'emprise s'étend sur des sites dont la structure est très hétérogène et/ou composés de plusieurs unités structurales.

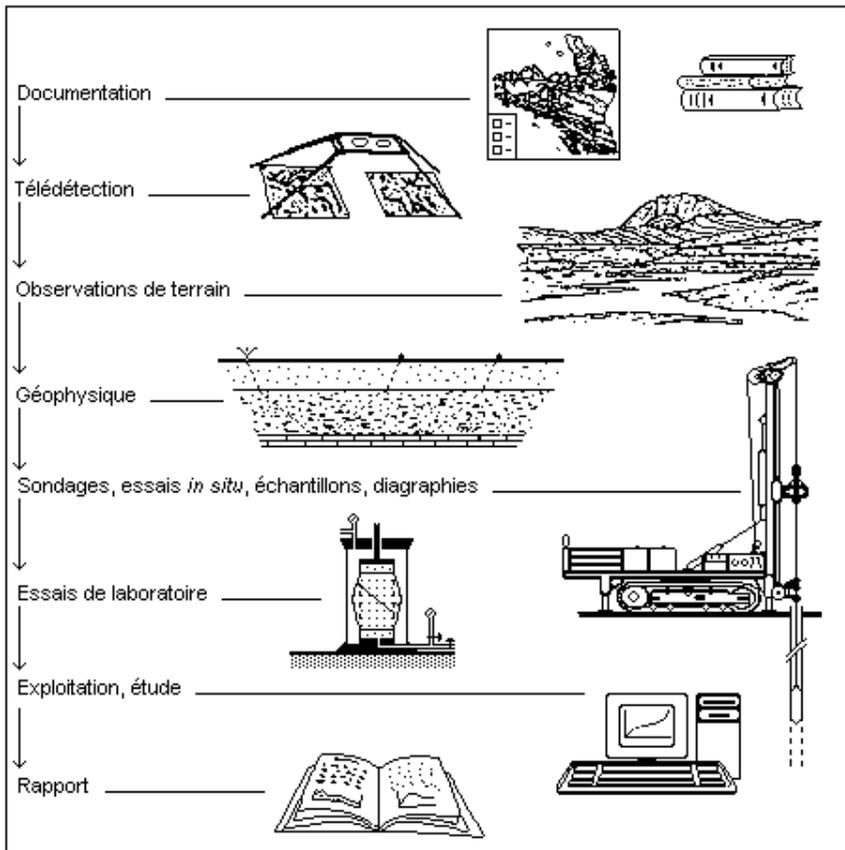


Figure 5.2.3 – Enchaînement des techniques d'étude

La méthode que j'éprouve depuis plus de quarante ans avec succès, peut être adaptée à l'étude de n'importe quel type de site et d'ouvrage ; fondée à la fois sur l'observation, le calcul et l'expérience, sa mise en œuvre n'est pas toujours simple, mais elle permet d'aborder n'importe quel problème géotechnique, connu ou nouveau quelle qu'en soit la difficulté ; elle fait une part égale à la démarche du géologue et à celle du géomécanicien, ce qui ne va pas sans quelques difficultés ; elle implique qu'à toutes les étapes et phases de l'étude (cf. 5.2.2.2 et 5.2.2.3), le géotechnicien mette en œuvre autant que de besoin, toujours dans le même ordre, tout ou partie des techniques dont il dispose, documentation, télédétection, observations de terrain, géophysique, sondages, essais et instrumentation de terrain, essais de laboratoire, puis qu'il exploite les données ainsi recueillies pour bâtir le modèle du site et répondre aux questions que pose la construction de l'ouvrage.

5.2.3.1 L'observation

La disproportion énorme qui existe entre l'échelle spatio-temporelle des objets et des phénomènes naturels et l'échelle humaine rend l'observation géotechnique particulièrement difficile :

Le géomatériau est multiforme et variable, en grande partie inaccessible à l'observation directe puisque seule la surface du sol est visible ; les formes qu'il affecte sont toujours complexes et rarement déterminables avec précision ; leurs dimensions très petites ou très grandes, n'ont généralement aucune commune mesure avec les dimensions qui nous sont facilement accessibles sans le secours d'instruments ; il n'est pas immuable et son évolution qui dépend de facteurs dont la plupart sont mal connus ou même inconnus, est difficilement prévisible.

Les phénomènes naturels dont il a été, est ou sera le siège ou l'élément, sont pour la plupart, très courts à l'échelle de l'histoire de la Terre et très longs à l'échelle d'une vie humaine ; ou bien ils sont presque instantanés et ne sont qu'incidemment observés. On les détermine plutôt indirectement par leurs effets, en constatant l'état résultant du site affecté, dont la stabilité même n'est qu'apparente. Explicables mais imprévisibles, possibles mais non certains, ce sont des péripéties et non des épisodes ; on ne peut donc les appréhender qu'en termes de probabilité ; c'est en particulier le cas de ceux qui sont à l'origine des accidents géotechniques.

Il est en général impossible d'observer, et *a fortiori*, de décrire quantitativement, les détails d'un objet ou d'un phénomène naturels que le géologue peut souvent saisir correctement dans son ensemble par un raisonnement analogique ; ce paradoxe apparent fait en grande partie la différence entre la démarche du géologue et celle du mécanicien. à partir d'une observation plus ou moins subjective, le géologue peut en effet raisonner synthétiquement et ainsi appréhender globalement l'objet et/ou le phénomène par analogie ; cela lui donne une certaine capacité de prévision, alors que le mécanicien, pratiquement obligé de raisonner analytiquement, peut manquer de modèle théorique ou de renseignements objectifs lui permettant de poursuivre son raisonnement qui doit nécessairement se dérouler selon un schéma axiomatique préexistant et utiliser des données quantitatives précises ; il ne peut ainsi analyser complètement le

phénomène, c'est-à-dire en définir tous les paramètres, les mesurer et définir l'influence de chacun dans sa production ; il ne peut donc pas la prévoir : en présence d'une formation ayant une certaine tendance au glissement, le premier pourra, s'il a de l'expérience, dire à peu près dans quelles conditions un glissement est susceptible de se produire, sans toutefois pouvoir préciser quand et où ; le phénomène de glissement est pour lui défini mais incertain ; mais sans le recours à une instrumentation onéreuse et compliquée, le second n'en peut objectivement rien dire ou à peu près, avant d'avoir établi la géométrie du glissement, mesuré la cohésion, l'angle de frottement et la densité moyenne du matériau de la formation, d'avoir vérifié la présence ou l'absence d'eau souterraine... et d'avoir utilisé avec le crayon ou l'ordinateur, les valeurs ainsi obtenues selon les règles d'une méthode de calcul quelconque. Et si, après ce dur labeur, il obtient un coefficient de sécurité mesurant l'aptitude de la formation à glisser dans les conditions de l'étude, il ne peut pas plus que le géologue, répondre aux questions pourtant essentielles de quand ? et où ? Car ce coefficient de sécurité n'est en rien un coefficient d'incertitude (*cf.* 5.6.3.1). En toute rigueur, le mécanicien doit considérer le phénomène comme aléatoire s'il peut l'observer sans savoir ou pouvoir l'évaluer. Et si, dans ces conditions, il se lance dans la prévision, il triche consciemment ou non, en se comportant en géologue ; cela est du reste tout à fait légitime et même recommandé du point de vue de l'efficacité et de la sécurité. Encore faut-il qu'il en soit réellement capable.

L'influence du facteur humain est évidemment prépondérante dans la production des phénomènes artificiels dont se préoccupe particulièrement la géotechnique, et la construction d'un ouvrage en produit évidemment. Ceux-ci sont relativement plus faciles à observer puisqu'on peut se rendre à peu près maître de leur production, comme lors de la première mise en eau d'un barrage, rigoureusement surveillée.

Les paramètres dont dépendent les phénomènes géotechniques naturels ou artificiels, et qu'il faudra tenter de définir et de mesurer pour réaliser une étude géotechnique fructueuse, sont extrêmement nombreux et variés. Il est en effet facile d'imaginer une foule de paramètres relatifs aux objets et phénomènes terrestres en les considérant tour à tour sous leurs aspects géologiques, géophysiques, géochimiques, mécaniques, hydrauliques... On ne s'en est pas privé, oubliant généralement que, même si l'on n'a pas pu établir de relation mathématique simple entre la plupart d'entre eux, ils sont en fait interdépendants puisqu'ils se rapportent à un même objet ou à un même phénomène. Cela revient à dire que les valeurs de paramètres différents d'un même objet comme le module pressiométrique et la vitesse sismique d'un certain géomatériau, doivent être cohérentes même si elles ne sont pas rigoureusement déductibles l'une de l'autre ; la vérification de cette cohérence par la mise en œuvre de moyens différents, est une méthode redondante très commode pour apprécier la validité des mesures dans un site donné. En négligeant cette interdépendance, on obscurcit davantage la géotechnique en général et la géomécanique en particulier qui utilise de nombreux paramètres très proches les uns des autres ; on s'obstine à ne pas tenir compte des relations qui existent manifestement entre eux, comme entre la teneur en eau d'une argile et sa cohésion ; le seul essai qui, en effet, traduise la pourtant évidente relation entre la résistance mécanique

d'une argile et sa teneur en eau, est l'essai CBR (California Bearing Ratio) ; c'est un essai routier qui, comme tous ceux de cette espèce, est rejeté pour cause d'empirisme par les purs mécaniciens. Cela est d'autant plus regrettable que la simple considération de cette relation éviterait de nombreux accidents de fondations superficielles ancrées dans la zone de variations saisonnières de la teneur en eau du matériau, ainsi que de nombreux glissements de talus de déblais exposés aux intempéries. à peu près analogues du point de vue de leur nature géotechnique, les formations d'argile détritiques plus ou moins sableuses du Tertiaire récent, ont ainsi des aptitudes au glissement, radicalement différentes selon le climat de la région considérée. Tout à fait instables en Angleterre, des talus de déblais y sont à peu près stables dans le Bassin parisien avec 1/3 de pente, en Provence avec 1/2 et en Algérie avec plus de 1/1. On constate en effet que la résistance à la compression simple d'un tel matériau peut par exemple passer de plus de 7 bars à moins de 1 bar quand la teneur en eau varie de 15 % à 25 %.

Il est encore relativement facile, dans la plupart des cas, de mesurer à peu près correctement la majorité de ces paramètres ; il devient plus difficile d'analyser objectivement la représentativité d'une série de mesures, c'est-à-dire de s'assurer que la valeur moyenne et la dispersion observées correspondent réellement à celles du paramètre lui-même et non seulement à la distribution plus ou moins aléatoire des éléments de cette série forcément limitée. Il est encore plus difficile, même avec l'aide d'un ordinateur, d'exploiter avec profit une série de mesures trop limitée pour être statistiquement représentative, sans la soumettre à une critique préalable.

L'observation géotechnique ne peut être ainsi que très fragmentaire et toujours demeurer incomplète puisque l'état du géomatériau ne peut pas être facilement décrit avant la réalisation d'un ouvrage et puisque ce matériau continue inévitablement à évoluer de façon quasi incontrôlable après la réalisation.

5.2.3.2 L'expérimentation

Le bénéfice du passage de l'observation à l'expérimentation n'est pas toujours évident en géotechnique. Dans de nombreux cas, les sens peuvent se révéler plus aigus que les appareils ; plus généralement, la valeur des renseignements obtenus à partir des seconds peut ne pas dépasser celle des renseignements obtenus à partir des premiers. Mais quand on s'en aperçoit, c'est que les appareils étaient inutiles ou qu'il était prématuré de les avoir utilisés. Cela paraît évident ; c'est pourtant ce que l'on fait fréquemment quand on met prématurément en œuvre une technique d'instrumentation comme la géophysique ou les sondages mécaniques, sans avoir acquis une solide connaissance générale du site à étudier, en établissant une bonne carte de terrain. Il arrive ainsi souvent que l'on envisage d'exécuter un sondage à proximité d'un affleurement rocheux que l'on n'a même pas observé, dans le seul but de définir le substratum du site dont fait partie cet affleurement.

Pour des raisons analogues, l'expérimentation directe connaît les mêmes difficultés que l'observation. Les seules véritables expérimentations géotechniques possibles sont, en fait, les réalisations d'ouvrages eux-mêmes, ce qui confère un

intérêt particulier à l'expérience personnelle des praticiens ainsi qu'à la publication et à l'étude de monographies détaillées. Mais la construction d'un ouvrage modifie le site de manière plus ou moins imprévisible et irréversible, ce qui rend toujours une telle expérience unique, impossible à reproduire et finalement incomplète. On a en effet peu de chances de pouvoir définir avec précision l'état du site et de l'ouvrage avant sa ruine ; c'est lui qu'il importerait surtout de connaître pour achever l'expérimentation de façon parfaite. Et si l'on doit admettre que l'expérimentation géotechnique est seulement la réalisation, on est bien obligé de convenir qu'elle est en fait toujours négative puisque tout ouvrage humain est voué à la ruine à plus ou moins long terme pas forcément pour des raisons géotechniques, bien entendu.

L'expérimentation indirecte, par similitude, analogie ou simulation, serait matériellement plus abordable que l'expérimentation directe. Malheureusement sa mise en œuvre se heurte à l'importante hétérogénéité généralement plus ou moins ordonnée et plus rarement aléatoire du géomatériau et à la grande complexité des formes qu'il affecte, ce qui rend difficile la construction ou la mise au point d'un modèle géotechnique représentatif. Elle se heurte aussi à l'imprécision sur la nature, le nombre, l'importance et la valeur relative des paramètres tant naturels qu'artificiels, régissant les phénomènes qui s'y produisent. Les méthodes courantes des mathématiques appliquées à la physique macroscopique permettent de formuler simplement un certain nombre de lois géomécaniques mais, dans l'état actuel de nos connaissances et sans doute pour très longtemps, aucun artifice simple ne permet de tenir compte, pour cette formulation, de la complexité fondamentale du géomatériau et de sa prédisposition à évoluer. La géomécanique ne sait pas étudier la stabilité d'un talus dont la cohésion du matériau qui le compose se modifie dans le temps, ce qui est le cas général ; elle ne sait qu'apprécier la stabilité du talus à un moment donné et pour une cohésion donnée ; et quelque temps après leur construction, il arrive que des talus, stables selon les critères de la géomécanique, glissent sans prévenir parce que, sous l'action des agents atmosphériques ou pour d'autres causes imprévues, la cohésion du matériau au moment de l'accident est devenue très différente de ce qu'elle était au moment de l'étude par simulation, issue d'essais de cisaillement effectués sur échantillons ou *in situ*.

Le passage du comportement d'un modèle réduit à celui d'un ouvrage réel s'est toujours montré décevant en géomécanique ; les résultats de méthodes numériques ne peuvent être interprétés que de façon très approximative ; on ne peut pas définir des rapports simples et constants entre les effets de certains phénomènes sur un objet réel d'une part et sur son modèle d'autre part ; l'introduction de mystérieux coefficients de formes dans les formules, ne résout jamais ce problème. Ainsi, on ne peut pas extrapoler directement les résultats d'un essai de plaque pour calculer rigoureusement le tassement d'une fondation superficielle ; or, dans la théorie de l'élasticité, l'analogie mathématique des déformations est rigoureuse pour un milieu homogène et isotrope. Cette irritante et incommode impossibilité est une illustration supplémentaire de la difficulté de passer des échantillons au site ou de l'accroissement fini à la différentielle pour permettre une intégration ; en effet, elle tient essentiellement au changement d'échelle entre la plaque et la semelle, c'est-à-dire entre le modèle et l'objet, qui impose non seulement la classique considération d'un coefficient

de forme mais aussi et peut-être surtout, un changement d'optique dans la conception de l'homogénéité du sous-sol : si l'on peut admettre à la rigueur que la fraction de sous-sol, sollicitée par la charge d'une plaque de dimension réduite, est homogène, on peut être sûr qu'il n'en sera pas de même de celle sollicitée par la charge d'un bâtiment, composée d'espaces plus ou moins ordonnés de matériaux différents. On peut tirer d'un essai de plaque le module élastique d'un matériau donné, et cet essai est alors comparable à l'essai pressiométrique ou à n'importe quel essai mécanique de laboratoire, mais il ne permet pas plus qu'eux de définir le module global du sous-sol d'un site, puisque ce module global n'existe physiquement pas. Pourtant, il est couramment utilisé par les ingénieurs de structure, comme le paramètre caractéristique du sous-sol dans le calcul automatique, car il permet d'établir des équations homogènes relatives à un ensemble élastique continu site/ouvrage, évidemment tout à fait abstrait. La méthode de calcul de tassement qui est fondée sur l'attribution au sous-sol d'un site, d'un trop théorique module élastique global, sa raideur, est en fait d'autant plus irréaliste que les tassements élastiques, si toutefois ils existent, méritent rarement d'être pris en considération ; ceux dont il faut le plus souvent tenir compte, sont les tassements dus au changement de structure du matériau sous l'effet de contraintes entraînant des déformations permanentes. En l'espèce, Terzaghi est plus efficace que Boussinesq ou Westergaard et la raideur est un paramètre particulièrement abstrait.

Il résulte de tout cela que l'on ne peut pratiquement jamais imaginer une expérience directe ou indirecte dont les enseignements aient une portée générale indiscutable. L'induction est donc une forme de raisonnement dangereuse mais indispensable en géotechnique, qu'il faut toujours l'utiliser avec prudence. Bien que la plupart des théories de la géomécanique soient formulées de façon apparemment rigoureuse, on se souviendra toujours qu'elles reposent pratiquement sur des postulats simplificateurs exorbitants et sur des bases d'observations ou d'expériences très souvent discutables et toujours incomplètes.

5.2.3.3 L'analogie

La seule méthode d'étude géotechnique suffisamment sûre, est finalement le rapprochement prudent de cas connus et du cas étudié, et le géotechnicien doit étudier spécifiquement chaque problème qui lui est posé. Il faut souligner la prudence avec laquelle doit être fait ce rapprochement, car à la variabilité statique et dynamique du géomatériau, s'ajoute la spécificité du projet technique, de sorte que même si l'on pouvait imaginer deux sites parfaitement identiques dans leurs formes et dans leurs évolutions naturelles, rien n'impliquerait que les projets le soient eux-mêmes. Les phénomènes induits, dont les sites seraient les sièges, seraient donc différents, comme le seraient aussi l'évolution de ces sites.

5.2.3.4 Un problème nouveau et unique

Tout problème de géotechnique est ainsi un problème nouveau et unique. On ne peut prétendre le résoudre complètement mais seulement lui trouver une

solution provisoire, valable à un moment donné, parmi d'autres possibles. La géotechnique est un peu l'art de choisir entre des inconvénients.

La méthode générale de la géotechnique ne peut donc être fondée que sur le recueil dans un site dont les limites ne sont pas données *a priori*, d'indices qualitatifs et quantitatifs aussi objectifs et précis que possible, utilisés après une critique serrée de leur valeur intrinsèque, dans un cadre schématique de règles plus ou moins élaborées, pour présenter à un moment donné, un ensemble d'acquisitions et d'hypothèses sur un objet qui ne pourra jamais être étudié à fond et qui ne se représentera jamais. Dans un cas donné, la qualité des acquisitions et le bien fondé des hypothèses ne pourront même pas être considérés comme prouvés par le succès à court terme d'une étude géotechnique dont les conclusions ne représenteront toujours que l'une des solutions imaginables au problème posé. Les mêmes hommes ou d'autres, disposant de moyens et de délais de travail différents, pourront toujours aborder et étudier un problème géotechnique de diverses façons en utilisant ou non les mêmes données et les mêmes formules et en interprétant différemment ou non les mêmes phénomènes ou des phénomènes différents. Ils aboutiront à des solutions différentes, toutes à peu près équivalentes sur le plan pratique ; par expérience, on peut dire que, pour le moment, celles issues des traitements mathématiques les plus rigoureux sont rarement les meilleures.

5.2.3.5 Conduite d'une étude

Une étude géotechnique doit donc être conduite selon un schéma qui fait une part égale à ce que peuvent lui apporter de meilleur la démarche du géologue et celui du mécanicien, en dosant judicieusement l'expérience et la théorie, l'observation et le calcul.

Dans ce schéma, au début de l'analyse du problème général posé par le projet d'ouvrage, l'observation et le raisonnement analogique priment ; on doit raisonner en géologue pour appréhender le site et le placer dans un ensemble plus général. On achève cette analyse en mécanicien pour définir les phénomènes qu'il faudrait étudier et prévoir la façon dont on pourrait le faire. On choisit alors les théories, les méthodes et les paramètres que l'on devra utiliser pour mener à bien l'étude. Si cette analyse est correcte, il est facile de mettre au point un programme d'étude cohérent.

L'étude de chaque problème, doit d'abord être entreprise en mécanicien ; il s'agit en effet de mesurer au moyen d'instruments, sondages et essais, les valeurs des paramètres choisis, puis de les utiliser axiomatiquement ou au moins méthodiquement dans le cadre des règles théoriques plus ou moins normalisées. C'est ensuite en géologue qu'il faut achever cette étude pour critiquer la valeur de chaque résultat théorique par rapport à la réalité, de façon à montrer la relativité de son caractère et fixer le domaine à l'intérieur duquel on pourra le considérer comme valable.

La synthèse doit d'abord être entreprise en mécanicien pour critiquer les uns par rapport aux autres, les résultats obtenus dans un domaine commun, et vérifier la cohérence de l'ensemble des informations concernant le domaine. Le géologue

interviendra ensuite pour établir les relations entre chaque domaine et finalement replacer l'étude et ses résultats dans son cadre naturel.

À tous les niveaux de l'analyse, de l'étude et de la synthèse, le géotechnicien doit intervenir de façon globale pour tenter de faire adapter le projet d'abord et l'ouvrage ensuite, à sa conception du site qui évoluera avec la progression du travail, en fonction des résultats partiels obtenus. Cela l'obligera à un dialogue permanent avec le projeteur puis avec le constructeur.

Les données nécessaires à de telles conditions d'étude sont nombreuses, variées et difficiles à recueillir, à manipuler et à exploiter, même avec un ordinateur. Les résultats que l'on obtient de leur exploitation, même dans le cadre de normes, peuvent n'être que plus ou moins validées à mesure que progresse l'étude : l'expérience d'un géotechnicien compétent peut faire gagner beaucoup de temps et d'argent, notamment quand il est nécessaire de retoucher un projet ou de modifier un ouvrage, c'est-à-dire quand la décision doit être rapide et sûre.

5.2.3.6 Normalisation de l'étude

Diverses instructions ou documents techniques, règles, normes... français et européens, en principe unifiés mais pas toujours cohérents, encadrent strictement la conception et le calcul d'ouvrages ou de parties d'ouvrages, en fait les bases de calcul et de vérification des structures ; cette normalisation imposée à tous les ingénieurs de structure est censée garantir la solidité des ouvrages de BTP et assurer leur sécurité (cf. 2.5.2.1). En s'en inspirant plus ou moins, on a essayé d'en établir pour la géotechnique, mais on s'est régulièrement heurté aux difficultés que je viens d'évoquer : normaliser sinon la géomécanique, du moins certains de ses aspects théoriques, pourquoi pas ! prétendre pouvoir normaliser la géologie et partant l'étude géotechnique est un non-sens.

La normalisation française ne s'y est pas vraiment risquée : il existe près d'une centaine de normes NF de moyens et de processus d'essais de sol, quelques DTU de conception et dimensionnement de parties géotechniques de bâtiment et une norme de classification des missions géotechniques ; aucun de ces documents n'est une norme d'étude : la norme NF P 94-500 est en fait une base de document contractuel commercial et juridique que le géotechnicien annexe à son devis d'étude pour décrire succinctement son intervention en en fixant les limites.

La normalisation européenne est nettement plus ambitieuse sinon audacieuse : les eurocodes structuraux pour la justification d'ouvrages de BTP imposent une méthode dite semi-probabiliste (?) de calcul et vérification des structures s'appuyant sur la théorie des états limites « de service (ELS) » et « ultime (ELU) » ; l'eurocode 7 « Calcul géotechnique » est explicitement attaché à peu près comme une annexe à cette norme générale : il doit être « utilisé conjointement » à elle ; cela laisse entendre que les démarches structure et géotechnique sont identiques, ce qui est loin d'être vrai (cf. 3.1.2.4 et 5.6.3.2).

Sur les douze sections de l'eurocode 7, neuf sont strictement des normes de calcul ; les trois autres pourraient former un embryon de norme d'étude : la première « Généralités » expose un « domaine d'application », des « hypothèses » et fait la « distinction entre les principes et les règles

d'application » ; la troisième « Données géotechniques » concerne les « reconnaissances géotechniques » et le « rapport de reconnaissance des terrains » ; la quatrième « Surveillance de l'exécution des travaux, suivi et entretien » mérite une attention particulière en ce qu'elle laisse entendre que la géotechnique ne saurait être limitée aux études de projets, mais devrait s'étendre à la construction et même à la surveillance de l'ouvrage, ce qui est exact mais rarement mis en pratique.

5.3 Organisation de l'étude

Quelles que soient la nature et les dimensions de l'ouvrage qui en justifie l'entreprise, une étude géotechnique bien conduite est une opération complexe ; il est donc essentiel de l'organiser correctement afin que soient effectivement résolus les problèmes posés par l'adaptation de l'ouvrage projeté au site. Mais en raison de sa complexité, il n'est pas possible de proposer un programme type ; il faut donc l'aborder au cas par cas, selon un schéma général très souple, mais néanmoins organisé ; seules, les principales dispositions peuvent en être énoncées dans un cadre de forme militaire, stratégie et tactique, rappelant que naguère, on désignait une étude géotechnique fondée sur les sondages et les essais par l'expression « campagne de sondages ».

5.3.1 Stratégie de la géotechnique

Aborder l'étude par le site plutôt que par l'ouvrage est le premier principe de la stratégie géotechnique ; c'est d'abord en bâtir le modèle puis étudier les phénomènes dont il est ou sera le siège et enfin définir les conditions dans lesquelles l'ouvrage pourra y être implanté ; il ne s'agit donc pas pour autant de négliger l'ouvrage.

5.3.1.1 Bâtir le modèle géotechnique du site

Pour bâtir le modèle géotechnique du site, on procède d'abord à la reconnaissance géologique du site, documentation, terrain et télédétection, précisée par une campagne géophysique électrique et/ou sismique, étalonnée et complétée par des sondages et des essais.

La reconnaissance générale du site qui est son objet principal, conduit habituellement à le diviser en secteurs relativement homogènes où des problèmes analogues recevront des solutions analogues, à repérer les secteurs et endroits à risques de façon à les éviter ou à les traiter spécifiquement, et à préparer les études détaillées de l'ouvrage.

► Définir les limites du site

On définit d'abord les limites du site ; ses limites immédiates correspondent à peu près à celles de l'emprise de l'ouvrage ; ses limites lointaines sont celles jusqu'où

les phénomènes induits par la construction de l'ouvrage ne devraient plus être sensibles ou mesurables et celles jusqu'où des phénomènes naturels dangereux seraient à redouter. L'expérience du géotechnicien, appuyée sur des observations de géologie, éventuellement précisées par de la géophysique, le permet.

► Définir la structure du site

On définit ensuite la structure du site en caractérisant les secteurs dont les caractères géotechniques sont à peu près constants, où des problèmes analogues recevront des solutions analogues et où il faudra éventuellement éviter ou traiter spécifiquement des risques.

Matériaux et ensembles sont des termes préférables à roches et formations, trop précis du point de vue de la géologie et trop imprécis du point de vue de la géotechnique ; rares sont les formations que l'on peut considérer comme des ensembles homogènes et rares sont les roches dont les caractères géotechniques sont constants : la partie superficielle décomprimée d'une formation rocheuse bien caractérisée des points de vue de la stratigraphie et de la pétrographie, aura sûrement des caractères mécaniques différents de sa partie profonde non décomprimée ; dans chaque partie, qu'il n'aura du reste aucune raison de distinguer, le géologue verra bien la même roche mais le géotechnicien verra lui des matériaux différents constituant des ensembles différents.

Pour achever la définition de la structure du site, on précise enfin les limites des ensembles et on caractérise leurs corrélations en identifiant les surfaces de discontinuité les séparant. En général, ces surfaces sont différentes des surfaces de stratification ou de fracturation de la géologie, tout en ayant souvent des affinités avec elles. La surface qui sépare la partie décomprimée de la partie compacte d'une formation rocheuse, très importante en géotechnique, n'a aucune valeur structurale mais s'individualise bien comme un excellent miroir sismique. Par contre, la surface de contact stratigraphique ou de faille qui sépare une formation marneuse d'une formation calcaire est tout aussi caractéristique du point de vue structural que du point de vue géotechnique.

Ainsi, pour bâtir le modèle géotechnique d'un site, il ne suffit pas d'effectuer un travail de géologue : une carte géologique n'est jamais une carte géotechnique.

► Définir les caractères des géomatériaux

Enfin, on définit les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du géomatériau type de chaque ensemble considéré comme plus ou moins homogène. Par l'exécution de sondages mécaniques, on mesure, soit *in situ*, soit sur échantillons, divers paramètres de ce matériau au moyen d'essais plus ou moins codifiés, notamment en géomécanique. Avant que l'on ait précisé la structure du site, c'est souvent la seule forme d'étude que l'on mette en œuvre ; mais quand on agit ainsi, on commet une erreur fondamentale de méthode, en attribuant un rôle de synthèse à une méthode analytique ; en effet, la variabilité du géomatériau n'est pas aléatoire car il est structuré, bien que sa structure soit souvent trop complexe pour être facilement comprise et schématisée ; les valeurs de n'importe lequel des paramètres qui s'y rapportent, varient d'un point à un autre du sous-sol d'un site, soit de façon quasi continue et dans des limites

assez étroites à l'intérieur d'un même ensemble, soit de façon discontinue et parfois très nettement quand on passe d'un ensemble à un autre. En mesurant la valeur d'un paramètre en un nombre forcément limité de points choisis presque au hasard, il n'est statistiquement pas possible d'en schématiser la répartition avec une précision aussi grande qu'on peut le faire en définissant d'abord la structure du site, reflet fidèle de cette répartition, par la mise en œuvre préalable des techniques de la géologie puis de la géophysique, mieux adaptées que les sondages et les essais à un travail de synthèse.

5.3.1.2 Prévoir l'évolution du site

Quand le modèle géotechnique du site est bâti, on étudie les phénomènes géotechniques qui seront susceptibles de s'y produire durant et après la construction de l'ouvrage. Les théories et les techniques alors employées sont celles de la géodynamique et de l'hydrogéologie pour qualifier ces phénomènes, celles de la géomécanique pour les quantifier.

Il s'agit de prévoir l'évolution du site, ou éventuellement de l'une de ses parties, sous l'action de phénomènes induits ou modifiés par la construction de l'ouvrage : dans une plaine alluviale empruntée par le futur tracé en haut remblai d'une autoroute, après avoir délimité une zone marécageuse puis caractérisé sa structure et les matériaux de son sous-sol, on définit les conditions de stabilité de ce remblai et on calcule l'intensité et la durée des tassements que le sous-sol subira sous sa charge. Dans certains cas, on s'intéresse aussi aux effets éventuels sur l'ouvrage, de certains phénomènes naturels comme les crues, les séismes, les éboulements...

Enfin, si les effets prévus de certains phénomènes naturels ou induits s'avèrent incompatibles avec la sécurité du futur ouvrage, on modifie le projet pour l'adapter au site, ou, ce qui est toujours plus difficile et plus onéreux, on essaie d'adapter le site au projet. Dans l'exemple précédent, si la stabilité du haut remblai n'est pas assurée ou si le tassement est trop important, on essaie d'abord de diminuer la hauteur du remblai en modifiant le profil en long de l'autoroute ; si cela n'est pas possible pour préserver le tirant d'air d'un passage inférieur, on essaie d'améliorer la portance du sous-sol en accélérant la consolidation par surcharge, par drainage par substitution de matériaux, en injectant... Au XIX^e siècle les constructeurs de voies ferrées qui ne disposaient pas de nos puissants moyens, traversaient les marécages en accumulant des matériaux divers, troncs, branchages, fascines, cailloux..., jusqu'à la stabilisation ; ils devaient alors faire preuve de beaucoup de patience. En fait, on faisait cela pour traverser des marécages depuis la nuit des temps ; les Hollandais le font toujours et ont des méthodes spécifiques d'étude et de calcul qui leur permettent d'estimer le volume de ce qui disparaîtra dans le sous-sol avant que la plate-forme soit stable.

5.3.2 Tactique de l'étude géotechnique

Aborder l'étude par le site, c'est en second lieu l'organiser comme toute expérience, dans un cadre défini et selon des règles établies.

5.3.2.1 Du général au particulier

D'abord, on observe et on décrit le géomatériau en faisant progresser l'étude du général au particulier ; on va de la région au site puis à certains détails du site, sans toutefois perdre de vue la région, référence nécessaire pour vérifier la cohérence du modèle du site. S'il s'agit de définir les fondations d'un immeuble dans une vallée alluviale, on peut prévoir la nature et la structure du substratum dans lequel elles seront ancrées, en observant les versants de la vallée ; on peut ensuite avancer un ordre de grandeur de la profondeur du substratum et du sens de sa variation générale, en considérant la position du terrain de construction par rapport au pied du versant et à l'axe de la vallée et en exécutant des travaux de géophysique ; on mesure enfin cette profondeur en effectuant des sondages à l'emplacement du bâtiment ; mais alors, les sondages ne sont pas implantés au hasard, comme on l'aurait fait si l'on avait commencé par eux ; leur nombre peut être réduit et leur mode d'exécution, leur profondeur, la nature, la profondeur et le nombre d'essais *in situ* que l'on y réalise, la profondeur, les dimensions et le nombre des échantillons de laboratoire que l'on y prélève, sont fixés avant d'entreprendre la campagne de sondages. Ainsi, les renseignements recueillis sont aussi complets que possible ; on y gagne beaucoup de temps et d'argent et on laisse le minimum de part au hasard et d'initiative au sondeur qui doit seulement être responsable de la bonne exécution de son propre travail.

Ce schéma d'étude subordonne les techniques utilisées. La démarche géologique fournit le cadre synthétique de l'étude géotechnique en ce qu'elle permet dès l'abord de caractériser le site ; les démarches des autres disciplines sont essentiellement analytiques pour préciser ses caractères et fournir certains éléments de la connaissance générale du site.

Placer le site dans son cadre géologique est donc la première opération fondamentale, rapide et peu onéreuse, d'une étude géotechnique ; elle fournit des indications générales et parfois détaillées des caractères qualitatifs ou semi-quantitatifs du site et permet d'organiser au mieux son étude détaillée.

La deuxième opération, l'étude détaillée du site, elle-même subdivisée éventuellement en études spécifiques de certaines de ses parties, consiste à caractériser les ensembles précédemment identifiés, en précisant leurs limites et en mesurant les paramètres mécaniques et hydrauliques nécessaires à la définition des travaux d'aménagement du site, terrassements, étanchéisation, drainage..., ainsi qu'au choix des procédés de construction et aux calculs d'exécution des ouvrages spéciaux, soutènements, fondations, captages...

Mais les résultats de l'étude détaillée ne sont que les éléments de la solution du problème d'ensemble, prévoir le comportement général de l'ensemble site/ouvrage. Issus de calculs fondés sur des théories dont l'utilisation implique que l'on admette la légitimité d'un certain nombre de postulats ayant pour objet de schématiser le matériau terrestre, ces résultats sont entachés d'erreurs systématiques dont l'appréciation ne peut se faire qu'en comparant le matériau réel au milieu idéal, par référence au cadre géologique.

Du point de vue méthodologique, l'organisation d'une étude géotechnique impose donc de considérer les disciplines annexes comme des outils d'analyse

au service de la géologie de synthèse ; leur utilisation ne doit pas être une fin mais un moyen parmi d'autres. Les unes et les autres sont extrêmement nombreuses et variées ; la mise en œuvre de certaines d'entre elles n'est profitable qu'autant qu'on les a judicieusement choisies, correctement utilisées et que les résultats obtenus ont été complètement exploités, correctement interprétés et sévèrement critiqués tant du point de vue du site que de celui de l'ouvrage.

L'imprécision fondamentale des résultats d'une étude géotechnique ne doit pas être perdue de vue et être appréciée par référence au cadre géologique du site.

5.3.2.2 Par étapes (par rapport à l'ouvrage)

Aborder une étude géotechnique par le site n'implique pas qu'elle soit uniquement organisée par rapport à lui ; on procède aussi par étapes, selon l'évolution technique du projet qui part d'un schéma de principe pour aboutir aux plans d'exécution. Il est vain d'entreprendre l'étude détaillée du site d'un futur ensemble immobilier dont le plan de masse n'est pas encore définitivement arrêté ; une étude plus légère et donc plus rapide et moins onéreuse, mettant surtout en œuvre les méthodes de la géologie et de la géophysique, éventuellement complétées par l'exécution de quelques sondages rapides et de quelques essais d'identification, est toujours préférable à ce niveau.

Les étapes de l'étude géotechnique d'une autoroute sont assez bien définies pour que l'on puisse donner au schéma de ce type d'étude, une valeur d'exemple général.

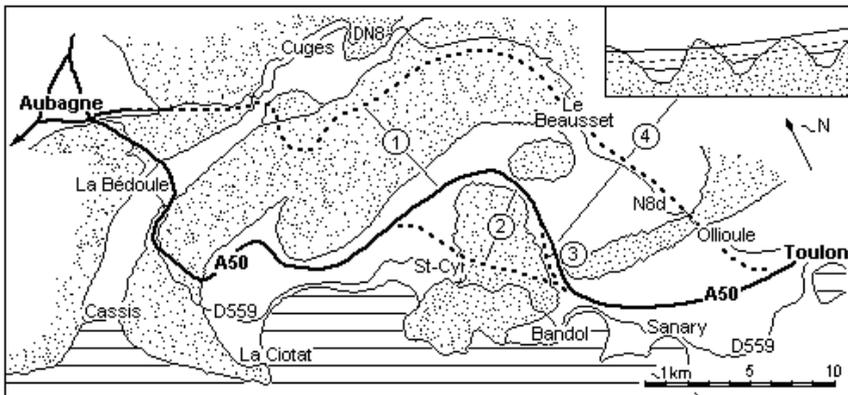


Figure 5.3.2.2 – Étude du tracé de l'autoroute A50

La première étape est l'étude de choix de parti qui se traite habituellement à 1/50 000. Il s'agit de présenter les grandes lignes géotechniques d'un projet esquissé en tenant seulement compte d'options possibles au niveau de l'aménagement du territoire, comme pour dire si le tracé de l'autoroute A50 Marseille/Toulon doit longer la côte comme la D559 ou passer par l'intérieur comme la

DN 8-N8d (1). Ce n'est évidemment pas seulement pour des raisons géotechniques qu'a été choisi le tracé par la côte ; mais la géotechnique est intervenue pour caractériser sommairement chaque tracé et montrer que l'adoption de ce dernier n'entraînerait pas des difficultés d'exécution insurmontables.

La deuxième étape est l'étude de choix du tracé ; elle se traite à 1/20 000. On demande alors à la géotechnique de dire si le tracé retenu est raisonnablement réalisable et, dans le cas où certaines portions du tracé permettraient d'envisager des variantes, de dire laquelle sera la plus facile à réaliser. Pour l'autoroute A50, entre Saint-Cyr et Bandol (2), on pouvait envisager soit un tracé direct, à travers les collines côtières, ce qui imposait de prévoir une série de grands terrassements dans des sites susceptibles de devenir instables, soit un tracé plus long, en empruntant la cluse d'un petit torrent côtier où les terrassements étaient beaucoup plus limités ; le choix de ce deuxième tracé a en grande partie été orienté par des considérations géotechniques.

Le principe de ce tracé étant admis, lors de la phase d'APS qui se traite à 1/5 000, il fallait décider si l'on suivrait le versant droit ou le versant gauche de la cluse (3). C'est encore à la géotechnique que l'on a demandé de fournir une partie des éléments de ce choix.

Au niveau de l'APD qui se traite à 1/2 000 ou à 1/1 000, le tracé en plan est fixé et l'adaptation du projet au sol ne peut plus être réalisée qu'en faisant varier légèrement le profil en long de l'autoroute. C'est ainsi que, sur le versant gauche de la cluse qui avait été choisi, on disposait de deux solutions, l'une en profil bas, avec de grands déblais et de petits remblais et l'autre en profil haut, avec de petits déblais et de hauts remblais (4). C'est évidemment la géotechnique qui a permis de fonder le choix de la solution haute car le versant était constitué de marnes et d'éboulis compacts, susceptibles de supporter de hauts remblais sans rupture et sans tassement, alors qu'ils auraient été instables s'ils avaient été terrassés en hauts déblais. à l'exploitation, quelques spectaculaires accidents de trop hauts déblais inévitables, ont montré que cette option était la bonne.

Enfin, la dernière étape est celle du projet d'exécution qui se traite à 1/500 ou à 1/200. Il s'agit entre autres de définir les fondations des ouvrages d'art dont les types avaient été arrêtés lors de l'APD. Pour les passages inférieurs, on avait alors à choisir entre un portique ou un cadre, selon que le site de chacun présentait un sous-sol résistant ou non, puis préciser le niveau des fondations, la pression admissible et les tassements.

5.3.2.3 Par phases (par rapport au site)

Chaque étape de l'étude définie par rapport au projet, peut elle-même se subdiviser en trois phases définies par rapport au site. La première est celle de l'analyse du site et des phénomènes susceptibles de l'affecter, c'est-à-dire celle du recueil objectif de renseignements géotechniques ; la seconde est celle de la synthèse, c'est-à-dire de la construction du modèle géotechnique du site ; au cours de la troisième, on essaie de résoudre les problèmes spécifiques que pose la construction du projet dans le site.

► Analyse

L'analyse du site et des phénomènes correspond à la phase documentaire de chaque étape de l'étude ; on recueille les renseignements géotechniques dont on a besoin pour poursuivre l'étude. Schématiquement, les techniques de la géologie, essentiellement fondées sur l'observation, fournissent des renseignements qualitatifs d'ordre général ; ceux de la géophysique, fondées sur la mesure mais aussi sur l'observation pour interpréter ces mesures, fournissent des renseignements semi-quantitatifs d'ordre plus particulier ; les techniques de la géomécanique, pour l'essentiel sondages mécaniques et essais de chantier ou de laboratoire, fournissent des renseignements quantitatifs spécifiques. On passe ainsi progressivement de l'observation à la mesure et de l'analogie à la déduction ; l'analyse devient de plus en plus abstraite. C'est certainement un progrès épistémologique, mais ce n'est pas toujours un avantage pratique : pour distinguer la couverture du substratum, il est plus simple de regarder les carottes ou même les *cutting* de sondage que de mesurer systématiquement et sans autre préoccupation, le module pressiométrique à mesure de l'avancement du sondage, ou bien la résistance à la compression de tous les échantillons recueillis (*Fig. 5.2.3*).

Définir les ensembles

On commence l'analyse du site en y caractérisant des ensembles quasi homogènes ; c'est un travail de géologue. Pour ce faire, on place le site dans son cadre, en observant ses environs afin de supputer ce que l'on peut y trouver. L'observation des versants d'une vallée renseigne toujours sur la nature et la profondeur locale de son substratum et sur leur stabilité.

Plus généralement on peut tirer des renseignements géotechniques, évidemment très généraux, en considérant le cadre d'un site à l'échelle régionale.

Ainsi, l'autoroute A 36 Beaune/Mulhouse traverse diverses régions dont les caractères géologiques sont nettement différents ; aux deux extrémités de cet ouvrage, la plaine de Bourgogne au SW et le Sundgau au NE ont des sous-sols assez homogènes, constitués d'une couche superficielle de limon quaternaire d'épaisseur relativement régulière, couvrant uniformément un substratum argilo-sableux tertiaire. Dans la partie centrale de l'ouvrage, le sous-sol du Jura est beaucoup plus hétérogène, soit de limon de plateau plus ou moins épais ou d'éboulis couvrant irrégulièrement des formations calcaires plus ou moins karstiques, soit de formations marneuses plus ou moins argileuses, généralement couvertes de produits d'altération très argileux.

À chaque région, correspond donc un type de sous-sol présentant des caractères morphologiques, hydrologiques et géotechniques définis et assez constants que l'on n'aura qu'à préciser lors des étapes successives de l'étude du projet. Sur de telles bases, on peut prévoir les types de problèmes géotechniques à résoudre, tout à fait différents suivant que l'on considère la section Montbéliard/Clerval entièrement située sur les plateaux calcaires qui dominent la rive gauche du Doubs ou la section Beaune/Dôle, située dans la plaine argileuse de Bourgogne, entre le Doubs, la Saône et la Côte d'Or.

Cette approche de l'étude permet d'obtenir très rapidement et à peu de frais, une masse importante de renseignements géotechniques toujours intéressants, souvent essentiels et parfois très précis. Elle est fondée d'abord sur la réunion d'une documentation aussi complète que possible sur la géologie régionale (mémoires, cartes géologiques, avis de géologues locaux...) et sur des projets analogues à celui que l'on étudie, réalisés dans la région, avis d'ingénieurs de l'Équipement, de l'Agriculture, architectes, entrepreneurs..., puis sur de rapides excursions, tant pour acquérir une expérience concrète du terrain que pour visiter des ouvrages intéressants ; une étude générale de photographies aériennes en vision stéréoscopique (télé-détection) permet enfin de compléter et de synthétiser ces renseignements sous la forme d'une carte géotechnique schématique à petite échelle.

On peut alors entreprendre l'étude détaillée du site et de ses environs immédiats à l'échelle correspondant à celle de l'étude technique du projet. à un premier niveau encore qualitatif, il s'agit d'établir une carte géologique détaillée, après avoir défini les formations que l'on rencontre dans le site et analysé leurs contacts et leurs relations ; les techniques classiques de la géologie de terrain et de la photo-interprétation sont en principe les seules sollicitées, mais une carte ainsi établie présente de nombreuses lacunes concernant par exemple l'épaisseur de la couverture, la nature du substratum, la position des contacts cachés... à un deuxième niveau, on précise donc cette géologie détaillée en procédant à une analyse fine, semi-quantitative de la structure du site ; des compléments de géologie de terrain et la mise en œuvre de la géophysique, caractérisent cette nouvelle phase.

Si la mise en œuvre de ces techniques permet de compléter et de préciser les renseignements obtenus lors des phases précédentes, on n'obtient pas ainsi des renseignements originaux. La géophysique complète la géologie, elle ne la remplace pas ; ce serait une erreur méthodologique d'effectuer des travaux de géophysique dans un site dont on n'aurait pas étudié auparavant la structure géologique de façon détaillée : une zone de faible résistivité électrique dans une formation calcaire peut correspondre entre autres, soit à une zone très karstique (Urgonien de Provence), soit à une passée marneuse (Kimméridgien du Jura), soit à un épaissement local de la couverture argileuse (Crétacé du Bassin parisien) ; l'exploitation des résultats de mesures électriques ne permet pas de préciser à laquelle de ces anomalies on a affaire ; et du reste même, l'éventualité d'existence de l'une d'elles dans un site donné, ainsi que sa position et son extension approximatives, doivent être définies par d'autres méthodes comme la géologie de terrain et la télé-détection.

Les techniques géophysiques les plus efficaces en géotechnique sont, sur le terrain, les méthodes électriques (traîné et sondage) et la sismique-réfraction, et dans les sondages mécaniques, les diagraphies de résistivité, de polarisation spontanée et de radioactivité naturelle ; des techniques moins courantes comme la gravimétrie, la magnétométrie, l'induction, la tomographie sismique..., peuvent les compléter dans des cas très spécifiques, ou plus rarement quand les premières se sont révélées inefficaces ; la gravimétrie ne permet pas de découvrir mais de repérer certains vides artificiels (carrières, galeries...) à condition que le rapport de leur défaut de masse à leur profondeur soit relati-

vement grand. Mais la structure d'une zone karstique est plus facile à préciser par l'électrique ; dans de telles zones, les variations de résistivité dues à la plus ou moins grande proportion locale d'argile karstique, sont toujours plus caractéristiques que les variations de la pesanteur dues à la présence de vides karstiques ; dans un karst, il y a beaucoup plus de fissures argileuses que de vides.

Pour préciser localement certains renseignements structuraux comme la nature et la profondeur d'un substratum, cette analyse de la structure détaillée du site peut être poursuivie par l'exécution de quelques sondages-étalons, implantés en des points structurellement intéressants, sans trop tenir compte de la position relative de l'ouvrage.

Ayant ainsi défini la structure géologique du site, on en établit le modèle géométrique schématisé par une carte et des profils sur lesquels figurent les limites de chaque ensemble (Fig. 4.5.2.1).

Mesurer les paramètres

Pour achever l'étude objective du site et en établir le modèle géotechnique, on mesure les paramètres physico-chimiques, mécaniques et hydrauliques qui caractérisent le matériau de chaque ensemble. Selon le type de projet que l'on étudie, on choisit évidemment de mesurer les paramètres les plus intéressants pour l'étude technique, comme la granulométrie et la perméabilité quand il s'agit d'implanter un forage d'exploitation d'eau souterraine. Les outils de cette phase d'étude sont accessoirement certaines techniques géophysiques ; la sismique permet en effet d'apprécier le coefficient d'élasticité d'un ensemble et il est possible d'apprécier la teneur en eau et la densité d'une roche par des mesures de radioactivité induite. Mais plus généralement, cette phase est celle de la mise en œuvre des sondages et des essais.

Les sondages carottés permettent de recueillir des échantillons remaniés ou non, selon la technique de leur exécution et, sur ces échantillons, il est possible d'effectuer, du moins théoriquement, un grand nombre d'essais au laboratoire (Fig. 5.7.4.2). Au cours de ces mêmes sondages, ainsi qu'au cours de sondages destructifs, on peut réaliser des essais *in situ*, généralement limités à des essais mécaniques (pénétrömètre, scissomètre, dilatomètre...) ou hydrauliques (perméabilité), mais aussi géophysiques (sismique, radioactivité naturelle ou induite, résistivité, polarisation spontanée...) (Fig. 5.7.3.1).

► **Synthèse**

La phase d'analyse du site achevée, on passe à celle de synthèse, au cours de laquelle, au moyen de tous les documents précédemment recueillis, on construit le modèle géotechnique du site, traduit en cartes et profils dressés et présentés à une échelle adaptée à l'étape de l'étude technique du projet. Sur ces documents, les limites des ensembles apparaissent et les valeurs moyennes et extrêmes des paramètres mesurés pour caractériser le matériau de chaque ensemble, sont indiquées. On y attire l'attention sur le ou les paramètres utiles à l'étude du projet.

Ces documents sont spécifiquement géotechniques ; ce ne sont pas des cartes et des coupes géologiques complétées par quelques indications géotechniques, mais d'autres choses ; ils décrivent le site, non dans un but scientifique mais dans un but pratique ; ils doivent donc être immédiatement et parfaitement lisibles, même pour un utilisateur qui ne serait pas géotechnicien, puisque ces documents concrétisent pour lui l'aide qu'il attend de la géotechnique.

Le même site, étudié pour des projets d'ouvrages de types différents, a presque à coup sûr, un modèle différent pour chaque ouvrage : une plaine alluviale peut être étudiée soit pour y exploiter de l'eau souterraine et l'on s'intéresse plus particulièrement à la perméabilité du matériau alluvial, soit pour y creuser un canal et il faut de plus mettre en évidence la façon dont ce matériau peut être terrassé, soit pour y construire un haut remblai et on doit en premier lieu y repérer les zones de matériau compressible, soit enfin pour y fonder un ouvrage d'art et on s'assure aussi de la nature, de la profondeur et des caractéristiques mécaniques de son substratum.

Il est rare qu'une formation, au sens géologique du terme, soit un ensemble homogène au sens géotechnique : rien n'empêche donc que sur ces documents, une même formation y soit représentée comme plusieurs ensembles et que certaines parties de deux formations voisines soient représentées comme un même ensemble. Ainsi, pour résoudre un problème de terrassement ou de fondation, on établit un modèle sur lequel on distingue la couverture du substratum, sans distinguer les formations qui le composent mais en distinguant les zones plus ou moins compressibles de la couverture ou bien la partie non altérée de la partie altérée du substratum.

► Manipulations mathématiques des modèles

Malgré la multiplicité et la variété des ouvrages qui les posent, les problèmes que la géomécanique aborde habituellement, se réduisent à trois groupes principaux ; ils reçoivent des solutions types découlant de quelques théories et méthodes de bases qu'au fil des ans, des besoins, des techniques et des modes, on s'est plu à orner de façon plus ou moins baroque jusqu'à rendre certains méconnaissables.

La loi de Coulomb, la théorie de Rankine, la méthode de Fellenius ou du cercle de frottement... relatives à la rupture par cisaillement ou si l'on préfère, à l'équilibre des massifs, concernent la stabilité des talus, des fouilles, des remblais, des écrans, murs de soutènement, palplanches, parois diverses... (Fig. 2.1.1.2.2 a). S'il y a une charge en tête, il faut en plus un zeste de méthode de Boussinesq et s'il s'agit d'une digue ou d'un barrage, un peu de loi de Darcy.

La stabilité des fondations, tant superficielles que profondes, se traite comme un équilibre de massif, par Coulomb et Rankine et, à partir de c et j , la contrainte admissible s'obtient par la formule de Terzaghi ou de l'une de ses paraphrases (Fig. 2.1.1.2.2 b). Le tassement des ouvrages se calcule à partir des résultats de l'œdomètre, au moyen d'une autre formule de Terzaghi et de la méthode de Boussinesq adaptée par Newmark ou par celle de Westergaard (Fig. 2.1.1.2.2 b'). Avec la pression limite et le module obtenus au moyen du pressiomètre, on

calcule la contrainte admissible et le tassement au moyen des formules de Ménard.

La loi de Darcy, les méthodes de Dupuit pour le régime permanent et de Theis pour le régime transitoire permettent d'aborder la plupart des problèmes hydrauliques (Fig. 2.1.1.2.2 c).

5.3.3 Les règles générales d'une conduite

On ne réalise jamais une étude géotechnique parfaite ; la méthode esquissée est donc bien théorique et difficile à suivre fidèlement ; on peut au moins la soumettre à quelques règles de bon sens ; quoi que l'on puisse en penser, elles ont une valeur méthodologique certaine en ce que pour être efficace, le programme d'étude doit leur être soumis.

5.3.3.1 Ordre et continuité

Une étude géotechnique efficace, se réalise avec ordre et continuité, sans hâte excessive. Son but est de fournir des renseignements utiles à une étude technique ; chacune de ses phases précède l'étape technique correspondante ; elle ne la dépasse pas. Afin de ne pas perdre de temps, d'informations et de résultats, le même géotechnicien assure successivement la réalisation de chaque phase de l'étude, à chaque étape du projet.

5.3.3.2 Faire assez mais pas trop

Il est tentant de prolonger chaque phase de l'étude, en s'intéressant à des détails dont l'examen ne sera justifié que par la suite ou ne le sera pas.

À chaque phase, il est préférable, de faire le nécessaire sans aller au-delà ; mais faire plus n'entraîne pas savoir davantage. Après avoir amassé des renseignements, il faut avoir le temps de les exploiter et souvent même apprendre à le faire quand le problème posé est nouveau. La passion des mesures accumulées est disproportionnée avec la capacité de les utiliser judicieusement ; l'analyse considérée comme une fin, fait oublier la synthèse, dont elle n'est que le moyen. De plus, le projet technique peut largement varier au cours de son étude, ce qui peut déprécier une plus ou moins grande partie de renseignements surabondants, recueillis trop hâtivement.

Comme une étude géotechnique est de plus en plus longue, complexe et onéreuse en devenant plus détaillée, il est inutile de l'aborder par son ultime phase, la collecte du renseignement quantitatif localisé sur lequel sont fondés des calculs spécifiques aussi savants que suspects si leur cadre n'est pas préalablement défini. Mais le coût d'une étude géotechnique est marginal dans le budget général d'un projet ; sans grand effort intellectuel, on peut ainsi multiplier les sondages mécaniques et les essais *in situ* ou de laboratoire, ce qui permet de constituer un volumineux dossier de résultats bruts qui ne présentent jamais un grand intérêt pratique immédiat. Pour peu que la structure du site soit

complexe ou le problème difficile, on s'y noiera dans des détails sans intérêt ou bien on y puisera de faux arguments pour étayer des convictions erronées ; on y trouvera certains renseignements surabondants ou sans intérêt et n'y trouvera pas certains autres, indispensables.

5.3.3.3 Un risque calculé

Même en organisant une étude de la meilleure façon possible, on ne peut jamais résoudre complètement et de façon définitive, un problème géotechnique, soit pour des raisons de temps ou de budget, soit par essence même du problème. Le faire équivaut à affirmer que la solution proposée est sûrement la meilleure, à la fois la plus élégante, la plus sûre, la plus efficace et la moins onéreuse. Qui peut avoir cette prétention, quand on sait combien les projets évoluent à mesure qu'on les étudie et qu'on les réalise, comment évoluent la technique de la construction et les conditions économiques de l'exécution ? La vérité d'aujourd'hui n'est plus celle d'hier et n'est pas celle de demain.

On doit en fait, se contenter d'approcher la solution qui subjectivement paraît la plus raisonnable, en ayant bien conscience des limites de la géotechnique et du fait que quoi que l'on fasse, la qualité de l'étude sera imparfaite. La géotechnique est l'art de se contenter de ce que l'on a et de faire ce que l'on peut en choisissant entre des inconvénients. Cela n'est évidemment pas très exaltant ; Terzaghi a très bien exprimé ce sentiment désabusé en écrivant qu'il n'y avait pas de gloire à attendre de l'étude des fondations. Et même, compte tenu des lourdes responsabilités que prend tout géotechnicien dans l'exercice de son métier, il devrait y en avoir plus en prison que sur un piédestal.

À chaque étape de l'étude, on peut donc, soit proposer une solution unique en prenant un risque calculé, soit plusieurs solutions de principe, à peu près équivalentes sur le plan pratique. La réduction du risque ou le choix de la solution interviendront à l'étape suivante. Mais quoi que l'on fasse, le risque ne sera jamais nul et le choix sera toujours en partie subjectif. La tolérance est ainsi une concession à l'incapacité d'atteindre la perfection qui n'est certainement pas du monde géotechnique.

5.3.3.4 S'arrêter à temps

Les résultats obtenus lors des premières phases d'une étude géotechnique sont nombreux et intéressants. Ils le sont de moins en moins ensuite, car un grand nombre de ceux que l'on obtient par d'autres techniques font double emploi avec ceux que l'on connaît déjà. Dans certains cas, ils permettent de les préciser ou de les contrôler, ce qui est loin d'être négligeable. L'intérêt d'une étude géotechnique devient de plus en plus discutable à mesure qu'elle se précise et le rapport précision/coût ou intérêt pratique, tend très vite vers une valeur asymptotique. Il est donc souhaitable de contrôler constamment son déroulement, de façon à pouvoir l'arrêter à temps, à l'optimum de son intérêt. Ainsi, le maître d'ouvrage ne sera pas tenté de la considérer comme une stérile obligation technique ou morale et appréciera tout le bien fondé de la démarche qui l'a conduit à en faire entreprendre une.

5.4 Déroulement de l'étude

Il est impossible d'imaginer d'emblée tout ce qu'il faudra faire dans le détail pour réaliser une étude géotechnique satisfaisante. Le site, pratiquement inconnu au début, est de mieux en mieux connu à mesure que progresse l'étude et certains problèmes d'abord envisagés, se résolvent beaucoup plus facilement que prévu, alors que d'autres plus difficiles à résoudre, ne se révèlent qu'en cours d'étude : l'étude géotechnique est une opération complexe dont dépend en grande partie la qualité de l'ouvrage ; son organisation correcte impose donc que le géotechnicien expérimenté qui en est chargé la conduise par étapes, parallèlement à celles de l'étude du projet et de construction de l'ouvrage, de façon de plus en plus détaillée de l'esquisse à l'exécution, en relation permanente avec les constructeurs.

5.4.1 Rôle du géotechnicien

Le maître d'œuvre réalise l'étude de son projet et dirige la construction de l'ouvrage. Il n'est évidemment pas au courant de toutes les techniques de la géotechnique et aucune n'est universelle ; il doit donc être assisté d'un géotechnicien expérimenté pour choisir, mettre en œuvre et exploiter celles qui lui fourniront à meilleur compte, les renseignements dont il a besoin. Le géotechnicien est un de ses collaborateurs, même s'il n'en est pas le subordonné ; son rôle est plus ou moins important selon l'étape de l'étude du projet ou de construction de l'ouvrage mais il doit intervenir au cours de chacune.

C'est évidemment au géotechnicien d'établir et de chiffrer le programme complet de chaque étape de l'étude géotechnique, prestations intellectuelles, travaux de terrain et de laboratoire ; il doit désigner clairement l'étape de sa proposition, décrire cette étape en précisant sa définition, les documents qu'il établira, les renseignements et les résultats dont disposeront les autres intervenants pour étudier et construire l'ouvrage, et les techniques qu'il mettra en œuvre (cf. 5.4.2) ; le but avant les techniques, car les autres intervenants ne s'intéressent généralement qu'à la série de prix et au montant total de son devis essentiellement consacré aux sondages et essais, sans trop se préoccuper de ce qu'ils recevront pour un montant aussi bas que possible.

5.4.1.1 Spécialisation

Le spécialiste d'une technique, qu'il soit géologue, géophysicien, géomécanicien, hydrogéologue, sondeur ou laborantin, entrepreneur de fondations et travaux spéciaux, a généralement une compétence limitée et peut rarement apprécier l'ensemble des problèmes posés ; il est tenté de n'utiliser que la technique de sa spécialité, ce qui peut être une source d'erreurs ou d'imprécisions : quelle que soit son expérience, un géologue ne peut interpréter que ce qu'il voit ; un géophysicien qui effectue sa campagne sans connaître le cadre géologique déterminé avant son intervention et les résultats des sondages qui seront exécutés après, aura tendance à interpréter ses résultats comme s'ils

étaient objectifs, suggérant ainsi qu'ils pourraient être suffisants ; il en va de même du géomécancien qui résout mathématiquement les problèmes géotechniques, en confondant ainsi sa spécialité avec la géotechnique dont elle n'est que l'une des techniques ; un hydrogéologue n'est compétent qu'en matière d'eaux souterraines ; les sondeurs et les laborantins sont des exécutants de travaux au service du géotechnicien, pas des géotechniciens.

5.4.1.2 Connaissance du projet et analyse du site

Le géotechnicien chargé de l'étude doit bien connaître le projet et apprécier ses possibilités de variantes, c'est-à-dire en fait, comprendre les préoccupations et la latitude de jeu du maître d'œuvre. Il doit analyser rapidement le site et en souligner les avantages et les inconvénients éventuels. à ce niveau d'intervention, il peut être amené à favoriser une variante ou dévaloriser un projet, mais il n'est pas toujours suivi par les autres intervenants pour lesquels la géotechnique n'est qu'un élément de choix et de décision parmi d'autres (cf. 1.1.3).

5.4.1.3 Proposition et réalisation d'un programme d'étude

Connaissant le projet et le site, le géotechnicien peut informer le maître d'œuvre de la valeur et des limites de chaque technique susceptible d'être mise en œuvre pour réaliser l'étude géotechnique du projet. Il élabore un programme général d'étude, en estime le budget et apprécie la durée d'exécution ; pour cela, il doit choisir les techniques les mieux adaptées au site et au projet, les mettre en œuvre lui-même ou bien en contrôler la mise en œuvre confiée à des spécialistes qui seront incompétents en dehors de leur propre spécialité.

5.4.1.4 En tirer des renseignements pratiques

Quand les diverses opérations d'étude sont achevées, le géotechnicien doit analyser les renseignements obtenus, définir leur précision par rapport aux impératifs techniques et aux tolérances du projet, et en tirer les renseignements pratiques dont le maître d'œuvre et l'entrepreneur ont besoin pour mener à bien leurs tâches respectives.

Il doit enfin bien connaître les techniques et les préoccupations de l'entreprise pour être capable d'intervenir sur le chantier en cas d'imprévu et contribuer à la mise au point de solutions de remplacement.

5.4.2 Les étapes

Pour les ouvrages publics, mais rien n'empêchait de les utiliser pour n'importe quel ouvrage, les étapes d'études du BTP étaient définies par les annexes du décret du 2/2/73, relatif aux *Conditions de rémunération des missions d'ingénierie et d'architecture remplies pour le compte des collectivités*

publiques par les prestataires de droit privé. Les éléments de missions normalisées concernant plus particulièrement la géotechnique étaient :

Étape 0 : *Conception primaire* – Avant projet sommaire (APS)

Étape 1 : *Conception secondaire* – Avant projet détaillé (APD)

Étape 2 : *Conception tertiaire* – Spécifications techniques détaillées (STD)

Étape 3 : *Choix des entrepreneurs* – Dossier de consultation des entreprises (DCE)

Étape 4 : *Contrôle des entrepreneurs* – Contrôle général des travaux (CGT)
– Réception des travaux (RDT)

La forme de cette nomenclature, appellations, définitions et limites de chaque étape, a été ensuite plusieurs fois modifiée sans trop en changer le fond :

Selon la loi MOP du 13/07/85 et le décret « Missions » du 01/12/93 se succèdent ainsi les étapes d'« Esquisse » (début d'APS ?), d'« Avant projet » (fin d'APS, APD, début de STD ?), d'« Assistance au maître d'ouvrage... » (DCE ?), d'« Ordonnancement, Pilotage, Coordination » (CGT, RDT ?).

La norme NF P 94-500 relative à la « Classification des missions géotechniques types » définit six missions : une mission de travaux de sondages et d'essais G0, quatre étapes d'étude proprement dite G1 « Préliminaire – Avant projet » (APS, APD ?), G2 « Projet » (STD ?), G3 « Exécution » (STD, CGT ?), G4 « Suivi » (CGT, RDT ?) et une mission d'expertise G5.

Dans d'autres nomenclatures, on trouve aussi : « études préliminaires », « études préalables », « étude de la solution retenue », « étude du projet »...

La loi et la norme ne sont pas cohérentes, ce qui pose des problèmes d'application. Ainsi, malgré l'obligation formelle qui les impose en principe, il est préférable de s'en tenir à la nomenclature du décret du 2/2/73 plus claire, plus pratique et passée dans le langage courant du BTP pour présenter étape par étape, la démarche générale de l'étude géotechnique d'un grand aménagement ; celle de l'étude géotechnique d'un ouvrage isolé peut être simplifiée, mais il est nécessaire de respecter le cheminement par étapes successives en allégeant éventuellement les moyens de chacune : limiter une telle étude au niveau des STD n'exclut pas qu'il faille définir et caractériser le site pour que l'ouvrage lui soit correctement adapté ; un APS et un APD sommaires sont donc toujours indiqués.

Si l'ouvrage est l'élément d'un aménagement de zone ou de tracé dont on a réalisé l'étude générale sérieusement, il est possible de commencer son étude géotechnique à l'étape de l'APD ou même des STD, car son site est déjà caractérisé. S'il s'agit d'un ouvrage isolé ou si l'étude générale a été plus ou moins négligée, que son implantation et son emprise soient ou non arrêtées, il est nécessaire de commencer à l'APS ou même à la faisabilité pour caractériser son site et ainsi donner un cadre général à l'étude.

5.4.2.1 Avant projet sommaire (APS)

Loi MOP : parties d'« Esquisse » et d'« Avant-projet sommaire » ;

Norme NF P 94-500 : parties de G1 « Préliminaire – Avant-projet ».

* **Définition** : étude générale du site et de ses abords pour en définir les caractères géotechniques principaux et esquisser les grandes lignes de l'adaptation du projet au site.

* **Documents établis** : schéma structural – plans et coupes géotechniques schématiques à petite échelle (carte IGN, plan cadastral...) – commentaires généraux sur l'aptitude du site à recevoir les aménagements projetés et définition des principes généraux d'adaptation.

* **Résultats** : le maître d'œuvre peut s'appuyer sur ces documents pour entreprendre l'étude du plan de masse du projet et établir un coût d'objectif provisoire de son adaptation au sol.

* **Techniques** : géologie à petite échelle (1/20 000 à 1/5 000) – photographies aériennes – géophysique et sondages rapides.

Le rôle du géotechnicien est particulièrement important au début de l'étude du projet, quand l'ouvrage n'est défini que dans ses grandes lignes et quand les possibilités de variantes sont nombreuses ; très souvent le choix de la variante repose essentiellement sur lui. Paradoxalement, les renseignements dont il dispose à ce niveau, sont très fragmentaires et peu précis ; c'est principalement son expérience et son imagination qui sont alors mises à contribution. Même quand elles sont commandées à une étape ultérieure de l'étude technique du projet, la plupart des études géotechniques d'ouvrages courants ou de bâtiment, correspondent à cette étape, eu égard aux moyens limités que l'on accorde généralement à la géotechnique.

5.4.2.2 Avant projet détaillé (APD)

Loi MOP : parties d'« Avant-projet-sommaire » et d'« Avant-projet-définitif » ;

Norme NF P 94-500 : partie de G1 « Préliminaire – Avant-projet ».

* **Définition** : étude détaillée du site, permettant d'y limiter et d'y caractériser géotechniquement les zones dans lesquelles les méthodes de terrassements et les modes de fondations seront analogues.

* **Documents établis** : plans et coupes géotechniques à grande échelle, sur fond de plan de géomètre – présentation par zone, des méthodes d'exécution des terrassements, des types de fondations envisageables...

* **Résultats** : en utilisant ces documents, les implantations des ouvrages, les niveaux des plates-formes des terrassements généraux, les niveaux des sous-sols éventuels, les types, niveaux et contraintes admissibles des fondations ainsi que les caractéristiques générales de toutes les parties d'ouvrage en relation avec le sous-sol, peuvent être définis par le maître d'œuvre, pour adapter au mieux son projet aux particularités du site, et pour préciser le coût d'objectif de son adaptation au sol.

* **Techniques** : géologie à grande échelle (1/1 000 à 1/200) – photographies aériennes – géophysique – sondages et essais d'étalonnage.

Quand le projet est arrêté dans ses grandes lignes et son site définitivement retenu, le géotechnicien devrait organiser l'étude pour qu'elle soit rapide, économique et complète ; ainsi le maître d'œuvre recevrait sous une forme directement utilisable, les renseignements dont il a besoin pour préciser le coût de son projet, pour préparer les dossiers d'appels d'offres et établir le programme d'exécution de l'ouvrage. à ce niveau, des variantes ou des impréci-

sions mineures sont encore tolérables comme celles qui concernent le détail de ses fondations, mais dans ce cas, les critères ayant permis de définir son implantation et son type ne devront pas être remis en question.

5.4.2.3 Spécifications techniques détaillées (STD)

Loi MOP : parties d'« Avant-projet définitif » et d'« étude de projet » ;

Norme NF P 94-500 : G2 « Projet » et parties de G3 « Exécution ».

* **Définition** : étude détaillée du sous-sol dans l'emprise de chaque ouvrage, permettant de définir, à la précision demandée par le maître d'œuvre :

- *Déblais* : nature des matériaux à terrasser – méthodes d'extraction – possibilité de réutiliser les matériaux en remblais – pente des talus provisoires – principes de stabilisation des talus définitifs – éventuellement, principes d'épuisement de l'eau souterraine, de soutènement/blindage des parois, de protection des sous-sols contre les eaux...
- *Remblais* : stabilité et préparation des assises – caractéristiques et mise en œuvre des matériaux – pente des talus – protection, drainage...
- *Fondations* : type – profondeur d'ancrage – contrainte admissible – ordre de grandeur des tassements absolus et différentiels, mode d'exécution...
- *Chaussées, aires et dallages* : épaisseur du décapage – portance – stabilisation – structure...
- *Ouvrages et procédés spéciaux, éventuellement* : caractéristiques et mode d'exécution.

* **Documents établis** : plans, coupes et commentaires géotechniques concernant chaque partie d'ouvrage en relation avec le sous-sol.

* **Résultats** : le maître d'œuvre dispose des éléments géotechniques lui permettant de prédimensionner les parties d'ouvrages en relation avec le sous-sol, de préparer les plans d'exécution et le descriptif.

* **Techniques** : géologie à grande échelle (1/500 à 1/100) – photographies aériennes – géophysique – sondages mécaniques – essais *in situ* et/ou de laboratoire.

Quand le projet d'exécution est au point, toutes les données techniques sont en principe fixées ; si l'étude géotechnique a débuté avant cette mise au point, certaines de ces données peuvent être en partie issues de considérations géotechniques générales qu'il faudra ensuite préciser. Mais c'est souvent au moment de passer à l'exécution que l'on se rend compte de l'absence ou de l'insuffisance des renseignements géotechniques ; cela se produit notamment dans le cas d'ouvrages de petites dimensions, construits dans un site imposé. Il faut alors obtenir les éléments géotechniques quantitatifs, nécessaires à l'exécution d'un projet qui ne peut pratiquement plus être modifié ; il peut s'agir dans le cas d'un immeuble, de définir un niveau de fondation, une contrainte admissible et de prévoir éventuellement un ordre de grandeur des tassements. Dans le cas général où elle n'intervient qu'à cette étape et dans ce but, l'étude géotechnique ne dépasse néanmoins pas techniquement l'APS ; trop limitée, elle n'apporte pratiquement jamais la précision que l'on en attend sans lui donner les moyens de l'atteindre ; indiquer un ordre de grandeur de tassement ou même ne faire que prévoir qu'il pourrait s'en produire, n'est pas réaliser une étude géotechnique de tassement d'étape STD.

5.4.2.4 Dossier de consultation des entreprises (DCE)

Loi MOP : parties d'« Assistance au maître d'ouvrage pour la passation des contrats de travaux » ;

Norme NF P 94-500 : partie de G3 « Exécution ».

* **Résultats** : spécifications géotechniques de la consultation ou de l'appel d'offres puis du marché d'entreprise, concernant l'exécution de ces mêmes parties d'ouvrages.

Les calculs et documents techniques sont soumis au bureau d'études de sols (BES) qui vérifie, en ce qui concerne leur aspect géotechnique, que les hypothèses adoptées et les valeurs des paramètres utilisés, sont bien conformes à ses indications. Il n'a pas à se prononcer sur le choix des méthodes de calculs, sur leurs résultats, ainsi que sur les plans établis. En aucun cas, le BES n'assume, même partiellement, la conception technique de ces parties d'ouvrages.

Dans le cas où le maître d'ouvrage souhaite traiter au forfait certaines parties d'ouvrage et notamment les terrassements généraux et les fondations, il doit en informer le BES avant que soit défini le programme de l'étape des STD et la commande correspondante doit en faire état. Les calculs de dimensionnement et les plans d'exécution, établis par le maître d'œuvre, sont ensuite soumis au BES pour avis, et à l'entreprise pour approbation, après ajustements éventuels. L'accord sans réserve du maître d'ouvrage, du maître d'œuvre, du BES et de l'entreprise doit être ratifié avant signature du marché.

* **Techniques** : utilisation des documents établis précédemment, éventuellement complétés à la demande.

On considère alors généralement que le rôle du géotechnicien est terminé ; ce n'est pas très réaliste. En effet, si détaillés que soient les résultats d'une étude géotechnique, leur présentation est forcément schématique. Ils sont donc susceptibles d'être interprétés de façon erronée par un non-spécialiste ; il serait prudent, sinon nécessaire, que le projet d'exécution soit soumis à l'appréciation du géotechnicien et même qu'il participe à la rédaction du cahier des prescriptions spéciales (CPS) des parties d'ouvrages liées au sol et au sous-sol.

5.4.2.5 Contrôle général des travaux (CGT)

Loi MOP : parties d'« Ordonnancement, Pilotage, Coordination » ;

Norme NF P 94-500 : parties de G3 « Exécution » et G4 « Suivi ».

* **Définition** : assistance du maître d'œuvre pour l'exécution des travaux et parties d'ouvrages en relation avec le sous-sol : discussions pour l'agrément des méthodes proposées ou appliquées par les entreprises – participations aux réunions de chantier – interventions pour préciser un détail d'exécution mal défini, pour la prise de décision concernant les imprévus d'exécution et pour la réception.

* **Documents établis** : plans et coupes géotechniques détaillés – toutes indications géotechniques nécessaires au maître d'œuvre pour assumer sa mission de directeur de chantier – dossier géotechnique des ouvrages.

* **Résultats** : le maître d'œuvre peut optimiser techniquement et financièrement les parties d'ouvrage en relation avec le sous-sol et, éventuellement, les modifier à la demande en cas d'imprévus. Le dossier géotechnique des ouvrages pourra être consulté en cas de dommage, de réhabilitation... Le BES n'a pas l'obligation

de surveillance permanente des travaux correspondants et il n'a pas à en prendre les attachements. Ces missions font partie de celles du maître d'œuvre.

* **Techniques** : à la demande et autant que de besoin, levés géotechniques de détail sur le chantier – géophysique – sondages et/ou essais de contrôle.

Lors de l'exécution de l'ouvrage, le géotechnicien devrait suivre les travaux de mise en œuvre du sous-sol, terrassements, fondations, eaux souterraines pour recueillir de nouveaux renseignements, les comparer aux prévisions, les intégrer dans sa synthèse ou bien éventuellement la modifier pour qu'elle ne soit pas en contradiction avec des résultats imprévus et évidemment, en tirer les conséquences pour le chantier et l'ouvrage.

Sauf en cas d'incident mettant le maître d'œuvre dans l'embarras, il est actuellement très rare que l'on demande au géotechnicien de jouer ce rôle qui est pourtant toujours utile. En fait, ce rôle est même nécessaire, d'abord pour que le géotechnicien puisse accroître ses connaissances du site et parfaire son propre étalonnage, sa documentation et son expérience, c'est-à-dire son efficacité ultérieure et ensuite pour qu'il puisse pressentir les difficultés d'exécution qui pourraient surgir, de façon à prévenir à temps le maître d'œuvre et lui permettre éventuellement de remédier à leurs effets de la façon la plus rapide et la plus économique.

5.4.2.6 Réception des travaux (RDT)

Loi MOP : parties d'« Ordonnancement, Pilotage, Coordination » ;

Norme NF P 94-500 : parties de G3 « Exécution » et G4 « Suivi ».

À la réception de l'ouvrage, l'ensemble de la documentation recueillie lors de l'étude et de l'exécution, permettrait au géotechnicien d'être un expert objectif qui pourra aider à régler un contentieux éventuel à l'amiable, au mieux des intérêts de chacun. Il est en effet bien rare que la réclamation d'un entrepreneur ne soit en partie fondée, mais il est rare aussi qu'un imprévu ou un incident d'exécution ne soit exploité par l'entrepreneur pour présenter une réclamation plus ou moins fondée. L'aléa géologique, souvent exagéré voire imaginaire, est le prétexte habituel d'une réclamation plus ou moins abusive. Mais en cas de contentieux sur un chantier ou de dommage à l'ouvrage, les maîtres d'ouvrages préfèrent généralement considérer le géotechnicien comme un constructeur qu'il n'est pas, et en faire un défenseur, c'est-à-dire un adversaire plutôt qu'un expert, dans l'espoir de lui faire endosser une partie d'une responsabilité qu'il n'a pas prise ; sur le moment, c'est plus économique, mais ce l'est rarement à l'issue de l'affaire.

5.4.2.7 Éviter l'accident

Loi MOP : parties d'« Ordonnancement, Pilotage, Coordination » ;

Norme NF P 94-500 : parties de G4 « Suivi » et G5 « Diagnostic géotechnique ».

Le bon entretien d'un ouvrage n'est pas une mission normalisée. Or, durant la vie de l'ouvrage, le géotechnicien pourrait être amené à intervenir pour étudier le comportement de l'ensemble site/ouvrage, expliquer un dommage, en permettre la réparation immédiate et peu onéreuse ou même éviter la ruine. Au moins pendant la durée de ce que l'on appelle la garantie décennale, la plupart des maîtres d'ouvrages préfèrent attendre n'importe quel événement qui peut passer pour un dommage à l'ouvrage pour tenter de recevoir une indemnité, plutôt qu'assurer un entretien évidemment coûteux. C'est là un effet secondaire d'un droit trop peu réaliste qui ne sait protéger qu'en indemnisant.

5.4.3 Les limites de l'étude

Le rôle du géotechnicien devrait se limiter à l'étude du site et à la prévision de son comportement durant et après la construction de l'ouvrage. Il ne devrait pas s'étendre à l'étude et à la construction de l'ouvrage ou même seulement de ses parties en relation avec le sous-sol, ainsi que le font souvent certains géomécaniciens. Le géotechnicien n'est pas un ingénieur de structures car les façons de raisonner de l'un et de l'autre sont trop différentes pour qu'une confusion de rôles soit sainement possible ; elle se fait toujours au détriment de la géotechnique. En effet, ceux qui font cette confusion sont en fait des mécaniciens qui raisonnent en tant que tels et n'utilisent la géotechnique que pour mesurer les paramètres dont ils ont besoin pour effectuer leurs calculs selon les formules qu'ils utilisent exclusivement. Or, la géotechnique ne se résout sûrement pas à la seule géomécanique ; elle est tout autre chose qu'une branche de la mécanique des milieux continus et des structures et encore moins de la rhéologie.

C'est au géotechnicien de définir entre autres les valeurs des paramètres naturels et les critères de stabilité d'un mur de soutènement, d'une digue en terre ou d'un système de fondations... mais ce n'est pas à lui en tant que tel d'en étudier et d'en établir tout ou en partie le projet et d'en diriger l'exécution ; il peut évidemment le faire s'il en a la compétence et les moyens, mais cette activité de constructeur doit être clairement séparée de celle d'étude géotechnique.

5.5 Les techniques

Pour résoudre les problèmes que posera l'adaptation de l'ouvrage au site, chaque ensemble site/ouvrage ou éventuellement chaque ouvrage dans un même site, doit être étudié spécifiquement, selon un programme adapté à chaque étape de l'étude et éventuellement même susceptible d'être modifié à tout moment en fonction des résultats obtenus, en mettant en œuvre les techniques qui fourniront à meilleur compte les renseignements nécessaires et suffisants les plus pertinents. Ces techniques sont nombreuses et variées ; chacune a sa valeur et ses limites ; aucune n'est inutile, mais aucune n'est universelle ; pour chaque site, chaque type d'ouvrage, à chaque étape de l'étude, employer celles qui lui sont les mieux adaptées, conduit à une meilleure précision de résultats et à d'appréciables économies de temps et d'argent : les

études géotechniques d'ouvrages analogues, quelles qu'en soient la nature et l'importance, ne sauraient être réalisées de la même façon et avec les mêmes techniques dans un fond marécageux, sur un coteau argileux, un plateau karstique, une croupe granitique... ; dans un même site, on n'étudie pas de la même façon les fondations d'un immeuble, un talus de route, un forage d'eau.... ; en passant d'une étape à la suivante, la part de l'observation géologique s'allège au profit de l'instrumentation géomécanique.

La confusion des disciplines et des techniques est une importante source de difficultés logiques pour la conception de l'étude géotechnique ; faire un levé de terrain n'est pas faire de la géologie, faire un cisaillement à la boîte de Casagrande n'est pas faire de la géomécanique... Les disciplines servent à proposer des théories et des formes de raisonnement propres à poser et résoudre des problèmes ; les techniques servent à obtenir les renseignements nécessaires aux résolutions.

Si la géomécanique avait évolué dans le sillage de la rhéologie dont elle est une branche spécialisée, on aurait dès l'abord défini de façon intrinsèque, un domaine élastique, un domaine plastique et un point de rupture ; on aurait ensuite défini un protocole d'essais type pour établir la courbe contraintes/déformations permettant de les caractériser sur un géomatériau donné et pour des conditions aux limites données ; on aurait enfin utilisé la théorie générale de la plasto-élasticité pour résoudre n'importe quel problème de stabilité et de tassement d'ouvrage, quitte à simplifier au coup par coup dans le cadre de cette théorie pour tenir compte des particularités du site, du matériau et du problème posé. Pour mesurer les paramètres, on n'aurait alors eu besoin que du dilatomètre pour travailler *in situ* et du triaxial pour travailler sur échantillon. Mais bien avant que la rhéologie ait pénétré la géotechnique, la mécanique des remblais, des sols puis des roches ont évolué durant plus de deux siècles de façon autonome, dans des régions diverses où l'on trouvait des géomatériaux variés et où les problèmes posés étaient apparemment spécifiques ; diverses théories restreintes ont été proposées et se sont développées presque indépendamment les unes des autres ; de nombreux appareils spécifiques ont été construits pour mesurer, dans les conditions aux limites particulières les plus fréquemment rencontrées dans la région d'origine, le ou les paramètres dont l'influence était considérée comme prépondérante dans la théorie correspondante ; chacun de ces appareils et les paramètres qu'ils permettent de mesurer, sont donc étroitement dépendants de leur théorie de base et aucun n'est universel : si l'on veut définir les fondations d'un immeuble, l'empirisme anglo-saxon a encore recours au SPT (*Standard Penetration Test*) ; selon la théorie de Terzaghi, il faut utiliser l'œdomètre ; si on veut le faire selon la théorie de Ménard, il faut utiliser le pressiomètre ; selon celle de l'école hollandaise, le pénétromètre statique... L'utilisation du couple plasto-élasticité/triaxial en principe universelle est lourde et mal maîtrisée ; on y recourt rarement en pratique. Utiliser les autres appareils dans le cadre de la théorie générale est en fait impossible ; l'usage de chaque appareil et l'interprétation des mesures qu'il permet s'appuyant sur une théorie restreinte spécifique, on est obligé d'utiliser l'appareil spécifique d'un problème type pour résoudre un problème qui s'en rapproche. Il est par contre vain de mettre en œuvre plusieurs appareils pour traiter un même problème car ils ne sont pas complémentaires mais concurrents,

pas convergents mais parallèles, à moins que l'on veuille confronter par redondance les résultats obtenus au moyen d'appareils différents ; on s'aperçoit alors que même les ordres de grandeurs des résultats ne sont pas comparables et l'on doit utiliser de mystérieux coefficients correcteurs pour les rendre tels ; aussi, certains géotechniciens n'utilisent que l'appareil dont ils disposent en suggérant qu'il est le seul à pouvoir l'être.

La multiplicité des essais dont dispose le géotechnicien pour sa plus grande confusion n'a donc rien à voir avec la multiplicité des techniques dont il dispose pour son efficacité optimale ; ces techniques sont spécifiques, complémentaires et hiérarchisées ; on peut les classer en groupes d'affinités ; l'énumération qui suit n'est pas quelconque mais traduit la logique de leur mise en œuvre au cours de chaque phase de l'étude. Et s'il est vrai que leur importance relative change à mesure que se précise l'étude, il est néanmoins nécessaire d'y recourir peu ou prou et dans cet ordre à chaque étape : l'échelle et les quantités changent mais non les principes.

5.5.1 La géologie appliquée

Le premier groupe de techniques est celui de la géologie appliquée. Elles concernent ce que l'on sait et ce que l'on voit du site et de ses environs. L'interprétation des renseignements qu'on en obtient est directe mais assez subjective ; elle porte sur ce que l'on ignore ou que l'on ne voit pas. La géologie propose d'innombrables modèles types, du marécage de fond de vallon à la paroi rocheuse de haute montagne ; le modèle du site doit nécessairement se rattacher à l'un d'entre eux ; de sa pertinence dépendra la qualité de la mise en œuvre et de l'interprétation des techniques des autres groupes et finalement, la qualité de l'étude (*Fig. 4.5.2.1*).

5.5.1.1 La documentation

Ne pas redécouvrir ce que les autres savent, ne pas refaire ce que les autres ont fait, sont de sains principes d'économie d'effort, de temps et d'argent. La carte topographique à 1/25 000 de l'IGN et la carte géologique à 1/50 000 du BRGM sur lesquelles le site est implanté, ainsi que les autres sources de documentation nombreuses, variées, dispersées et de valeurs très inégales, bibliographies, archives, banques de données, laboratoires, bureaux de contrôle... doivent être systématiquement utilisées, mais avec prudence : les cartes géologiques sont des « écorchés » qui présentent plus ou moins subjectivement les formations de substratum affleurantes et/ou plus ou moins cachées par des formations de couverture plus ou moins épaisses, figurées ou non ; les formations sédimentaires sont figurées selon leur âge géologique et elles peuvent présenter des faciès plus ou moins différents selon l'endroit ; les formations cristallines sont figurées selon leur faciès... Les cartes géologiques sont ainsi de vrais rébus, sources de bévues pour ceux qui n'en maîtrisent pas la confection et l'usage acquis sur le terrain : ni facile, ni sûr, en extraire des données géotechniques ne leur est pas recommandé.

Le travail de documentation doit donc être préparé et organisé ; on ne trouve que ce que l'on cherche et il faut savoir que chercher et comment. Bien entendu, la documentation doit être soumise à la critique ; on ne doit en retenir que ce qui est plausible, ce qui est nécessaire et suffisant à l'étude que l'on entreprend et ne l'utiliser que comme première approche.

5.5.1.2 La télédétection

L'observation et l'étude de photographies aériennes stéréoscopiques est indispensable pour saisir et éclairer la structure générale du site et de ses abords, quelles que soient les dimensions du site et de l'ouvrage et où que ce soit, même dans un tissu urbain dense ; on peut y revenir autant que de besoin, à tous moments. En géotechnique, les contacts IGN noirs et blancs sont largement suffisants ; ceux en couleurs, réelles ou fausses, ainsi que les images de satellites, ne sont utiles que dans des cas très particuliers. L'évolution naturelle ou provoquée d'un site dans le temps, peut être suivie au moyen de clichés pris à des dates différentes éventuellement régulières, ce que l'IGN fait partout en France depuis plus de soixante ans.

5.5.1.3 Les observations de terrain

Certains géotechniciens ne viennent sur le terrain que pour implanter les sondages d'après un plan établi au bureau et faire un bon repas avec leur client en début de campagne ; c'est nettement insuffisant même si c'est commercialement efficace. Ils pourraient aussi y venir et même y revenir pour observer les ouvrages voisins, voir comment ils ont été construits et comment ils se comportent, y rencontrer des personnes qui connaissent bien le site ; en matière de phénomène naturel, la mémoire du *plus vieux du pays* est souvent plus juste que la statistique officielle. Le classique levé de terrain géologique n'est pas à dédaigner ; sur le site et dans ses environs, observer et repérer un affleurement, casser un caillou, mesurer sur un talus un pendage, l'épaisseur de la couverture et/ou d'une couche, photographier tout ou partie du site... sont des opérations peu fatigantes, toniques et particulièrement efficaces. Pour être plus sérieux, la carte géologique de terrain, levée spécifiquement à l'échelle du fond de plan de l'étude, est le document de base de toute étude géotechnique, quels que soient les dimensions du site et le type d'ouvrage.

5.5.2 La géophysique

Deuxième groupe de techniques, la géophysique est un système d'étude du sous-sol d'un site peu apprécié en géotechnique ; le plus souvent, on ne lui accorde qu'un intérêt très nuancé, parfois on lui est franchement hostile ou même, on l'ignore : pour recueillir des renseignements géotechniques de terrain, on ne connaît guère que le sondage mécanique et l'essai de chantier ou de laboratoire qu'il ne peut évidemment pas remplacer, mais qu'il prépare efficacement. La réputation douteuse des techniques de la géophysique, tient en grande partie à ce qu'elles sont souvent mal utilisées et leurs résultats, mal inter-

prétés. Traditionnellement, elles sont mieux acceptées par les géologues que par les physiciens, ce qui est assez paradoxal.

Pourtant, certaines de ces techniques sont bien adaptées à la géotechnique : la résistivité électrique, trainé et sondage, et la sismique-réfraction sont les plus efficaces et les plus utilisées ; dans des cas particuliers, on peut néanmoins recourir à d'autres techniques d'usage plus difficile, à condition d'en bien connaître les possibilités et les limites.

5.5.2.1 La résistivité électrique

Les techniques de résistivité électrique sont fondées sur la mesure du potentiel superficiel d'un champ électrique continu ou alternatif, plus rarement électromagnétique, créé par un dispositif de quatre ou cinq électrodes implantées à la surface du sol, ou par un (émetteur)-récepteur radio. Le paramètre mesuré est la résistivité, calculée par des formules issues de l'équation théorique du champ selon les conditions aux limites imposées par le dispositif, intensité du courant, géométrie du dispositif de mesure... Les valeurs de résistivité vont de moins de $10 \Omega.m$ pour une argile très humide à près de $20\,000 \Omega.m$ pour une roche cristalline massive.

La valeur de la résistivité réelle d'un géomatériau dépend de la proportion d'ions mobiles qu'il contient ; le plus souvent, ce sont les ions libres de certains cristaux comme ceux des argiles ou ceux des solutions aqueuses contenues dans ses pores. Elle est d'autant plus faible que le matériau est plus argileux et plus humide ; ce n'est donc pas une valeur permanente en un point donné du site, puisqu'elle dépend de la teneur en eau du géomatériau qui varie dans le temps : des mesures effectuées dans un même site à des époques différentes, ne peuvent pas être corrélées mais elles indiquent les mêmes tendances.

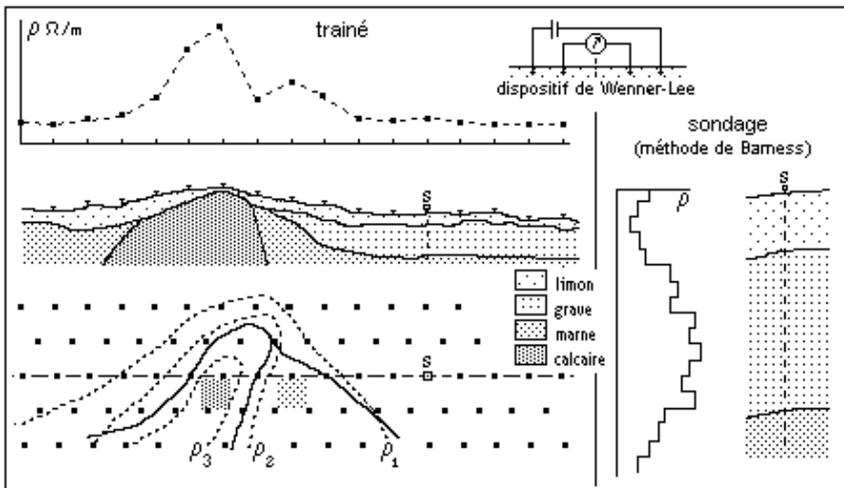


Figure 5.5.2.1 - Résistivité électrique

La résistivité mesurée en surface ne serait une valeur réelle que si le matériau était unique, homogène et isotrope, ce qu'il n'est évidemment jamais ; depuis la surface on ne mesure que des résistivités apparentes dont les valeurs résultent de l'influence confusément pondérée de tous les matériaux du site soumis au champ ; des calculs fondés sur ces mesures permettent de préciser la structure de sites où avoisinent des matériaux différents.

À condition de travailler rapidement et en continu, cette technique est particulièrement efficace dans les sites où avoisinent des géomatériaux très différents, limon/grave, calcaire/marne..., pour les différencier.

► **Le traîné électrique**

Pour préciser le levé géologique de terrain dont ils en sont les compléments quasi indispensables, on établit des profils ou des cartes de résistivité en mesurant la résistivité apparente de points du site répartis sur une maille plus ou moins dense au moyen d'un dispositif d'électrodes invariable que l'on déplace sur le terrain. On interprète les variations de la résistivité pour préciser la structure horizontale du site : le traîné est particulièrement efficace pour repérer des contacts structuraux flous ou cachés, suivre une variation de faciès, pour apprécier l'hétérogénéité d'un site...

► **Le sondage électrique**

Pour éclaircir la structure verticale du sous-sol aux alentours d'un point fixe du site, on réalise un sondage électrique ; sur ce point, au moyen d'un dispositif d'électrodes variable, on mesure pas à pas la résistivité apparente ; on considère que les variations de résistivité d'un pas à un autre du dispositif traduisent l'hétérogénéité verticale du sous-sol du site. Par des abaques ou de longs calculs que l'informatique a facilités, on établit des profils de sondages. Dans la plupart des cas, cette technique manque de finesse et ne convient que pour indiquer des tendances ; elle est toutefois extrêmement efficace pour préciser des structures simples et contrastées, comme celle très fréquente en plaine alluviale : trois couches subhorizontales superposées, limon peu résistif et grave résistive de couverture, marne peu résistive de substratum.

► **L'électromagnétisme**

L'électromagnétisme est à la base d'autres techniques électriques plus ou moins efficaces dans quelques cas particuliers, mais dont l'usage ne peut pas être généralisé. Pour effectuer un traîné, un dispositif mobile portable permet d'établir point par point la carte de potentiel du champ électrique local au moyen de bobines excitées par des ondes de radiodiffusion ou émises spécifiquement, que l'on suppose influencées par les caractéristiques électriques du géomatériau en chaque point de la zone explorée ; on mesure ainsi un paramètre mal défini que l'on assimile à la résistivité apparente ; cela évite d'implanter des électrodes dans le sol et permet donc de travailler beaucoup plus rapidement que par la méthode classique ; l'efficacité de ce dispositif dépend de la valeur locale de la résistivité du matériau, de la nature, de la position et de la distance de l'émetteur radio, de sa longueur d'onde..., de sorte que l'on ne sait pas toujours bien ce que l'on mesure et ce que représentent les mesures dont les variations sont toutefois significatives. Le radar électrique fondé sur la réflexion d'ondes

électromagnétiques spécifiquement produites en surface sur des surfaces souterraines séparant des géomatériaux de résistivités différentes, est souvent présenté comme une technique tomographique très maniable pour établir des profils continus ; il convient bien pour détecter les anomalies de très petites structures régulières comme celles des chaussées ou des revêtements de galeries ; mais très peu pénétrant et mal discriminant dans la plupart des cas, il est très décevant à l'échelle d'un site, même petit et simple.

5.5.2.2 La gravimétrie

En géotechnique, on utilise la gravimétrie pour repérer les vides naturels ou artificiels du sous-sol. D'un emploi relativement simple et fructueux à l'échelle d'une région pour en préciser les grandes structures, la gravimétrie est très difficile à mettre en œuvre à l'échelle d'un site géotechnique limité ; dans un tel cas, les variations de l'accélération de la pesanteur, paramètre que l'on mesure, sont infimes d'un point à un autre du site ; les corrections que l'on doit apporter aux mesures brutes pour tenir compte de la présence de masses parasites dans le site, sont identiques ou même supérieures aux variations significatives que l'on voudrait mettre en évidence ; cela enlève parfois toute valeur aux résultats de calculs reposant sur des hypothèses de conditions aux limites irréalistes. Naguère, un grand maître d'ouvrages souterrains en sites encombrés susceptibles de receler des cavités souterraines utilisait systématiquement cette technique ; quelques années d'expériences douteuses ou malheureuses l'ont amené à publier une sévère critique de la gravimétrie et à en restreindre sérieusement l'utilisation. Dans la plupart des cas, on ne peut utiliser avec profit cette technique que si l'on connaît bien le volume et la profondeur des vides, pour en préciser la forme et la profondeur, mais pas pour découvrir des vides inconnus.

5.5.2.3 La sismique

Les techniques sismiques sont fondées sur l'observation de la propagation d'un ébranlement du sous-sol, soit naturel soit provoqué par un choc ou une explosion. En un point d'observation, dans un plan de référence, cet ébranlement a grossièrement la forme d'une vibration sinusoïdale amortie, caractérisée par sa vitesse de vibration, éventuellement par son amplitude ou son accélération selon l'appareil de détection utilisé, sa fréquence et sa durée, qui dépendent essentiellement de l'énergie de l'ébranlement initial, de sa distance au point d'observation... La vibration se propage dans le sous-sol à vitesse à peu près constante caractéristique du géomatériau, d'autant plus grande que le géomatériau est plus compact et plus élastique, la vitesse sismique ; ses valeurs vont de moins de 250 m/s pour un limon meuble de subsurface, peu compact et non saturé, à plus de 4 000 m/s pour une roche cristalline massive en profondeur ; à chaque changement de matériau, l'onde qui porte la vibration subit des réfractions et des réflexions dont l'analyse permet d'appréhender la structure géomécanique du site ; le rapport de la vitesse mesurée sur le terrain à la vitesse mesurée au laboratoire sur un échantillon du géomatériau correspondant, permet d'apprécier l'état de décompression de ce matériau en place. La vitesse sismique peut être corrélée à la plupart des paramètres de la géomécanique.

► **La sismique réfraction**

Pour déterminer la vitesse sismique dans le sous-sol d'un site géotechnique et en étudiant les variations, on fait un sondage de sismique réfraction : on mesure la durée du trajet d'un ébranlement entre son point de production et le point d'observation dont on fait varier la distance ; les ondes réfractent au contact de matériaux différents, à condition qu'ils soient de plus en plus compacts vers la profondeur. Par l'exploitation semi-graphique très simple des mesures de durées en fonction des distances, on obtient la vitesse sismique de chaque matériau et la profondeur de chaque contact ; les résultats sont fiables et reproductibles.

Le sondage de sismique réfraction permet donc d'établir le modèle géomécanique du site, par référence au modèle géologique précédemment esquissé ; il contribue ainsi à réussir le passage des échantillons au site, que ne permettent pas la théorie des ensembles et la géomécanique. Il permet aussi de prévoir avec une précision acceptable, la méthode de terrassement d'un massif rocheux.

Lors de n'importe quelle étude géotechnique, l'exécution d'une campagne de sondages de sismique réfraction est donc souhaitable sinon indispensable.

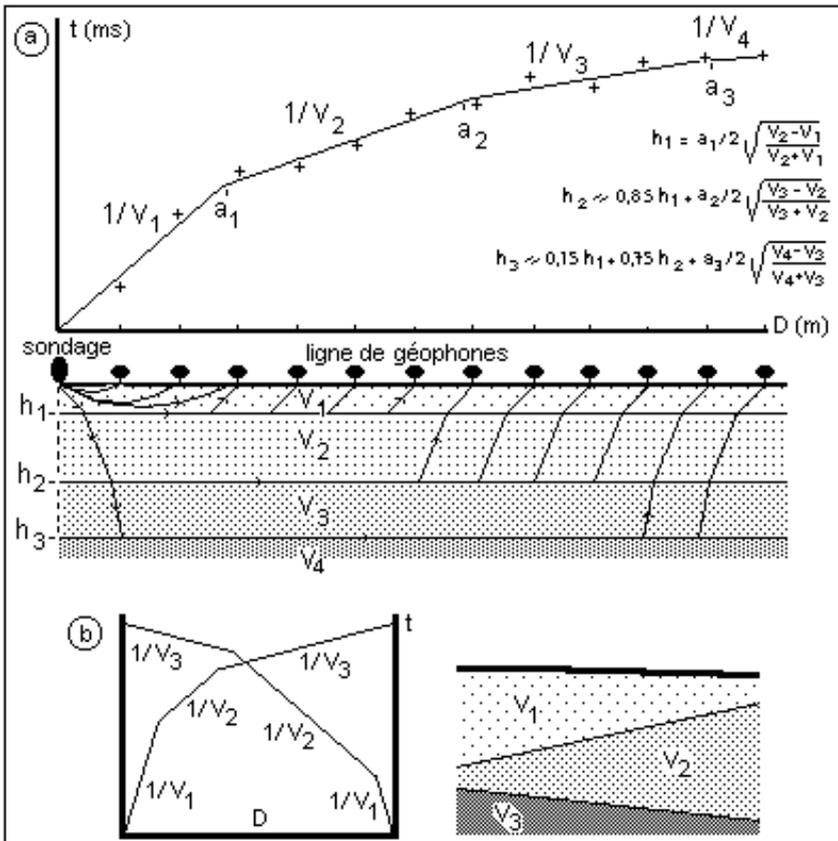


Figure 5.5.2.3.1 – Sondages de sismique réfraction

► La sismique réflexion

L'emploi de la sismique réflexion est peu fréquent en géotechnique terrestre car le difficile couplage instrument/sous-sol impose une instrumentation de terrain très complexe et de très puissants moyens de calculs pour exploiter les mesures. Elle est par contre facile à mettre en œuvre et très efficace en milieu aquatique, marécage, rivière, mer... car le couplage instrument/sous-sol est assuré par l'eau : un puissant sondeur graphique de navigation convient dans la plupart des cas.

La tomographie sismique de surface qui en dérive est une technique efficace pour établir d'excellents modèles géomécaniques ; malheureusement, elle requiert de lourdes instrumentations de terrain et informatique, de sorte qu'en géotechnique on ne l'emploie que pour les études de grands ouvrages profonds et/ou dans des sites complexes ou très encombrés, tunnels et galeries urbains ou de montage...

Des essais sismiques ponctuels peuvent être réalisés dans les sondages mécaniques.

► La sismique de vibration

Les ébranlements dus aux explosions de terrassement ou aux séismes, se propagent dans le sous-sol et provoquent éventuellement des dommages aux ouvrages fragiles. Par l'analyse d'un faible ébranlement dont on mesure les paramètres dans les trois dimensions en quelques points caractéristiques de la structure de l'ouvrage et du sol environnant, on déduit la façon dont le sous-sol du site l'amortit et le filtre, et la façon dont la structure réagit ; cela permet de régler les tirs d'abattage pour améliorer leur rendement et d'éviter les dommages aux ouvrages voisins ou de préparer des études de génie parasismique. On ne peut réaliser des études de sismique de vibrations profitables que si la structure sismique du site a été préalablement établie par la sismique-réfraction ; le couplage sol/ouvrage et donc l'effet des vibrations, est différent suivant que le sol est rocheux ou meuble et la structure de l'ouvrage, iso ou hyperstatique, fragile ou ductile...

5.5.3 L'instrumentation de terrain

Sondages mécaniques et essais sont les mieux connues et les plus prisées de toutes les techniques de récolte de données géotechniques : pour la plupart des constructeurs et aussi hélas, pour de nombreux géotechniciens, une étude géotechnique se réduit à une campagne de sondages agrémentée de quelques essais *in situ* et/ou de laboratoire. Pourtant ces techniques sont loin d'être à la hauteur de leur réputation quand elles sont mises en œuvre sans discernement, sans préparation soignée et sans suivi rigoureux. Par analogie avec la méthode statistique, on doit en effet disposer d'un modèle géologique et géophysique aussi élaboré que possible avant d'effectuer un sondage ; une campagne de sondages doit être soigneusement préparée et rigoureusement suivie, sinon elle n'est qu'un moyen de dépenser beaucoup d'argent pour pas grand-chose. C'est

une opération de contrôle de modèle et de mesure de paramètres et non un procédé d'étude : si simple que soit la structure d'un site, on peut tout au plus la préciser ainsi, pas la définir.

5.5.3.1 Les sondages mécaniques

Des sondages implantés au hasard ou, ce qui revient au même, selon une maille régulière, sans tenir compte de la structure du site, ne peuvent conduire qu'à des interprétations douteuses ou même erronées (*Fig. 5.2.1.5*). La réduction systématique d'une maille d'implantation pour accroître la précision statistique, implique une augmentation quadratique du nombre de sondages ; pour un coût et un délai exorbitants, on peut être sûr que l'on réalisera ainsi de nombreux sondages inutiles, sans être certain que l'on n'aura pas laissé passer un détail de structure de dimension inférieure à celle de la maille, si petite soit-elle.

Quel qu'en soit le type, le sondage mécanique permet d'identifier les matériaux du site, de repérer leur position ; c'est ainsi d'une part le moyen d'éprouver et d'affiner le modèle préétabli et d'autre part, celui d'effectuer des mesures de paramètres en des points choisis du sous-sol du site ; certaines de ces mesures sont réalisées en cours de sondage, – diagraphies mécaniques, essais *in situ*, prélèvements d'échantillons pour essais de laboratoire... ; d'autres le sont dans des tubages mis en place à cet effet dans certains sondages, – diagraphies géophysiques, essais hydrauliques et/ou mécaniques, enregistrements de mouvements de terrain et autres paramètres variables dans le temps... Par référence au modèle, on peut extrapoler aux zones correspondantes du site, les valeurs ainsi mesurées et interpréter la forme de leurs variations dans l'espace et éventuellement dans le temps, améliorer le modèle et préciser son comportement pour lequel les résultats des essais fournissent les valeurs des paramètres influents ; cela facilite le passage des échantillons au site. Les procédés de sondages mécaniques sont nombreux et variés, – percussion, rotation ou vibration, à l'eau, à la boue, à la mousse ou à l'air, carottage continu ou discontinu, au carottier simple, double ou triple, tarière continue ou discontinue, utilisation de trépans divers et récupération de *cutting*, pénétromètre statique ou dynamique..., en divers diamètres. à condition que celui utilisé le soit judicieusement en fonction des matériaux à reconnaître, du but poursuivi et des moyens économiques dont on dispose, aucune hiérarchie ne peut être établie entre eux : chacun a sa valeur et ses limites ; si l'un était supérieur aux autres, il serait seul utilisé.

L'interprétation d'une campagne de sondages se fait en deux temps ; on établit d'abord la coupe de chaque sondage, puis la corrélation de l'ensemble. Cette interprétation implique une bonne connaissance de la structure du site, une observation attentive des échantillons et une analyse détaillée du déroulement des opérations de forage ; tout cela est en grande partie subjectif alors que, pour être cohérente, elle devrait être aussi impersonnelle que possible ; des personnes différentes décrivent presque toujours le même sondage en n'identifiant pas les matériaux de la même façon et/ou en désignant différemment les mêmes ; ainsi, elles établissent souvent des coupes de sondages et des corrélations inattendues voire surprenantes. L'usage d'une terminologie standardisée et de paramètres

représentatifs facilement mesurables, permettrait d'y parvenir à peu près ; on a proposé sans résultat un grand nombre de systèmes différents, rarement compatibles. De toute façon, les coupes de sondages sont presque toujours établies par l'ouvrier-sondeur dont les connaissances sont approximatives et le vocabulaire limité ; un géotechnicien qui n'a pas forcément vu les échantillons, remet en plus ou moins bon français, le charabia ahurissant que constitue presque toujours le rapport du sondeur et y adjoint quelques mots savants dont il ne connaît pas toujours le sens exact ; c'est parfois comique et plus généralement consternant.

On devrait choisir le procédé de forage, le diamètre, la profondeur et l'inclinaison du trou selon le géomatériau à reconnaître et les renseignements à recueillir sur lui, les essais à réaliser et/ou les instruments à mettre en place. Mais généralement, le géotechnicien voit ce choix limité aux possibilités des machines dont il dispose et des instruments dont elles sont équipées.

► Les sondages étalons carottés

Le carottage continu à rotation ou au battage, à double ou triple enveloppe, est une opération luxueuse, particulièrement onéreuse notamment dans les matériaux meubles quand elle est réellement exécutée dans les règles, ce qui est rarement le cas. Elle doit être réservée à l'étalonnage d'un site pour en préciser la lithologie type et pour alimenter le laboratoire en échantillons dits intacts, qui ne le sont évidemment jamais puisque les conditions aux limites de l'échantillon sont différentes et incomparables dans le sous-sol du site puis dans l'appareil d'essai ; la membrane pressurisée en caoutchouc d'un triaxial ne change pas grand-chose à cela.

Si l'étude géotechnique a été bien conduite, la structure du site est déjà assez bien définie pour qu'il ne soit pas nécessaire d'effectuer systématiquement un grand nombre de sondages carottés ; il suffit d'implanter judicieusement un nombre limité de tels sondages, pour étalonner et pour préciser le modèle du site et prélever où il faut, des échantillons réellement représentatifs des divers matériaux du sous-sol, afin de les utiliser pour procéder à des essais de laboratoire préalablement définis, de façon que la méthode de prise soit adaptée aux essais prévus.

La qualité d'un carottage dépend de l'habileté du sondeur qui doit constamment adapter son outil et son travail au matériau traversé ; il n'y a pas de géomatériaux qui se carotent mieux que d'autres mais seulement des géomatériaux qui se carotent plus facilement que d'autres ; on peut carotter à 100 % presque toutes les roches et tous les sols : considérer que le taux de carottage est un paramètre représentatif de la qualité du matériau est une invite au travail bâclé. Il est impératif que le carottage soit soigneux quand il est difficile, car les parties de carotte que l'on perd, concernent toujours des matériaux fragiles qu'il importe de repérer ; un calcaire très karstique peut paraître massif dans une caisse, si toute l'argile que contiennent ses fissures a été lavée ; un lit de sable aquifère dans une formation argileuse peut disparaître au carottage puis être à l'origine d'un glissement de pente naturelle ou de talus de déblai. Pour décrire quantitativement les carottes massives, on peut mesurer les épaisseurs de couches et pour chaque couche, mesurer l'épaisseur de fissures et calculer le

RQD (*Rock Quality Designation* ; pour que tout cela ait un sens, il faut un carottage à 100 % et des mesures perpendiculaires à la stratification ; on n'y pense pas toujours..

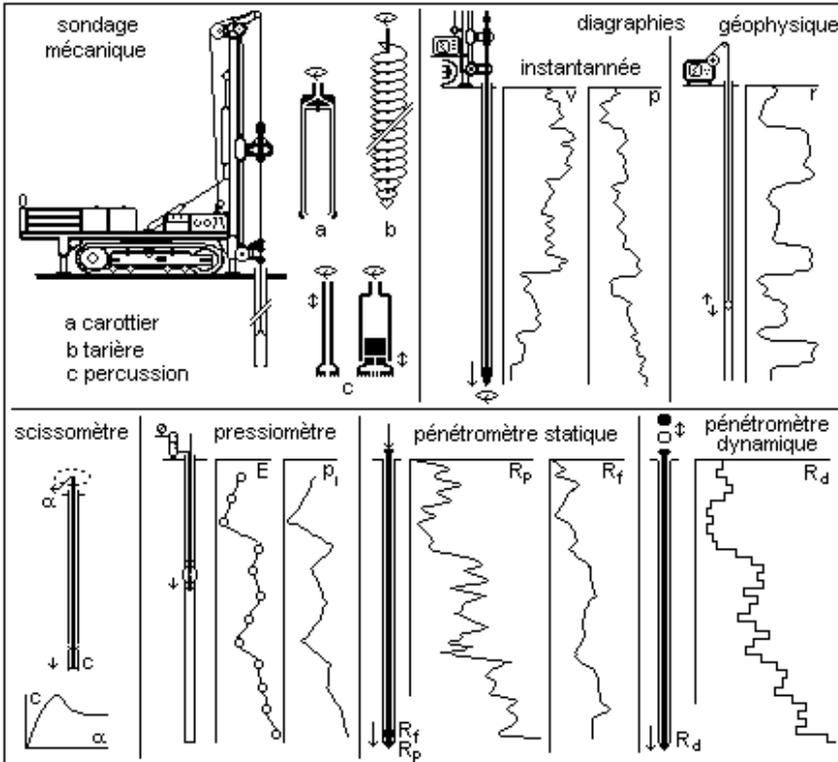


Figure 5.5.3.1 – Sondages, diagraphies et essais *in situ*

Certains matériaux peu ou pas consistants, graves alluviales, sables peu argileux, éboulis..., sont pratiquement impossibles à carotter correctement, même par un sondeur consciencieux. On peut seulement en tirer des échantillons plus ou moins remaniés sur lesquels on ne peut valablement effectuer que des essais d'identification. En fait, si la roche carottée n'est pas constituée d'un matériau consistant qui se découpe nettement au battage ou à rotation et qui tient dans le carottier au moyen de l'extracteur dont il est équipé, quel que soit le soin du prélèvement, on peut difficilement considérer que l'on en extrait des échantillons intacts même s'ils sont complets, car leur structure est détruite. Fondamentalement, le carottage est une opération destructrice à laquelle seules résistent les roches massives et dures, celles sur les échantillons desquelles il n'est pas toujours nécessaire de faire des essais mécaniques compliqués.

Le plan d'échantillonnage est presque toujours négligé ; il porte sur le choix des essais, leur nombre, les modes de prélèvement, les volumes et les dimensions

des échantillons, leur repérage, leur conditionnement, leur transport, leur conservation.... On prélève plutôt à grand frais, des échantillons inutiles et pratiquement inutilisables car on le fait systématiquement, sans tenir compte de ce à quoi ils vont servir. Pour effectuer des essais mécaniques, il faut disposer d'échantillons dits intacts, prélevés à percussion ou à rotation, mais si une éprouvette de 66 mm de diamètre peut convenir pour la compression simple ou trois de même diamètre pour le triaxial, le diamètre d'une seule doit être d'au moins 80 mm pour la boîte de Casagrande ou pour l'œdomètre ; pour les essais d'identification, s'il suffit d'environ 500 g de matériau remanié, prélevé à la tarière, à la soupape ou à la benne, pour déterminer la densité, la teneur en eau, les limites d'Atterberg et parfois la granulométrie ; il en faut au moins 5 kg pour effectuer un essai Proctor ou un CBR et beaucoup plus pour un essai de pierre. Négliger ce genre de contrainte revient souvent à effectuer des sondages pour presque rien et même à devoir effectuer d'autres sondages pour prélever des échantillons nécessaires. Cela arrive fréquemment quand on définit *a priori* la façon dont on va résoudre le problème géotechnique posé : pour les fondations d'un grand ensemble industriel que l'on pensait devoir être profondes compte tenu de l'aspect du site, une première campagne de sondages semblait indiquer que le sous-sol du site était particulièrement hétérogène, remblais en surface, puis argile sableuse couvrant un substratum plissé de calcaire, marne et gypse à surface très ondulée ; les fondations profondes initialement prévues s'avéraient ainsi pratiquement irréalisables et il a fallu faire de nouveaux sondages pour échantillonner l'argile passée au trépan sans échantillonnage par les sondages initiaux ; c'est finalement sur cette argile qui s'est révélée homogène et consistante, que l'on a fondé très facilement les bâtiments.

Il importe d'exécuter les sondages étalons carottés avec le plus grand soin, sous la responsabilité et le contrôle rigoureux du géotechnicien, qui doit lui-même en établir la coupe et en choisir les échantillons types qui serviront de références et sur lesquels on effectuera les essais prévus ; le sondeur n'est pas qualifié pour prendre ces responsabilités. Il faut bien entendu que le géotechnicien vienne alors lui-même sur le chantier de sondage, qu'il se penche lui-même sur les caisses d'échantillons, qu'il note ses observations et qu'il photographie en couleur toutes les carottes. Quand les caisses seront égarées ou détruites avant que l'on ait fini de s'en servir, il en restera toujours cela.

C'est d'autant plus prudent que le sondeur est généralement plus soucieux de justifier auprès de son employeur, le travail matériel de son atelier que de donner de bons renseignements géotechniques ; souvent payé au rendement, son souci essentiel est de réaliser le maximum de mètres de sondages dans le minimum de temps, ce qui est rarement une façon de faire de bons sondages.

► Les sondages rapides

Pour les raisons économiques, le sondage géotechnique évolue vers la rapidité d'exécution : on réalise de moins en moins de sondages carottés de façon continue, lents et onéreux, réservant cette technique aux sondages étalons et à l'étude des seuls niveaux d'un site qui présentent un intérêt géologique ou géotechnique particulier ; on effectue de plus en plus des sondages partiellement carottés ou même non carottés, plus rapides et moins coûteux, quand

l'échantillonnage n'est pas nécessaire et même sans se poser ce genre de question.

Si le modèle du site est déjà bien établi et le problème géotechnique correctement posé, à quoi sert en effet l'échantillonnage systématique des matériaux de couverture d'un site quand il s'agit d'étudier l'ancrage dans le substratum des fondations d'un immeuble, ou l'échantillonnage systématique du substratum quand il s'agit de fonder un haut remblai sur des terrains de couverture épais et compressibles ? Cela sert surtout à rassurer les non-spécialistes qui n'en croient que leurs yeux et considèrent qu'une étude géotechnique n'est sérieuse que s'ils voient des échantillons qu'ils sont du reste, bien souvent incapables d'utiliser : dans le premier cas, c'est du substratum qu'il importe de prélever la plupart des échantillons et de les essayer alors que dans le second, c'est dans les terrains de couverture qu'il faut le faire. Et si les caractères géotechniques de l'un ou des autres ont été correctement définis au moyen des résultats des sondages et des essais étalons, il suffit souvent de préciser localement la profondeur du substratum ou ce qui revient au même, l'épaisseur des terrains de couverture, et de mettre en évidence les variations de ces matériaux par rapport aux échantillons étalons ; on peut faire cela plus rapidement, à moindre frais et avec une précision analogue, au moyen de sondages rapides non carottés ou échantillonnés de façon sommaire, tarière, marteau perforateur, trépan rotatif ou à percussion, pénétromètre statique ou dynamique...

Il importe évidemment de choisir toujours le procédé le mieux adapté aux matériaux à reconnaître et au but de l'étude. à condition que les *cutting* soient examinés par référence au modèle préétabli du site et éventuellement, repérés au moyen de diagraphies mécaniques et/ou géophysiques, les sondages rapides sont généralement suffisants pour établir localement une coupe stratigraphique, fonction traditionnelle principale du sondage mécanique, pour préciser un modèle structural préétabli, pour prélever des échantillons remaniés mais entiers destinés à l'identification visuelle ou aux essais d'identifications, – teneur en eau, limites d'Atterberg, granulométrie, calcimétrie..., pour exécuter des essais *in situ*, – pressiomètre, scissomètre, Lefranc, Lugeon..., pour mettre en place des appareils de mesures ou des témoins..., – piézomètres, inclinomètres, tassomètres... plus généralement, pour reconnaître la nature et préciser l'épaisseur et la profondeur d'un niveau géotechnique déjà identifié et repéré

Les sondages à la tarière ou à la pelle à main ou mécaniques, à la curette ou à la benne preneuse, fournissent des échantillons dont la structure est détruite mais pas les constituants ; ils ne peuvent être exécutés que dans des matériaux meubles. Les sondages au marteau perforateur ou fond de trou, au trépan à injection ou au rotary, fournissent des débris plus ou moins grossiers de matériaux néanmoins identifiables par un géotechnicien averti ; on les effectue dans les roches compactes et dures, à l'exception des sondages au trépan à injection, généralement tubés à l'avancement, qui sont réservés à la reconnaissance des matériaux sablo-graveleux aquifères.

Pour établir des coupes géologiques, le défaut commun à tous ces sondages est que la remontée des échantillons depuis le fond du trou jusqu'à la surface du sol, prend un temps non négligeable, très variable selon la technique mise en

œuvre, la puissance du matériel et la nature du matériau, de sorte que l'on ne peut coter ces coupes de façon très précise à moins que le sondeur note consciencieusement la façon dont se déroulent toutes ses opérations et/ou que la sondeuse soit équipée d'appareils de diagraphies mécaniques.

► Les pénétromètres

Au cours d'un essai de pénétration statique, par pression, et/ou dynamique, par battage, on ne prélève pas d'échantillon ; en fonction de la profondeur de l'extrémité d'un train de tiges enfoncé verticalement, on mesure seulement, plus ou moins directement et de façon à peu près continue, l'effort nécessaire à la traversée des matériaux rencontrés ; cela est en fait un avantage considérable par rapport aux méthodes de sondages rapides qui ne permettent que des mesures plus ou moins discontinues et souvent même très peu nombreuses. L'effort mesuré dépend de l'épaisseur et de la résistance de chacun de ces matériaux mais aussi de la façon dont il est produit, battage ou pression, de sa vitesse d'application, ainsi que des caractéristiques du train de tiges et de sa pointe, de sorte que l'on a dû standardiser des appareils de référence pour contrôler autant que possible l'influence des paramètres strictement instrumentaux. Afin de traduire les mesures de façon plus ou moins stable et reproductible pour chaque matériau traversé en résistance de pointe dynamique ou statique et, avec certains appareils statiques, en résistance au frottement latéral unitaire, on utilise des formules semi-empiriques.

Comme celles de diagraphies, les courbes pénétrométriques permettent de mesurer de façon continue un paramètre déterminé et de préciser des corrélations géomécaniques, mais quels que soient le type et la puissance d'un appareil, le logiciel d'interprétation dont on dispose, une campagne d'essais de pénétration ne permet pas de réaliser une étude géomécanique. Pourtant, le pénétromètre statique est parfois présenté comme un instrument universel d'études de fondations : des théories et des méthodes de calcul spécifiques ont été développées en ce sens ; en dehors de quelques sites très particuliers, il serait imprudent de leur faire trop confiance. Il est vain de tenter l'interprétation d'un essai de pénétration dynamique par référence aux théories générales et encore plus imprudent d'utiliser sans critique rigoureuse les résultats obtenus.

► Les diagraphies mécaniques

Les diagraphies mécaniques sont aussi appelées diagraphies instantanées ou enregistrements de paramètres de forages. Elles ont été mises au point à la fin des années 70 pour documenter de nombreux forages très rapides et répétitifs de grands chantiers de traitement systématique du sous-sol d'un site. Elles sont réalisées directement en cours de forage effectués le plus souvent au marteau hors ou en fond de trou, au moyen de capteurs et d'enregistreurs travaillant en temps réel ; elles modélisent plutôt le travail de forage que les matériaux traversés. Les paramètres les plus intéressants ainsi mesurés sont la vitesse d'avancement et l'accélération instantanées de forage ; on y ajoute habituellement, tout ou partie, le couple de rotation, la poussée sur l'outil, la pression d'injection du fluide de forage, la percussion réfléchie, amplitude de l'onde de choc de l'outil sur le matériau en fond de forage, et la vitesse moyenne de

forage ; on les présente sur des diagrammes paramètre/profondeur juxtaposés. Avec le secours de l'électronique et de l'informatique, en combinant les valeurs de plusieurs de ces paramètres, on voudrait les utiliser pour caractériser les matériaux, au cours de forages très rapides, eux-mêmes plus ou moins automatisés. Cela est effectivement possible lors de grands chantiers de forages pour la mise en place de tirants d'ancrage, de micropieux, d'injections... qui concernent des sites et des matériaux déjà caractérisés au moyen de sondages étalons et d'essais, qu'il importe seulement de bien repérer ; c'est du reste pour cela que ces techniques ont été mises au point ; compte tenu de la quantité impressionnante d'informations qu'il faut traiter pour conduire et contrôler de tels chantiers, il n'est pas possible de faire autrement.

Pour l'étude géotechnique, on ne devrait donc pas considérer les diagraphies mécaniques comme des techniques autonomes, ne pas les utiliser pour caractériser les matériaux et prudemment limiter leur usage au calage des *cutting* ; la vitesse d'avancement et l'accélération instantanées n'ont en effet aucune valeur intrinsèque : la vitesse d'avancement peut être lente parce que la roche est très dure ou collante et souvent plus dans le second cas que dans le premier. Toutefois, dans des conditions de forage fixes, même machine, même outil d'égale usure, même vitesse de rotation, même pression sur l'outil, même pression et débit du fluide d'injection, on peut souvent distinguer les matériaux d'un même site et préciser des corrélations de sondages. En essayant d'utiliser les autres paramètres, on accroît plus la perplexité de l'interprète que la qualité de l'information ; la perplexité devient souvent confusion quand on demande à un logiciel destiné à le faire, de combiner ces paramètres pour améliorer la caractérisation des matériaux. L'intérêt commercial de ces techniques est par contre évident ; on peut ainsi valoriser des sondages bâclés ; tout est automatique, enregistrement sur le site, exploitation à l'ordinateur, tracés de jolis graphiques multicolores, directement inclus dans les rapports... Si le géotechnicien n'est pas dupe lui-même, cela n'est pas très dangereux.

► Les diagraphies géophysiques

Les diagraphies géophysiques sont réalisées quand le forage est achevé et éventuellement tubé : les paramètres sont mesurés avec des sondes spécifiques descendues puis remontées dans le forage et enregistrés de façon continue en fonction de la profondeur ; en principe, ils ne dépendent donc que des matériaux mais leurs valeurs ne sont pas spécifiques ; un étalonnage est donc nécessaire à une interprétation correcte. Quelle que soit la diagraphie géophysique, son rayon d'action est au plus d'une dizaine de centimètres autour du forage ; une diagraphie est donc une opération d'analyse et non de synthèse ; la synthèse impose la comparaison de plusieurs diagraphies de même type, exécutées dans tous les sondages d'un même site que l'on peut ainsi corréler.

Les diagraphies électriques et de radioactivité naturelle

Les diagraphies électriques de résistivité et polarisation spontanée, et de radioactivité naturelle ne peuvent être utilisées que pour préciser les coupes de forages rapides en permettant d'identifier et de localiser les matériaux d'un site par référence aux données de sondages étalons ; les paramètres mesurés ne sont

pas directement utilisables en géomécanique : au moyen de ces diagraphies, on peut identifier les matériaux traversés par un sondage ou tout au moins en préciser la nature et la position, les comparer, préciser les profondeurs des contacts entre matériaux différents et établir des corrélations entre les sondages effectués dans un même site ; elles permettent aussi de rétablir les coupes d'anciens sondages, à condition qu'ils aient été préalablement tubés de façon définitive. Les valeurs réelles ponctuelles des paramètres mesurés importent peu mais seulement leurs variations ; l'interprétation est subjective et doit s'appuyer sur d'autres observations. Comme les mesures de résistivité à la surface du sol, la diagraphie de résistivité électrique permet de distinguer une roche non argileuse, plus résistive qu'une roche argileuse, ou un niveau plus argileux dans une masse rocheuse apparemment homogène. La diagraphie de polarisation spontanée permet de mettre en évidence les phénomènes électriques induits par la filtration des fluides dans les géomatériaux ; elle donne ainsi des indications précieuses sur leur perméabilité et notamment sur les différences de perméabilité entre les divers niveaux d'un massif hétérogène. La comparaison des graphiques de résistivité et de polarisation spontanée, issus d'un même sondage, permet de bien préciser l'identité et la position des niveaux essayés. Si l'on excepte les minerais radioactifs qui ne nous intéressent pas ici, la diagraphie de radioactivité naturelle fournit le même type de renseignements que celle de résistivité électrique ; elle permet en effet de distinguer les matériaux argileux, plus ou moins radioactifs, de ceux qui le sont moins ou ne le sont pas et les niveaux, plus ou moins argileux, des formations hétérogènes, car les minéraux argileux contiennent des éléments radioactifs comme le ^{40}K . Son avantage sur la diagraphie de résistivité est de pouvoir être réalisée dans un sondage tubé et donc dans des matériaux bouillants.

Les diagraphies de microsismique et de radioactivité induite

Au moyen des diagraphies de microsismique et de radioactivité induite, on mesure des paramètres directement utilisables ; la vitesse sismique est liée au coefficient d'élasticité local du matériau ; le taux d'absorption de rayons γ et de ralentissement de neutrons émis par une source d'intensité constante, est lié à la densité du matériau et à sa teneur en eau. Il est bien entendu nécessaire d'effectuer un étalonnage des résultats de ces diagraphies, en les comparant aux résultats d'essais de laboratoire.

► **Les essais *in situ***

On exécute des essais *in situ* ponctuellement sur le sol ou par l'intermédiaire de forages généralement rapides pour mesurer de nombreux paramètres et données géomécaniques, généralement spécifiques des problèmes que l'on se pose et des appareils utilisés.

Les essais sismiques

Les essais sismiques dans les sondages se pratiquent dans les matériaux rocheux ; leurs résultats sont complémentaires ou substitutifs de ceux des sondages sismiques ; ils permettent aussi de préciser le modèle géomécanique d'un site. Leurs matériels et procédures sont très spécifiques, leurs mises en

œuvre et leurs exploitations sont affaires de spécialistes ; on n'en réalise donc que dans des cas difficiles, pour préciser des modèles de sites complexes et/ou très encombrés dans lesquels on envisage de construire des ouvrages importants comme les galeries en ville où l'on n'a pas la place et la tranquillité d'exécuter des sondages sismiques, ou bien sur des structures complexes à l'échelle régionale pour les études de grands ouvrages profonds comme les tunnels de montagne...

Le profil sismique vertical

Pour réaliser un profil sismique vertical, on place dans un forage un chapelet de petites charges d'explosif que l'on tire successivement et en surface, une chaîne de géophones, ou bien on fait l'inverse, géophones dans le forage et tirs en surface ; les mesures et l'exploitation sont analogues à celles d'un sondage sismique de surface.

L'essai sismique ponctuel

L'essai sismique ponctuel se pratique au moyen d'une sonde émettrice/réceptrice placée à une profondeur déterminée, noyée dans l'eau de la nappe, dans le fluide du forage ou, si ce dernier est sec, plaquée par un vérin contre sa paroi. On mesure ainsi la vitesse sismique locale du matériau à chaque profondeur à laquelle on place la sonde. Très difficile à mettre en œuvre correctement, fournissant des mesures souvent douteuses, on lui préfère généralement, si possible, la détermination de cette vitesse sur un échantillon au laboratoire qui ne fournit pas toujours un meilleur résultat.

L'essai sismique de forage à forage

L'essai sismique de forage à forage consiste à placer dans deux forages parallèles voisins, à la même profondeur, une sonde émettrice dans l'un et une sonde réceptrice dans l'autre ; on mesure ainsi la vitesse sismique moyenne du géomatériau entre les deux forages à cette profondeur ; en la faisant varier, on obtient, un panneau sismique beaucoup plus détaillé qu'au moyen de sondages sismiques.

La tomographie sismique

La tomographie sismique de sondage se pratique entre deux forages, pour obtenir des résultats analogues, mais beaucoup plus détaillés ; elle est censée donner une image fidèle de la structure du sous-sol, notamment en fournissant la vitesse sismique quasi ponctuelle du géomatériau dans tout le panneau entre les deux forages. Mais comme la tomographie sismique de surface, elle impose un matériel et une mise en œuvre beaucoup plus complexes ; l'exploitation des mesures demande d'importants moyens informatiques en raison de la difficulté et du volume des calculs nécessaires.

Les essais mécaniques

Les essais mécaniques fournissent des valeurs de paramètres directement utilisables dans certains calculs de géomécanique mais qui sont généralement spécifiques de l'appareil et des procédures correspondants.

L'essai de plaque

L'essai de plaque consiste à charger progressivement une plaque posée à même le sol, sur une plate-forme de remblais ou en fond de fouille, et à mesurer son enfoncement en fonction de la charge, éventuellement jusqu'à la rupture, dans un laps de temps ou jusqu'à un accroissement de déplacement fixés ; on limite l'usage de cet essai à l'étude du comportement des plates-formes et chaussées routières. Le module de Westergaard que l'on en tire n'est pas un paramètre intrinsèque du géomatériau car sa valeur dépend aussi des dimensions de la plaque et de la procédure d'essai ; néanmoins on l'utilise parfois imprudemment comme paramètre de raideur du sol d'assise d'une fondation.

Le SPT (Standard Penetration Test)

Le SPT est un essai de battage en fond de sondage d'un carottier standard de petit diamètre, dans des matériaux meubles plus ou moins bouillants ; le matériel et la procédure d'essai sont dits standards mais en fait ils varient d'un pays à l'autre et même d'une région ou d'un organisme à un autre ; moyennant quelques précautions, le contrôle du battage de la colonne de tubage du sondage peut remplir une fonction analogue qui est plus généralement celle du pénétromètre dynamique. Au moyen d'un abaque, le résultat de cet essai rudimentaire conduit directement à la capacité portante d'une semelle filante, selon sa largeur et sa profondeur d'encastrement ; l'accepter ainsi est lui faire une confiance excessive ; il est plus sage de se contenter d'en tirer une grossière indication qualitative de la compacité relative du géomatériau ainsi carotté.

Le dilatomètre ou pressiomètre

Le dilatomètre mesure la déformation d'une portion de paroi de forage non tubé ou de tube lanterné, en fonction de la pression que l'on y applique, au moyen d'une cellule dilatante placée à une profondeur donnée ; c'est plus ou moins le pendant du triaxial de laboratoire. Quand l'appareil le permet selon le géomatériau auquel il est confronté, l'essai parcourt l'ensemble de la relation pression/déformation, depuis la déformation pseudo-élastique jusqu'à la rupture, en passant par la déformation plastique ; l'exploitation des résultats peut se faire selon la théorie générale de la plasto-élasticité, aussi bien à la main qu'à l'ordinateur.

Le pressiomètre en est une version française mal nommée, car ce mot suggère l'inverse de ce que fait l'appareil, mesurer une déformation : la pression est la cause et la déformation, l'effet. L'ensemble forage/appareil/essai/théorie du pressiomètre est présenté comme un système autonome d'étude géotechnique, ce qui n'est éventuellement acceptable que pour des fondations courantes dans des sites bien connus : au moyen de cet appareil, on mesure des paramètres spécifiques, module pressiométrique, pression de fluage et pression limite du géomatériau à la profondeur de l'essai ; on utilise les valeurs obtenues dans des formules d'applications issues de la théorie restreinte développée de façon autonome. On utilise parfois un ensemble électro-informatique qui pilote l'appareil, enregistre les mesures, les exploite, calcule la capacité portante d'une fondation.

Le scissomètre

Le scissomètre est un appareil plus rustique et plus confidentiel qui mesure le couple résistant en fonction de l'angle de rotation d'un moulinet enfoncé à la pression ou au battage en fond de sondage ou directement à la pression à travers des matériaux très mous pratiquement impossibles à carotter et dans lesquels les parois de forage sont particulièrement instables ; c'est un peu l'équivalent de la boîte de Casagrande du laboratoire ; on détermine ainsi la résistance au cisaillement du matériau à la pression qui règne naturellement à la profondeur de l'essai, seule une pression verticale est possible ; on peut néanmoins en tirer la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau en place selon la forme de la courbe couple/angle qui caractérise aussi l'état naturel de ce matériau. C'est le seul essai mécanique fiable dans un matériau très mou, tant *in situ* qu'au laboratoire.

Pour rapprocher davantage cet essai de celui à la boîte, on a construit des appareils bizarres alliant une cellule de pression à des ailettes de cisaillement horizontales ou verticales ; leur usage est demeuré confidentiel car leurs résultats ne sont pas très convaincants.

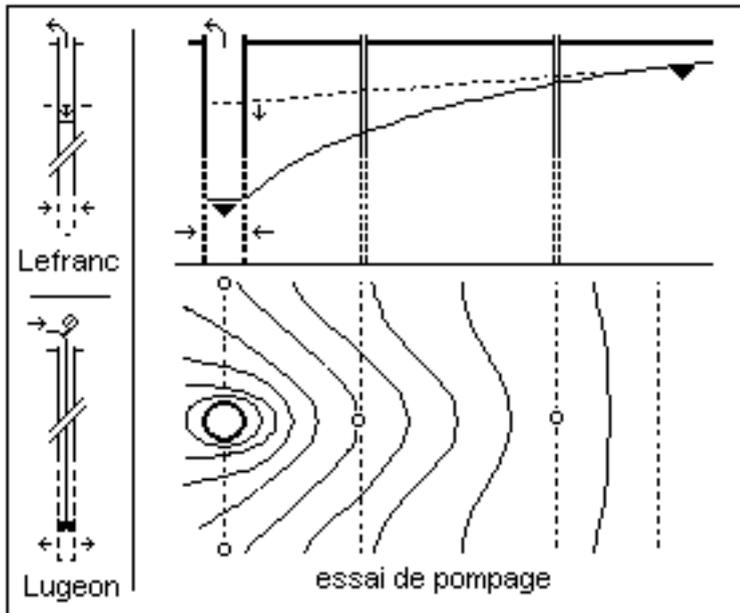
Les essais hydrauliques

Figure 5.5.3.1.6.3. – Essais hydrauliques

De tous les essais géotechniques, les essais hydrauliques sont les seuls qui ne peuvent pas être réalisés convenablement au laboratoire, en dehors de matériaux très peu perméables comme les argiles ; cela tient à ce qu'il est pratiquement

impossible de prélever des échantillons représentatifs de matériaux boullants et perméables comme les sables et les graves, ou fragiles comme les roches fissurées, dont la détermination de la perméabilité est indispensable en hydraulique souterraine.

L'essai Lefranc ou de perméabilité

On réalise un essai Lefranc à l'avancement en fond de sondage en cours d'exécution, dans des matériaux boullants, aquifères ou secs, à la pression atmosphérique. Pour les perméabilités supérieures à 10-4 m/s on travaille à niveaux et débits de pompage ou d'injection constants, pour les perméabilités inférieures, à niveau variable, montant ou descendant ; ces procédures ne sont pas interchangeables ; les sondeurs préfèrent les essais à niveau variable descendant par facilité de chantier, au détriment de la qualité du résultat si les conditions naturelles n'y sont pas adaptées. Pour essayer d'aller vite en préservant la qualité, on a construit des appareils compliqués permettant de réaliser des essais à niveau variable dans les matériaux très perméables ; les résultats n'en ont jamais été très convaincants. Dans les matériaux perméables, pour des études d'exploitation ou d'épuisement, seul l'essai à niveaux et débits constants par pompage, donne de bons résultats ; l'allure de la courbe peut aussi donner d'autres précieux renseignements comme le passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent, l'aptitude du matériau au colmatage ou à la boullance, l'alimentation du sondage, les variations du niveau de la nappe...

L'essai Lugeon

Pour réaliser un essai Lugeon, on injecte de l'eau à pressions et débits constants, dans des roches fissurées, peu perméables en utilisant un obturateur simple ou double ; cet essai a été mis au point pour les études d'étanchéité des assises de barrages et il mesure un paramètre spécifique, le lugeon, qui rend compte de la perméabilité de la roche ; en interprétant une essai Lugeon comme un essai de perméabilité, on peut exprimer le lugeon en m/s.

L'essai de pompage

Les essais Lefranc et Lugeon sont ponctuels et, même en les multipliant dans un site donné, il est difficile d'estimer correctement par eux seuls la perméabilité moyenne d'une nappe ou même d'un secteur peu étendu. On le fait en réalisant un essai de pompage à débits et niveaux constants croissants, par paliers si possible stabilisés, sur un puits filtrant entouré de piézomètres, si possible répartis régulièrement sur l'ensemble du secteur étudié ; on provoque ainsi des rabattements de nappe dont on peut tracer les cartes et coupes piézométriques.

5.5.3.2 L'instrumentation permanente

L'étude des mouvements d'eau souterraine, de terrain et d'ouvrages ainsi que quelques essais très spécifiques, imposent que l'on place des appareils d'observation ou de mesures, en des points particuliers sur le sol, sur une paroi rocheuse, dans un forage tubé de façon définitive au moyen de tubes plus ou moins spécifiques des essais à réaliser, sur un ouvrage... Il s'agit d'appareils

très rudimentaires ou très compliqués et ce ne sont pas toujours ces derniers qui sont les plus efficaces. Les mesures sont prises à la main au coup par coup, enregistrées de façon continue sous forme analogique ou numérique, parfois télétransmises. Leur exploitation est embarrassante et peu fiable, souvent négligée ; le diagramme paramètre/temps n'est pas toujours invariablement monotone, à peu près linéaire et à pente relativement faible : ses variations sont généralement plus ou moins rapides et on admet alors que plus elles sont grandes, plus un événement dommageable est proche ; cela est souvent vrai mais pas toujours : à une période d'accélération peut succéder une période de ralentissement qui peut aller jusqu'à la pente nulle, le phénomène n'évolue plus ou même régresse si la pente s'inverse. Par ailleurs, les appareils sont souvent peu fiables, fragiles ou vite saturés et ne se manifestent parfois que parce qu'ils ont été bloqués, arrachés, détruits... par l'événement qu'ils devaient aider à prévoir, éboulement, assèchement de captage... : on ne regarde les diagrammes qu'après que l'événement se soit produit pour s'apercevoir qu'on aurait pu l'éviter si l'on avait été plus attentif et/ou plus compétent. L'instrumentation permanente de terrain est une méthode qu'il est indispensable de mettre en œuvre quand cela est possible, mais elle ne conduit pas nécessairement à un résultat sûr.

► **Les piézomètres**

Le plus souvent simples tubes crépinés équipés ou non de limnigraphes, les piézomètres sont utilisés pour contrôler les variations de niveau des nappes souterraines dans le temps, naturelles ou par pompage ; des cellules piézométriques plus complexes reliées hydrauliquement ou électroniquement à un appareil de contrôle, permettent de mesurer ponctuellement les variations de pression interstitielle dans les matériaux argileux peu perméables de massifs en équilibre instable.

► **Les appareils d'optique, géométriques et mécaniques**

Les mesures de déformations et de déplacements qui permettent de surveiller les talus et falaises instables naturellement ou à la suite de travaux ainsi que les ouvrages menacés ou subissant des dommages liés au site, généralement des tassements, se font par des opérations périodiques ou continues de topographie et/ou de photographie, et/ou au moyen d'appareils de divers types et modèles, enregistreurs ou non, extensomètres, fissuromètres, tassomètres, deflectomètres, inclinomètres, lasers, balises GPS... (Fig. 3.1.2.6) ; les mesures de contraintes se font au moyen de dynamomètres, capteurs de pression...

5.5.4 Les essais de laboratoire

Pour paramétrer les multiples aspects physiques d'un géomatériau, on dispose d'un grand nombre d'essais de laboratoire et on en invente tous les jours ; on les réalise selon des procédures et au moyen d'appareils dûment normalisés, à partir d'échantillons remaniés ou « intacts ».

5.5.4.1 Les essais d'identification

Les essais d'identification permettent de préciser la nature d'un géomatériau et ainsi d'une part de le rattacher à un type et d'autre part d'achever le modèle du site en précisant ses hétérogénéités. Ce sont les observations minéralogiques et pétrographiques, les essais physico-chimiques et géotechniques au sens restreint ; chacun d'eux concerne un aspect particulier du matériau qu'il importe ou non de connaître selon le matériau et le genre d'étude que l'on réalise. Ils sont spécifiques, indépendants de toutes considérations théoriques et en principe aussi de l'appareil de mesure qui est soit un appareil particulier, soit un appareil de physique courante. La plupart d'entre eux peuvent être réalisés sur des échantillons remaniés.

Selon le problème à résoudre, on peut choisir de ne réaliser que ceux qui sont nécessaires et suffisants : dans le cas de l'analyse d'une grave pour un projet de captage d'eau, de rabattement de nappe ou d'injection, on effectue un examen à la loupe de l'échantillon puis on détermine sa densité, sa porosité, sa granulométrie et si possible, sa perméabilité ; dans le cas de l'utilisation de cette grave comme matériau de remblai, on l'examine encore à la loupe et on établit sa granulométrie, mais ensuite on effectue un essai d'équivalent de sables, un essai Proctor, un essai CBR... ; dans le cas de l'analyse d'une argile pour l'étude de stabilité d'un talus, on effectue ou non une diffraction de rayons X, puis on détermine généralement sa densité, sa teneur en eau, sa granulométrie, ses limites d'Atterberg, sa teneur en calcaire (*Fig. 2.3.1.2*)... ; dans le cas d'un calcaire que l'on veut utiliser comme matériau de chaussée, on effectue un examen pétrographique en lame mince, on mesure sa densité, sa dureté, sa porosité, on exécute des essais de pierres, Deval ou Los Angeles, de gélivité...

5.5.4.2 Les essais mécaniques

Au deuxième groupe d'essais appartiennent ceux qui permettent de préciser le comportement mécanique du géomatériau, en observant les déformations qu'il subit sous l'effet d'efforts extérieurs, éventuellement jusqu'à la rupture ; on doit les réaliser sur des échantillons dits « intacts » qui en fait, ne le sont jamais.

L'œdomètre permet d'observer le tassement puis le gonflement d'un échantillon confiné et drainé ; on en tire les valeurs de plusieurs paramètres qui permettent le calcul dans l'espace et le temps, du tassement prévisible des fondations d'un ouvrage ; et cela marche plutôt bien, ce qui mérite d'être souligné en géotechnique ; il est vrai que Terzaghi est à l'origine du procédé ; ceci explique peut-être cela !

Pour mesurer les paramètres de rupture, angle de frottement et cohésion d'un géomatériau on fait des essais de cisaillement au moyen de la boîte de Casagrande ou de résistance à la compression simple au moyen d'une presse sans confiner l'échantillon ; si on le confine, l'essai à la presse est dit triaxial et prétend entre autres, reconstituer les conditions aux limites de l'échantillon dans le sous-sol, avant son prélèvement ; l'essai à la boîte et l'essai triaxial sont les objets de multiples raffinements d'exécution, selon que l'échantillon est consolidé ou non, drainé ou non et que l'essai est plus ou moins rapide. Drainage et rapidité sont

souvent confondus voire employés comme des synonymes ; la consolidation, le drainage et/ou la rapidité sont normalisés mais d'une façon qui n'a rien à voir avec un quelconque comportement naturel ; en fait, selon le temps mis pour expulser plus ou moins l'eau de l'échantillon, c'est-à-dire selon la perméabilité du matériau et la patience de l'opérateur, on obtient des couples c/j différents ; si l'essai est rapide et/ou le matériau peu perméable, on obtient plus de c et moins de j ; si l'essai est lent et/ou le matériau perméable, on obtient plus de j et moins de c ; ainsi, un matériau serait cohésif quand on l'a manipulé avec brutalité et frottant quand on l'a ménagé ; les effets du drainage compliquent un peu plus les choses ; on contrôle ou non la pression interstitielle et on parle de contrainte effective ou totale. Sur un même matériau, en associant plus ou moins de consolidation, de drainage, de contre-pression, de rapidité et beaucoup de naïveté, on peut obtenir des couples c/φ , c'/φ' , c_{cd}/φ_{cd} , c'_{cd}/φ'_{cd} , c_{cu}/φ_{cu} , c'_{cu}/φ'_{cu} , c_{uu}/φ_{uu} , c'_{uu}/φ'_{uu} . un peu différents les uns des autres ; on n'utilise en principe que deux d'entre eux, c'/φ' et c_{uu}/φ_{uu} , dans des calculs pas tout à fait les mêmes qui, du reste, ne font généralement référence qu'à un couple c/φ indéterminé. Aucun de ces couples n'est très représentatif de la rupture réelle, à la surface de laquelle quoi que l'on fasse, on constate fort logiquement que la cohésion disparaît et que le frottement est rémanent. Cela laisse un peu perplexe mais ce n'est pas très grave ; Skempton constatait que les résultats d'essais de cisaillement n'étaient jamais confirmés par les mesures et observations de terrain ; Terzaghi trouvait même tout cela peu sérieux : dans les cas simples, il recommandait de s'en tenir à l'angle de talus pour les matériaux frottants et à la compression simple pour les matériaux cohésifs ; Coulomb lui-même conseillait de plus se fier à l'observation qu'au calcul ; c'était sans doute leur façon d'exprimer que la précision géomécanique n'est dans l'ensemble et là en particulier, ni très remarquable, ni très importante.

Pour des raisons tant pratiques qu'économiques, on effectue rarement un nombre statistiquement significatif d'essais à la boîte ou au triaxial et l'on se contente souvent d'essais moins orthodoxes donnant des couples angle/cohésion tout à fait présentables : on utilise parfois deux petits instruments sur socles au laboratoire, manuels sur chantier, un pénétromètre étalonné en résistance à la compression simple et un scissomètre étalonné en résistance au cisaillement ; l'essai de résistance à la compression simple se pratique sur un échantillon qui doit être suffisamment consistant pour ne pas se déformer sous l'effet de son propre poids ; on lui adjoint parfois un essai de fendage ou brésilien pour préciser le couple angle/cohésion.

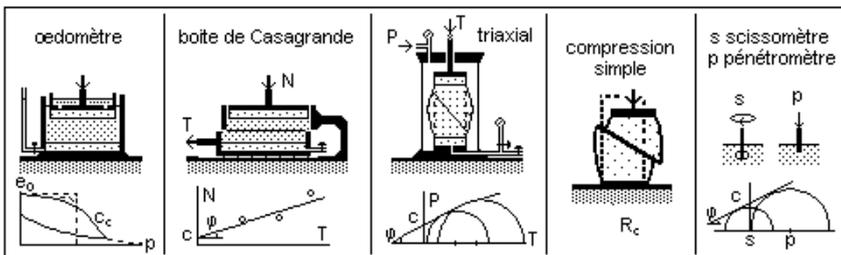


Figure 5.5.4.2 – Essais mécaniques de laboratoire

La résistance à la compression simple est le paramètre pratique qui caractérise le mieux les matériaux très résistants à rupture fragile et plus généralement, tous ceux qui sont cohésifs. Sur des échantillons rocheux, on peut réaliser des essais rapides et assez fiables au moyen d'un scléromètre à béton ou d'une presse Franklin, étalonnés en résistance à la compression simple. Sur les matériaux de remblais, parallèlement à l'essai de compactage Proctor, on exécute souvent un essai CBR (*Californian Bearing Ratio*) qui consiste à établir la relation résistance/poids volumique en poinçonnant le matériau à chaque palier Proctor ; c'est donc aussi un essai pénétrométrique étalonné pour donner la résistance à la compression simple du matériau en fonction de sa teneur en eau.

5.5.6 L'informatique

Naguère, le travail de bureau pour l'exploitation des renseignements recueillis sur le terrain et au laboratoire et pour la mise en forme des résultats ne paraissait pas devoir être l'objet de commentaires. Tout le monde utilisait du papier, un crayon et des méthodes de calcul analogues ; on pouvait vérifier les résultats présentés, éventuellement les reprendre, préciser une obscurité, corriger une erreur...

L'informatique a changé tout cela. Il circule de nombreux logiciels de traitement des mesures et de calcul des solutions aux problèmes posés, qui font les mêmes choses avec plus ou moins de bonheur et ne sont pas transparents ; en cas de résultat douteux, on ne peut plus effectuer de vérification, sinon en refaisant tourner le programme ; cela ne peut éliminer que d'éventuelles erreurs de saisies. La mise en forme et l'édition des résultats sont automatiques ; la rédaction du rapport est l'œuvre d'un système-expert : on ne sait donc plus très bien qui, du géotechnicien, de sa secrétaire ou de l'informaticien, a réalisé l'étude. Cette informatique intégrée impose la standardisation de l'étude géotechnique ; elle est mal adaptée à la variété et à la spécificité des problèmes à résoudre, dues à la singularité de tout site et à celle de toute construction. Pour personnaliser des conclusions nécessairement originales, le géotechnicien doit donc profiter des facilités de travail que lui procure l'informatique, tout en demeurant très critique à son égard.

Il aura dû auparavant choisir et mettre en œuvre quelques-unes des multiples techniques d'études dont il dispose. Le métier de géotechnicien n'est pas de tout repos.

5.6 Le résultat

Quand on a construit le modèle géotechnique du site, on aborde la dernière phase de l'étude, la résolution des problèmes spécifiques que pose la construction de l'ouvrage ; la plupart des solutions à ces problèmes sont obtenues par le calcul, sur la base de modèles géomécaniques, formules ou logiciels, associant les données mesurées *in situ* et/ou sur échantillons et les particularités techniques du projet : au moyen des caractéristiques hydrogéolo-

riques et hydrauliques du sous-sol d'une plaine alluviale, on calcule un ouvrage de captage propre à assurer la production souhaitée ; au moyen des caractéristiques mécaniques de ce sous-sol, on calcule à différentes profondeurs, la pression de service et le tassement des fondations d'un bâtiment... Il s'agit ensuite de donner des solutions réalisables aux problèmes, c'est-à-dire d'adapter les solutions théoriques aux contraintes spécifiques de construction de l'ouvrage : selon la façon dont on souhaite réaliser l'installation et selon le programme d'exploitation prévu, le captage peut être un forage filtrant, une batterie de puits filtrants, un puits à drains rayonnants... ; le bâtiment, s'il est léger et susceptible de subir sans dommage l'effet de faibles tassements différentiels, peut être fondé superficiellement et à faible pression ou s'il est lourd et mal adapté aux tassements différentiels, sur le substratum en profondeur et à forte pression. Entre plusieurs solutions théoriques équivalentes, on choisit celle qui convient le mieux à l'ouvrage projeté.

L'étude théorique d'un cas réel implique que l'on réduise le problème concret dans lequel tous les paramètres possibles seraient pris en compte, à un problème abstrait pour la résolution duquel on n'utilise qu'un nombre restreint de paramètres. Il est donc nécessaire de faire appel à des hypothèses simplificatrices, permettant de sélectionner certains paramètres, et de graduer leurs influences relatives. Ensuite, les calculs ne seront possibles que dans des cas théoriques simples, plus ou moins éloignés de la réalité. Il ne saurait donc être question d'obtenir ainsi un résultat exact, mais seulement d'essayer d'établir ce que l'on suppose et de vérifier que ce que l'on pense n'est pas trop déraisonnable ; ce résultat n'est ainsi qu'un ordre de grandeur, traduisant une image grossière de ce qui pourrait être si l'on n'a pas négligé de paramètre important et employé d'hypothèse farfelue.

5.6.1 Qualité du résultat

Avoir correctement organisé et réalisé une étude géotechnique n'est toutefois pas suffisant pour assurer la qualité de son résultat : aussi parfaite que soit cette étude, il ne peut que réduire au mieux les aléas de la construction de tout ouvrage ; il ne sera validé que quand l'ouvrage, toujours unique, aura été construit et aura vécu le temps prévu, sans être endommagé ; il doit donc être exprimé en terme de probabilité ; le doute et la circonspection sont les attitudes constantes du géotechnicien.

Comme les faits risquent parfois d'infirmar au moins partiellement le résultat, la surveillance du chantier et de la mise en service de l'ouvrage par le géotechnicien ayant participé à l'étude du projet, est la suite logique et indispensable de l'étude. Elle l'est pour l'exécution du projet, afin de recueillir de nouveaux renseignements révélés par les travaux, les comparer aux résultats issus des hypothèses proposées lors de l'étude, les intégrer à la synthèse ou bien éventuellement modifier cette synthèse pour qu'elle ne demeure pas en contradiction avec de nouvelles observations inattendues ; elle l'est aussi pour utiliser la documentation recueillie lors de l'étude et de l'exécution du projet, afin de régler au mieux des intérêts de chacun, de fréquents contentieux qui opposent

maîtres d'ouvrage et entrepreneurs pour le règlement de travaux en relation avec le sous-sol ; elle l'est enfin pour que, vis-à-vis du maître d'œuvre, la responsabilité du géotechnicien soit engagée : en cas de dommage à l'ouvrage, lors de sa construction ou après, il serait difficile d'engager celle d'un géotechnicien dont le rôle se serait borné à remettre au maître d'ouvrage le compte rendu d'une étude si détaillée soit-elle, sans qu'il ait été ensuite au moins tenu au courant de son utilisation, de façon à pouvoir faire éventuellement part de ses observations, et sans qu'il ait pu vérifier si ce qu'il a conseillé a été rigoureusement exécuté.

5.6.2 Critère de qualité

Le meilleur critère de qualité du résultat d'une étude géotechnique est l'efficacité de son utilisation pour la construction de l'ouvrage. Une étude géotechnique est en effet un acte technique ; elle vise à atteindre sélectivement un but pratique et non à obtenir des renseignements pour accroître systématiquement la connaissance d'un phénomène. Atteindre ce but constitue le résultat, unique comme ce but lui-même ; la critique du résultat d'une étude géotechnique ne peut donc être indépendante de son but.

Étudier une nappe d'eau souterraine en tant que telle, sans autre but que de la bien connaître, permet toujours d'obtenir des renseignements scientifiques intéressants quels qu'ils soient, pour peu que la manière de les obtenir ait été intellectuellement et techniquement acceptable ; ces renseignements peuvent être plus ou moins nombreux et en fait leur nombre ne peut être défini *a priori* ; on les prend pour ce qu'ils sont, comme ils se présentent. Par contre, étudier en détail en vue de son exploitation, une nappe d'eau souterraine dont on connaît ou non les caractères généraux, ne peut conduire à un résultat acceptable, c'est-à-dire conforme au but que l'on s'est fixé, que si précisément, on atteint ce but, c'est-à-dire que si l'on peut clairement montrer soit qu'il est possible d'extraire de cette nappe la quantité d'eau souhaitée, soit qu'une telle quantité ne pourra jamais en être extraite. En l'occurrence, répondre ainsi par oui ou par non et quelle que soit la réponse, est avoir atteint le but de l'étude ; répondre non n'est pas un échec de l'étude mais de la prospection. Demeurer imprécis, revient à ne pas avoir atteint le but de l'étude puisque l'on n'a pas complètement résolu le problème posé ; cela risque de provoquer inutilement l'entreprise d'une étude ultérieure visant à obtenir une réponse définitive au problème posé et qui sera peut-être négative.

Même si une étude n'est apparemment pas critiquable sur le plan intellectuel et sur le plan technique, elle peut en fait être critiquée si son but n'est pas atteint, c'est-à-dire si son résultat est imprécis ou incomplet. La valeur scientifique d'un résultat incomplet est généralement intéressante ; sa valeur technique ne l'est jamais. Techniquement, un tel résultat peut se révéler dangereux comme quand on envisage de fonder un immeuble sur une formation localement reconnue assez résistante, sans s'assurer de son homogénéité, de sa continuité et de son épaisseur.

Ne pas atteindre un but technique, c'est soit avoir mal posé un problème, c'est-à-dire avoir commis une erreur intellectuelle de conception, soit l'avoir mal

résolu, c'est-à-dire avoir commis une erreur intellectuelle ou technique d'exécution. Or, le but d'une étude géotechnique est d'adapter un ouvrage à un site. Un tel but est pratiquement inaccessible ; on doit se contenter de l'approcher autant que le permettent les moyens intellectuels et matériels dont on dispose au moment de l'étude. Si donc le but ne peut être tout à fait atteint, on ne peut *a fortiori*, espérer obtenir d'une étude géotechnique qu'un résultat imparfait. La perfection qui paraît-il n'est pas de ce monde, ne l'est particulièrement pas du monde géotechnique. Ce point de vue pessimiste doit être tempéré en considérant qu'il empêche que l'on prenne ses désirs pour des réalités, ce qui conduit généralement le géotechnicien à des déboires et l'ouvrage, à des dommages.

Il est vain de chercher à obtenir un résultat géotechnique précis ; pourtant les constructeurs le souhaitent ; le droit l'exige péremptoirement mais inconsidérément ; certains géotechniciens trop peu pragmatiques pensent y parvenir et d'autres peu scrupuleux prétendent y arriver. Les divers moyens d'analyse de la géotechnique ne permettent pas non plus d'atteindre des résultats intermédiaires indiscutables ; quoi que l'on fasse, toute étude expérimentale est affectée d'erreurs systématiques et aléatoires ; on n'est pas très loin de la démarche préscientifique qui enchaînait des phases d'essais et d'erreurs ; par tâtonnement, elle permettait toutefois d'amoindrir l'erreur à chaque phase ; c'est ce qui l'a longtemps rendue efficace ; c'est sans doute un peu comme cela que l'on peut arriver à rendre la géotechnique fiable mais c'est évidemment dangereux.

Le souhait fréquemment formulé lors de l'étude d'un ouvrage, d'obtenir une précision géotechnique comparable à celle de la résistance des matériaux, de la mécanique ou de l'hydraulique technique, est donc vain : on ne calculera jamais avec la même précision le tassement du sous-sol qui supportera un immeuble et la structure en béton armé de cet immeuble, et on saura toujours mieux ce qu'il se passe dans un réseau d'adduction d'eau que dans le terrain aquifère entourant le puits qui l'alimente.

Ce qui ne veut pas dire qu'il soit vain d'essayer d'accroître toujours davantage la qualité du résultat géotechnique. Bien au contraire, l'effet stimulant de cet essai permanent est nécessaire pour faire progresser cette science et justifier de plus en plus l'intérêt de ses applications. En géotechnique comme ailleurs, on souhaite toujours en vain atteindre une vérité que l'on voudrait absolue et qui ne peut-être que relative puisque, à un moment donné, elle n'est jamais qu'une probabilité dépendant de notre niveau de connaissance et de notre capacité d'analyse et de synthèse.

5.6.2.1 Les théories et les lois

Les théories géotechniques et les quelques lois simples qui en sont issues, ont une origine opportuniste ; à un moment donné, un homme a essayé de comprendre un phénomène naturel local pour résoudre un problème technique spécifique auquel il était confronté. Darcy a formulé sa loi car il avait dû résoudre le problème de l'alimentation en eau de Dijon et Terzaghi, celui du tassement des constructions lors de l'extension de Vienne.

La généralisation des théories géotechniques et des formules de calcul qui les synthétisent, impose donc qu'on les manipule avec beaucoup de prudence ; aucune nappe aquifère n'est identique à celle de la plaine de Bourgogne et aucun sous-sol compressible ne l'est à celui des bords du Danube ; aucun problème de pompage dans une nappe ou de tassement n'est identique à un autre ; il en va de même de quel problème géotechnique que ce soit.

Pour obtenir un résultat, l'utilisation des théories et des lois géotechniques impose la construction de modèles de sites, la définition de paramètres caractérisant les matériaux de son sous-sol, leur mesurage et l'exploitation de tout cela dans le système qu'elles représentent ; elle doit donc être très prudente et soumise à une critique permanente.

5.6.2.2 Représentativité des modèles

Pour construire le modèle d'un site, on privilégie ceux de ses aspects qui sont utiles à la résolution du problème posé. Le même site géographique peut faire l'objet de modèles géotechniques différents ; au même endroit dans une plaine alluviale, le site d'un pompage d'eau de la nappe a des limites bien plus éloignées de lui que celui du champ de contraintes sous un immeuble. Dans les deux cas, le même matériau est impliqué, mais pas le même phénomène ; il subit donc des effets différents auxquels il répond différemment ; l'intégration dont est issue la formule permettant d'apprécier sa réponse, imposerait que l'on connaisse les valeurs aux limites du champ correspondant. Il est extrêmement difficile voire impossible de les atteindre ; pour rendre manipulable le modèle déjà très schématique, on doit généralement le simplifier davantage, notamment en lui donnant des limites géométriques simples qui n'ont souvent que des rapports lointains avec la réalité ; le cercle de glissement ou la spirale de butée en sont des exemples. On obtient ainsi des formules simples délivrant des résultats qui ne sont que de grossières approximations.

L'appréciation de la valeur d'un modèle géotechnique et de sa représentativité, est donc particulièrement difficile et, sans doute pour cela, délibérément ignorée ; cela conduit presque toujours à un résultat douteux. Le forage produit actuellement le débit souhaité, l'immeuble tasse peu ; que se passera-t-il dans six mois, dans dix ans... ? Les réponses sont différentes suivant que la nappe est plus ou moins étendue, plus ou moins bien alimentée et que le matériau compressible sous l'immeuble est plus ou moins hétérogène, plus ou moins épais...

Il est donc clair que la précision du résultat d'une étude dépend en premier lieu de la représentativité du modèle utilisé.

5.6.2.3 Représentativité des paramètres

Après la critique du modèle, se pose la question de la représentativité des paramètres que l'on mesure *in situ* ou sur échantillons. Ces paramètres sont nombreux et variés ; certains sont mesurables et d'autres non, selon la technique qui les définit et l'on saisit souvent très mal ce qu'ils caractérisent et leurs relations. Or, ces paramètres sont dépendants puisqu'ils se rapportent à un

même objet, le matériau de l'ensemble ; leurs valeurs sont donc liées, même si leurs relations ne peuvent pas se formuler mathématiquement. Ainsi, de la géologie générale à la géomécanique, on peut caractériser un matériau par un certain nombre de paramètres spécifiques dont les valeurs ne varient que dans d'étroites limites.

La géologie décrit la formation du Sparnacien du Bassin parisien ; la pétrographie s'intéresse à la roche qui constitue cette formation dans la partie centrale de la région, l'argile plastique ; elle dit que c'est une argile détritique donc assez hétérogène, plus ou moins sableuse selon l'endroit et passant latéralement à des sables vers le Sud ; la minéralogie et la géochimie caractérisent ce matériau par son fort pourcentage de kaolinite ; la géophysique le fait par une faible résistivité électrique, une forte radioactivité et une faible vitesse sismique ; la géomécanique, par un indice de plasticité moyen, un faible angle de frottement, un bas module pressiométrique et par le fait que la valeur de sa cohésion dépend de celle de sa teneur en eau ; du point de vue de l'hydraulique enfin, on retient sa très faible perméabilité.

Les deux premiers paramètres, formation et roche, sont qualitatifs alors que les autres sont quantitatifs ; parce que l'on attribue une valeur supérieure à ce qui est chiffré, on pense généralement que les seconds sont plus précis et représentent mieux le matériau auquel ils se rapportent. En fait, il n'en est rien et de la géologie générale à la géomécanique, la représentativité des paramètres décroît ; en effet, si le concept de formation contient celui de la roche qu'elle renferme et si le concept d'une certaine roche contient dans certaines limites, les valeurs de tous les paramètres qui s'y rapportent, une valeur d'un certain paramètre ne représente jamais une roche et une seule, ni même un seul type de roche : l'argile sparnacienne présente à coup sûr une faible résistivité mais toutes les roches dont la résistivité est faible ne sont pas l'argile sparnacienne ; mesurer un paramètre ne peut en aucune façon servir à identifier un matériau mais seulement à le caractériser. Réaliser une étude géotechnique en mesurant systématiquement un paramètre de matériau est une grossière erreur méthodologique ; c'est pourtant ce que l'on fait quand, pour une étude de fondations d'ouvrage, on effectue dans le site quelques sondages destructifs, au cours desquels on réalise des essais pressiométriques ; même en multipliant sondages et essais, on ne peut pas réaliser une étude correcte.

Il en va de même si l'on mesure plusieurs paramètres ; selon le problème posé, on peut devoir mesurer plusieurs paramètres d'un même matériau pour mieux le caractériser ou parce que la formule finale qui permettra de résoudre le problème, l'exige ; car si les valeurs des divers paramètres d'un même matériau sont interdépendantes, il est rare que l'on ait pu en établir les corrélations ; chaque paramètre est artificiellement isolé pour mettre en évidence une qualité du matériau en négligeant toutes les autres. Or la valeur de chacun est liée à celles de tous ; en n'en liant que deux ou trois, on schématise : la granulométrie d'un cailloutis et sa perméabilité sont sûrement interdépendantes, mais les formules qui permettent de passer d'une valeur de la première à une valeur de la seconde conduisent à des résultats n'ayant qu'une valeur d'ordre de grandeur ; car la perméabilité n'est pas seulement fonction de la granulométrie mais aussi de la nature et de la forme des grains, de la compacité du matériau, de l'hétéro-

généité de la formation... Il en est de même des formules qui lient par exemple, la limite de liquidité et le coefficient de compressibilité ou l'indice de plasticité et l'angle de frottement. En rapprochant les valeurs de paramètres différents d'une même roche, ces formules permettent d'apprécier la cohérence des résultats d'une campagne de mesures ; une grave résistive et donc peu argileuse, est vraisemblablement plus perméable qu'une grave peu résistive et donc assez argileuse ; une marne dont le module pressiométrique est faible, présente une faible résistance à la compression simple... En utilisant de telles relations, on peut apprécier la façon dont varie un paramètre difficilement mesurable en un grand nombre de points au moyen d'un autre paramètre dont la mesure systématique est plus rapide et moins onéreuse. On a intérêt à implanter un puits de nappe alluviale, dans une zone où la grave est particulièrement perméable ; on ne peut pas le faire en mesurant point par point la perméabilité du matériau. On peut par contre y arriver rapidement à moindre coût et avec une précision acceptable, en mesurant la résistivité électrique du matériau ; il y a en effet de grandes chances pour qu'une zone de forte résistivité recèle un matériau très perméable. Il faudra bien entendu le vérifier au moyen de sondages et d'essais.

5.6.2.4 Représentativité des mesures

Mesurer systématiquement un même paramètre peut être une autre erreur méthodologique. Si l'on dispose d'un paramètre assez représentatif du matériau qui soit facile et peu onéreux à mesurer, on peut être tenté d'effectuer un très grand nombre de mesures et d'exploiter statistiquement cette série de mesures pour bâtir le modèle géotechnique du site ; c'est ce que l'on essaie parfois de faire avec la géophysique, mais on ne peut pas aller bien loin dans ce sens en raison de la suspicion dont elle est l'objet de la part de la plupart des utilisateurs de la géotechnique. Par contre, comme les sondages et les essais mécaniques ont toutes leurs faveurs, c'est ce que l'on fait avec l'essai pressiométrique, le pénétromètre statique ou l'essai triaxial.

Or, quand on mesure systématiquement un paramètre du matériau d'un ensemble, on obtient des valeurs plus ou moins dispersées. Comme, pour des raisons économiques, on ne peut multiplier ces mesures de telle sorte que la série ait une valeur statistique, on ne peut pas savoir par ce seul moyen, si les valeurs caractéristiques de la série correspondent bien aux valeurs caractéristiques du matériau ; cela a très peu de chance d'être le cas, alors qu'il est assez facile par une analyse structurale du site, de savoir à peu près où l'un des paramètres d'un matériau donné a ses valeurs maximum et minimum et d'apprécier sa valeur moyenne par référence à l'homogénéité relative de l'ensemble qu'il constitue : le sous-sol d'un terrain d'une superficie de 1 000 m², est composé d'une dizaine de mètres d'épaisseur de matériaux compressibles ; le volume susceptible de tasser à la suite de la construction d'un ouvrage vaut donc environ 10 000 m³ ; si on dispose de temps et de crédits suffisants on peut réaliser sur ce terrain, une dizaine de sondages de 10 m de profondeur pour prélever et essayer une centaine d'échantillons – en réalité, les sondages et essais sont généralement bien moins nombreux - ; il serait téméraire d'exploiter statistiquement les résultats d'essais effectués sur un nombre aussi

restreint d'échantillons recueillis pratiquement au hasard et qui représentent environ 1/100 000 du volume total du matériau.

5.6.2.5 Validité des mesures

La plupart des mesures de paramètres géotechniques sont des mesures indirectes sur lesquelles l'erreur relative peut être considérable. Le paramètre mesuré est celui qui traduit une loi simple, en général de forme linéaire, qui n'est vraie que dans un très court intervalle de définition. Chaque mesure de paramètre géotechnique est donc une vérification expérimentale particulière de la loi utilisée. L'erreur porte ainsi tant sur la validité de la loi dans le cas expérimenté, que sur la précision de la mesure elle-même.

Le protocole de mesure est presque toujours le même ; on réalise une série de mesures de base portant sur deux variables liées par la loi, résistivité/distance, durée de trajet sismique/distance, contrainte/déformation, débit/niveau... On porte les couples de valeurs sur un graphique cartésien, log ou bilog selon la loi ; on lisse la courbe pour obtenir une droite ou un segment de droite sur lequel on mesure le paramètre comme sa pente. La partie linéaire de la courbe de l'essai pressiométrique traduit la loi de Hooke, celle des enveloppes des cercles de Mohr de l'essai triaxial, la loi de Coulomb, celle de l'essai Lefranc, la loi de Darcy... (Fig. 3.1).

Comme résultat d'un essai, l'indication de la valeur d'un paramètre n'est donc pas suffisante ; il est nécessaire de reproduire la courbe qui a permis de le calculer. En particulier, il est extrêmement important de connaître les points singuliers des courbes car ils indiquent les changements de loi des phénomènes, passage d'une couche de matériau homogène à une autre d'un autre matériau, de la déformation élastique à la déformation plastique, de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent... L'analyse détaillée des courbes complexes permet de préciser le phénomène lui-même mais aussi les conditions aux limites de sa production, essentielles pour les calculs ultérieurs, ainsi que les réactions spécifiques et locales du matériau, qui dépendent de sa structure réelle ; on peut ainsi le comparer au milieu idéal imposé par la loi. Dans l'essai à la boîte de Casagrande, les courbes obtenues ont des allures différentes suivant que le matériau plus ou moins plastique, en fait plus ou moins humide ; par contre, une même dromochronique de sondage sismique peut correspondre à plusieurs modèles, totalement différents... Chaque courbe doit donc être interprétée selon les modalités de l'essai, le matériau essayé et sa forme propre ; les formes anormales n'impliquent pas nécessairement que l'essai soit raté ; dans la plupart des cas, on peut les interpréter avec profit comme résultant de particularités spécifiques du matériau essayé ou de son comportement.

Il faut que les appareils d'essai et les modes opératoires soient strictement standardisés, afin que les résultats d'un essai soient à peu près comparables à ceux d'un autre, effectué ailleurs, par un autre opérateur. Malgré tout, les valeurs obtenues dépendent en partie non négligeable, du matériel et de l'opérateur.

5.6.2.6 Précision des mesures

La représentativité des paramètres et des mesures géotechniques est assurément très relative ; il peut donc paraître vain d'aborder le problème de la précision de ces mesures. La plupart des paramètres ne se prêtent qu'à des mesures indirectes ; les erreurs relatives sur leurs valeurs sont donc la somme des erreurs relatives sur chacune des mesures intermédiaires nécessaires à leur détermination. Dans la plupart des cas, on obtient ainsi des valeurs d'erreurs relatives tellement grandes qu'elles ne paraîtraient pas très sérieuses, si on s'avisait de les calculer, comme il est ailleurs de règle de le faire à la suite de toute opération métrologique. Aussi, en présentant les résultats d'essais *in situ* ou de laboratoire, on évite soit délibérément, soit par ignorance traditionnelle, de se livrer à de tels calculs ; cela permet de présenter sans risque de ridicule, des résultats d'essais avec des nombres à plusieurs chiffres significatifs, preuve apparente d'habileté et de sérieux, alors qu'un minimum d'honnêteté ou de lucidité obligerait à les arrondir sérieusement car pour la plupart, ils sont plus des ordres de grandeur que des valeurs. Ces chiffres ont en effet une origine purement mathématique ; en les présentant, on oublie qu'une division tombe rarement juste et, pour éviter de l'oublier, on devrait plutôt calculer à la règle qu'à la main ou à la machine, ou bien imposer de larges arrondis à l'ordinateur.

Le nombre d'opérations et de mesures qu'il faut réaliser pour déterminer une vitesse sismique, un coefficient de compression à l'œdomètre, un coefficient de perméabilité par la méthode Lefranc ou un module pressiométrique, explique la médiocre précision des résultats. En géotechnique, les mesures ne fournissent jamais des valeurs mais seulement des ordres de grandeur.

5.6.2.7 Précision des résultats

La représentativité des lois, des modèles, des paramètres et des mesures géotechniques ainsi que la précision de ces dernières, est très relative. Cela pose le problème généralement négligé, de la précision des résultats issus de calculs géotechniques ; de tels résultats obtenus à partir de formules combinant, après de nombreuses simplifications, des valeurs aussi peu précises de paramètres aussi peu représentatifs ne sont que des ordres de grandeur grossiers ; une erreur très largement supérieure à 100 % entre la valeur calculée et la valeur ultérieurement observée, si on a toutefois le loisir ou la possibilité d'en faire réellement l'observation, est chose courante quand on calcule le tassement d'un remblai, le débit d'un puits filtrant ou n'importe quel comportement de n'importe quel ouvrage : les géotechniciens prudents souhaitent toujours attendre les résultats d'essais en vraie grandeur avant de donner leur avis en ces matières et en quelques autres. On fait rarement de tels essais dont la portée n'est jamais générale mais seulement limitée au site et à l'ouvrage essayé, comme les essais de pieux ou de tirants ; mais les pieux d'essais sont toujours suivis de longues séries de pieux fonctionnels, ce qui permet de les justifier par leur faible coût relatif.

Ainsi, la valeur de tout résultat géotechnique, quel que soit le soin que l'on ait mis à l'obtenir, impose qu'il soit utilisé avec prudence et même avec circons-

pection sinon avec méfiance. Cela ne veut pas dire qu'il ne faille pas tout faire pour en obtenir qui soient les meilleurs possibles.

5.6.3 Gérer l'incertitude

On ne peut pas admettre les conséquences pratiques de telles imprécisions en matière de stabilité à la rupture de fondations, de soutènements... ; pour pouvoir utiliser ce résultat sans trop de risques, on l'affecte de ce que l'on appelle improprement un coefficient de sécurité, en tentant ainsi de se prémunir des conséquences d'une erreur d'appréciation ; c'est une sorte de poudre de perlimpinpin mal nommée que, selon Verdeyen, on ne sait ni définir ni quantifier ; on en saupoudre plus ou moins les résultats des calculs géomécaniques pour les minorer de telle sorte que, quelle que soit leur précision, on puisse les utiliser alors qu'ils ne sont que de grossières approximations ; ainsi, on ne prend aucun risque en s'y référant pour projeter l'ouvrage.

La valeur de ce coefficient ne correspond en rien à une mesure de la probabilité de voir se produire ou non un accident, mais seulement à une estimation en partie intuitive de l'imprécision du résultat, selon l'optimisme du projeteur et par référence à des expériences antérieures. Certes en principe, plus le coefficient adopté est petit, plus le risque de voir se produire un accident diminue, à condition évidemment que le résultat théorique ne soit pas totalement erroné. Mais diminuer de moitié le coefficient de sécurité, ne diminue pas forcément d'à peu près autant le risque ; on ne sait même pas ce qui résulte d'une telle diminution.

5.6.3.1 Le coefficient de sécurité « déterministe »

Le vieux coefficient de sécurité classique, encore utilisé avec profit, est maintenant dit déterministe pour le dévaloriser ; c'est effectivement un coefficient d'ignorance ou pour être plus décent, d'incertitude au sens commun et non au sens mathématique du terme ; comme l'on est réellement incertain du résultat d'un calcul, on corrige ainsi couramment de 300 % en géomécanique et de plus de 500 % en hydraulique souterraine, une valeur elle-même calculée à partir de valeurs de paramètres largement minorés quand on est prudent. On ne risque ainsi plus grand-chose, mais la référence à un résultat de savant calcul, aussi trafiqué que cela, paraît sérieux et donne confiance ; un calcul rapide d'ordre de grandeur, plus honnête, paraîtrait désinvolte et risqué ; il en va de même de l'expression, coefficient de sécurité est plus rassurant que coefficient d'incertitude ; c'est sans doute pour cela qu'on l'emploie. La valeur de 1/3 que l'on attribue au coefficient de sécurité de n'importe quelle formule de géomécanique, vient peut-être de ce que, si l'on néglige le frottement et la profondeur d'encastrement dans la formule de la contrainte admissible des fondations superficielles établie par Terzaghi, la valeur de la contrainte limite est à peu près égale à trois fois celle de la résistance à la compression simple, paramètre facile à mesurer par divers moyens ; en égalant la pression de service admissible à la valeur de cette résistance, on adopte implicitement un coefficient de sécurité de 1/3 ; la généralisation de cette valeur à d'autres formules serait alors abusive

mais, simple à retenir, elle est entrée dans les mœurs et elle est assez élevée pour que cela marche dans tous les cas de figures, alors...

Pour s'accommoder de ce que des formules différentes appliquées à un même problème donnent des résultats différents, on est obligé d'introduire dans chaque formule, une constante différente que l'on appelle parfois coefficient de forme pour faire sérieux, choisie selon de mystérieux critères qui diffèrent dans presque chaque cas ; ainsi, les corrections qu'elles apportent aux diverses valeurs obtenues, conduisent parfois, avec un peu de chance, à des résultats à peu près identiques. Ces constantes sont donc en fait d'autres coefficients d'incertitude.

5.6.3.2 Les coefficients « semi-probabilistes »

Quelle que soit la confiance que l'on peut avoir en l'efficacité de ce vieux coefficient de sécurité, il est prudent d'analyser cas par cas, l'influence de chacune des incertitudes irréductibles qui l'entachent, nature et structure du matériau, qualité et nombre des essais, représentativité du modèle, valeur de la formule... C'est ce à quoi prétend la méthode « semi-probabiliste » de justification d'ouvrage adoptée par l'eurocode 7 (cf. 3.1.2.4 et 5.2.3.6).

Difficile à suivre en géomécanique, elle revient à substituer au vieux coefficient global que l'on applique en fin de calcul, des coefficients partiels pondérés appliqués en série à chaque étape du calcul ; il en résulte en fait de belles formules tout aussi déterministes qu'avant et fournissant des résultats tout aussi discutables : on y pose en principe que dans une situation donnée type, l'ouvrage est susceptible de subir des actions permanentes, variables et/ou accidentelles types que l'on transforme en paramètres pondérés ; les types de situations et d'actions, les définitions des paramètres sont schématiques et peu nombreux, ce qui limite la marge de manœuvre des utilisateurs ; les valeurs des paramètres issues de tableaux à doubles entrées sont combinées dans de curieuses formules qui sont des modèles d'état arithmétiques et donc déterministes ; elles fournissent des valeurs de « sollicitation globale » dont le rapport aux valeurs correspondantes de paramètre géotechnique mesurées et/ou calculées par ailleurs exprime un coefficient de sécurité qui peut être « global », « partiel » ou « résiduel » apparemment rigoureusement calculé, en fait tout aussi subjectif que le coefficient de sécurité classique ; les uns et l'autre sont des coefficients d'incertitude au sens commun qui ne mesurent en rien la probabilité de voir se produire ou non un accident ; pas plus que les normes sur lesquelles ils s'appuient, ils ne garantissent la sécurité de l'ouvrage ; le calcul géomécanique n'est pas un calcul de structure fondé sur des matériaux et des modèles normalisés.

Dans certains rapports géotechniques, on indique maintenant comme état limite ultime (ELU) le résultat brut d'un calcul géomécanique affecté du facteur 1,33 et comme état limite de service (ELS) le résultat brut affecté du facteur 2 ; on se montre ainsi à la page sans faire trop d'efforts, c'est-à-dire sans calculer ces coefficients selon les normes, ce qui est effectivement presque impossible en géotechnique ; mais, cela ne correspond en rien à une démarche « semi-probabiliste » puisque ces valeurs sont déterminées *a priori*, comme le coeffi-

cient classique ; c'est seulement ajouter de la « sécurité » à la « sécurité » ! Au risque de scandaliser les autres, je suggère à ceux que l'application de cette méthode embarrasse ou rend perplexe de considérer que le résultat brut d'un calcul géomécanique correspond à l'ELU et que ce résultat affecté du coefficient de sécurité classique de 1,33 (1/3) correspond à l'ELS.

5.7 Le rapport

En dehors d'éventuelles caisses de carottes de sondages que pratiquement personne ne regarde et dont on perd souvent la trace, quelques dizaines à quelques centaines de grammes de papier concrétisent un travail complexe qui a parfois duré plusieurs mois et a coûté pas mal d'argent. La production du rapport d'une étude géotechnique mérite donc un soin d'autant plus attentif que ce document a plusieurs fonctions et peut être interprété de diverses façons, pas toujours correctes ni même honnêtes : la confusion, l'imprécision, l'ambiguïté doivent en être bannies.

5.7.1 Les fonctions du rapport

La première et principale fonction du rapport est de présenter l'étude et ses résultats ; il doit le faire de façon simple, concise et précise car il va être utilisé, voire interprété par des constructeurs qui ne sont pas géotechniciens et qui pourraient en faire une lecture incorrecte. Il doit néanmoins contenir tous les éléments permettant à un autre géotechnicien de reconstituer la démarche de son auteur et éventuellement d'en faire la critique ; généralement, ces éléments, cartes, plans, coupes géotechniques, graphiques de sondages et d'essais, notes de calculs... sont réunis dans un dossier annexe. La description détaillée d'une méthode ou d'un instrument n'a rien à faire dans le rapport lui-même ; dans l'annexe, elle ne se justifie que s'ils sont originaux ou peu connus ; par contre, il est indispensable de les désigner clairement selon la nomenclature normative et éventuellement, d'en donner les caractéristiques s'ils ne sont pas normalisés : indiquer dans un rapport que l'on a utilisé un pénétromètre dynamique lourd est très impressionnant pour qui ignore que l'appareil en question peut se transporter dans une brouette ; le géotechnicien préférerait qu'on lui indique le diamètre et la masse des tiges, la hauteur de chute et la masse du mouton. Écrire qu'on a réalisé un essai pressiométrique ou un pénétromètre statique comme ceci et comme cela noircit inutilement du papier ; il est préférable de produire la courbe d'étalonnage de la membrane puis celle de chaque essai pressiométrique que de donner des listes de E_m , p_f et p_l semblant sortir d'un chapeau, sans que l'on sache si p_l a été mesurée ou extrapolée, d'indiquer pourquoi et comment le pénétromètre a refusé...

La deuxième fonction du rapport est contractuelle. Avec éventuellement quelques carottes de sondages, il est la seule preuve matérielle de l'exécution de l'étude ; il atteste que le géotechnicien a rempli son contrat car il est extrêmement rare que le maître d'ouvrage conteste son contenu. Quand l'étude a fait

l'objet d'un marché public, la remise du rapport entraîne généralement la réception de l'étude. Si la rémunération de l'étude est fondée sur une série de prix unitaires, les annexes, coupes des sondages et résultats des essais, constituent la base du quantitatif et donc de la facture de l'étude.

La troisième est une fonction de prudence. En matière de bâtiment, mais la Cour de cassation considère que de plus en plus d'ouvrages de BTP sont concernés par l'article 1792 CC (*cf.* 7.2), les appels en garantie de géotechniciens dans le cadre de la loi du 4/1/78 sont devenus quasiment la règle ; la production d'un rapport entraîne presque à coup sûr une assignation dans un délai qui peut largement dépasser dix ans puisque ce délai de garantie court à partir de la réception de l'ouvrage et non de la remise du rapport ; compte tenu des durées d'étude du projet et de construction de l'ouvrage, la réception peut intervenir plusieurs années après cette remise. Il est donc nécessaire de prévoir dès l'abord, l'éventualité d'une mise en cause et de rappeler dans le rapport, les conditions de son utilisation ; le plus simple et le plus direct est le mieux ; les magistrats sont des techniciens du droit et non de la construction ; les éventuelles subtilités d'utilisation de l'étude présentées unilatéralement par le géotechnicien dans son rapport, les satisfont rarement et les longues énumérations de dispositions d'apparence juridique ne les impressionnent pas souvent ; il est inutile de leur rappeler la loi et il ne sert à rien de la rappeler aux autres. Il est de loin préférable d'indiquer clairement dans le rapport, qui est le contractant du géotechnicien, où se trouve précisément le site étudié et quelles sont exactement ses limites, quelle est l'étape de l'étude selon la nomenclature des éléments de missions normalisées du décret du 2/2/73, quelles sont les parties d'ouvrage étudiées ; il est bon que préciser ce que contient le document, de rappeler qu'il n'est pas cessible et que son utilisation peut être incorrecte. Tout cela tient en moins d'une page, ne prête pas à interprétation ou confusion et ne peut pas passer pour arbitraire (*cf.* p. 301).

5.7.2 L'interprétation

De la part des constructeurs, l'interprétation d'un rapport peut être erronée, inattentive, abusive... L'erreur ou l'inattention est en principe fortuite mais cela prête parfois à discussion : on essaie de reprocher au géotechnicien de n'avoir pas été clair. Si le rapport propose plusieurs solutions de fondations, on retient celle qui est la plus simple et la moins onéreuse mais on ne tient pas compte des prescriptions particulières qui la concernent comme de correspondre à un certain nombre de niveaux de sous-sols, de n'être adaptée qu'à une structure tolérante, alors qu'il était indiqué dans le rapport que pour une structure fragile, il était nécessaire de mettre en œuvre des fondations plus élaborées et donc plus chères ; on ne draine pas un mur de soutènement, on terrasse trop vite et sans respecter un phasage... L'utilisation abusive est rarement innocente ; la plus fréquente est l'utilisation d'une d'étude d'APS ou d'APD pour les STD ou le DCE ; viennent ensuite l'utilisation pour un ouvrage différent dans le même site, l'utilisation par les mêmes constructeurs d'un rapport précédent pour un site voisin, la cession du rapport avec le projet qui sera réalisé par une autre

équipe, l'utilisation d'une étude de terrassements pour les fondations d'un ouvrage...

À l'exclusion de dépassements de délais qui peuvent paraître importants et injustifiés, surtout si l'on a commandé l'étude au dernier moment et que les projeteurs attendent le rapport, il est rare que l'on reproche au géotechnicien un manquement contractuel. Si la rémunération de l'étude est forfaitaire, elle est généralement payée sans discussion à la remise du rapport et si la facture est basée sur une série de prix, il est rare que les quantités soient discutées car si les mètres de sondages et le nombre d'essais sont parfois douteux, rien ne permet de l'établir après coup.

L'interprétation des magistrats repose sur l'avis technique d'un expert et sur le respect du droit et du contrat. L'expert est rarement un géotechnicien ; il peut être tenté d'attribuer au vice du sol un dommage dont il discerne mal la cause et ainsi, l'imputer plus ou moins clairement au géotechnicien. Le magistrat ne s'embarrassera pas d'obscures considérations techniques mais à la lecture d'un rapport bien fait, saura dire si le géotechnicien doit ou non être considéré comme constructeur au sens de la loi et si le rapport a été ou non utilisé correctement.

5.7.3 La forme

La forme d'un rapport d'étude géotechnique ne peut évidemment pas plus être normalisée que la méthode d'étude. Voici un modèle de rapport d'étude géotechnique générale d'APD concernant un projet relativement courant d'immeubles en site suburbain. Cette forme éprouvée peut facilement s'adapter à des étapes, des sites et des ouvrages très différents ; il en existe bien d'autres, plus répandues mais pas forcément meilleures ; celle-ci présente l'avantage d'aborder systématiquement les principaux problèmes géotechniques susceptibles de se poser lors de la construction de l'ouvrage et donc de leur donner des solutions de principe dès l'étude du projet, à charge de préciser certaines d'entre elles. (La trame est en caractères normaux ; l'exemple est en italique.)

CARACTÈRES GÉOTECHNIQUES DU SITE

LOCALISATION

Bassin miocène de xxx – basse vallée de xxx, versant droit.

MORPHOLOGIE

Pied de versant – vers le sud, plaine alluviale en partie remblayée, urbanisée de façon diffuse – vers le nord, versant argilo-graveleux à stabilité limite, pente 25 à 30° ; localement, murs en pierres sèches en partie ruinés d'anciennes terrasses de culture.

HYDROLOGIE

Cours inférieur de xxx, en amont d'un pont à tirant d'air limité – vers le sud, zone en partie inondable – vers le nord, ruissellements d'orages et sources temporaires ayant creusé des lits d'écoulement préférentiels sur le versant.

MATÉRIAUX TYPES

Remblais

1 – argile graveleuse
épaisseur (m)

e : 2 à 3

portance (bar)	Rc : 1
raideur (bar/cm)	k : 3
rupture	
cohésion (bar)	c' : 0,1
frottement (degré)	φ' : 15

Couverture**2 – limon argileux**

épaisseur (m)	e : 6
portance (bar)	Rc : 2
raideur (bar/cm)	k : 5
rupture	
cohésion (bar)	c' : 0,3
frottement (degré)	φ' : 10

3 – grave sableuse et argileuse, localement cimentée

épaisseur (m)	e : 4
portance (bar)	Rc : 3
raideur (bar/cm)	k : 6
rupture	
cohésion (bar)	c' : 0
frottement (degré)	φ' : 25

Substratum**4 – molasse**

profondeur (m)	p ≈ 1 à 13
portance (bar)	Rc ≥ 5
raideur (bar/cm)	k ≥ 10

N.B. Les appellations des matériaux-types sont génériques. Les valeurs des paramètres sont des ordres de grandeur.

STRUCTURE

Les matériaux du sous-sol du site sont hétérogènes, de nature, épaisseur et compacité très rapidement variables pour 1, à stratification oblique prononcée pour 3 et 4. 1 recèle des blocs et de vieilles maçonneries enterrés. 4 est subaffleurant sur le versant ; on y observe des bancs et lentilles de grès et de sable argileux amont-pendage, irrégulièrement distribués dans de l'argile plus ou moins sableuse.

EAUX SOUTERRAINES

Vers le sud, le matériau 3 contient une nappe en charge sous 2, quasi imperméable. La surface de contact entre ces deux matériaux est vers 8/9 m de profondeur selon l'endroit. Le niveau piézométrique de la nappe était vers 6,5 m de profondeur en février 199-. D'extension régionale, son marnage doit être relativement faible. Vers le nord, sous-sol non aquifère ; en saison pluvieuse, suintements au mur de certains bancs de grès et sable, susceptibles de déstabiliser l'argile sous-jacente.

ALÉAS NATURELS

Sismicité moyenne (zone II, PS 92)

Vers le sud, zone remblayée de plaine alluviale inondable, en principe hors d'eau, mais le risque d'inondation ne peut pas être exclu en cas de crue supérieure au tirant d'air du pont.

Vers le nord, ruissellements d'orages, coulées de boue, chutes de pierres et blocs...

CARACTÈRES GÉOTECHNIQUES DOMINANTS

Site de pied de versant, en deux zones, versant/plaine. Matériaux à dominante argileuse, très sensibles à l'eau et à l'altération atmosphérique, en partie aquifères.

OBSERVATIONS

En limite sud du site, présence de constructions anciennes.

La stabilité du versant nord est actuellement assurée par une végétation dense ayant envahi d'anciennes terrasses de culture. Ce versant est très fragile et toute intervention modifiant légèrement, sans précaution, son état actuel peut avoir pour effet de le déstabiliser.

APPLICATIONS À L'AVANT-PROJET**Principes généraux****AVANT-PROJET**

Construction de deux immeubles R+5 sur 2 SS, l'un en pied de versant, sur plate-forme en profil mixte, l'autre dans la partie plaine alluviale, sur plate-forme remblayée. Dans les deux cas, déblais d'environ 6 m de profondeur pour les sous-sols dans les emprises des bâtiments.

ADAPTATION

Côté plaine, la profondeur de 6 m ne devra pas être dépassée afin de ne pas crever le mur de la couche imperméable de matériau 2 qui tient en charge la nappe contenue dans 3 ; à cette profondeur, le risque de claquage ou de renard est néanmoins réel en cas de terrassement mal contrôlé ou d'épaississement local de 3. Côté versant, on limitera au plus juste la profondeur du déblai en amont de l'immeuble.

TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX**Déblais**

- * Localisation : *emprise des bâtiments, partie amont du bâtiment en pied de versant.*
 - * Particularités : *matériaux très sensibles à l'eau et à l'altération atmosphérique.*
 - * Profondeur maximum : *≈ 6 m.*
 - * Catégories d'extraction : *matériaux 1 et 2, lame ou godet ; matériau 4, godet étroit et puissant, localement, brise-roche ou explosifs.*
 - * Travaux préparatoires : *contrôle des fondations et de l'état des bâtiments contigus ; éventuellement, reprises en sous-œuvre et confortement des fondations ou blindage de la paroi correspondante de la fouille. En cas d'usage des explosifs, nécessité d'états des environs et de tirs d'essais préalables, ainsi que de contrôle de chaque tir, avec enregistrement de vibrations.*
 - * Époque conseillée : *saison sèche impérativement ; impossibilité d'évolution des engins sur sol détrempé.*
 - * Parois des tranchées de réseaux : *stables verticalement à très court terme, en dehors de périodes pluvieuses ; blindage réglementaire selon la profondeur.*
 - * Talus provisoires des fouilles : *pente 1/1 – localement plus ou moins stable selon la hauteur du talus et la nature du matériau – protection de la surface par film étanche cloué, pour en prévenir la dégradation par altération et érosion – risques de petits éboulements en périodes pluvieuses ou très sèches – localement, dans d'éventuelles zones sensibles, masque de béton projeté sur grillage épinglé ou risbermes de sécurité en crête et en pied. Reprises par panneaux successifs ou alternés, à pente subverticale à très court terme – largeur et blindage à préciser selon la hauteur locale et le mode de construction – étroite synchronisation terrassement/ blindage/ construction.*
 - * Soutènement provisoire : *au sud, sur la limite sensible du site, pour éviter le talutage et sa reprise, paroi berlinoise ou similaire – ancrage en pied dans le matériau 4 (longueur totale des poteaux ≈ 15 m), butonnage en tête à l'intérieur de la fouille car cette zone du site ne se prête pas à la mise en œuvre de tirants d'ancrage (voie et constructions contiguës, couverture meuble épaisse...).*
 - * Fonds de fouilles : *drainage et stabilisation nécessaires, pour permettre le roulage des engins et les travaux de construction, en cas de pluies ou de venues d'eau.*
 - * Eaux souterraines : *– plaine alluviale, profondeur approximative de la nappe ≈ 6 m – vers cette profondeur, épuisement en fond de fouille par rigoles et puisard de pompage, au-delà, rabattement de nappe. Quel que soit le mode d'épuisement, il pourrait entraîner le tarissement plus ou moins complet d'éventuels point d'eau plus ou moins proches, ainsi que des tassements non négligeables du sol et des dommages dans les bâtiments proches fondés superficiellement. – versant, hors d'eau mais en saison pluvieuse, risques de venues d'eau au mur des certains bancs de grès et sable, susceptibles de créer des coulées de boue ; ces eaux et celles de ruissellement ne s'infiltreront pas et devront être collectées et extraites.*
 - * Exécution : *matériaux collants et très sensibles à la trituration – roulage des engins en fonds de fouilles pratiquement impossibles en cas de stagnation d'eau.*
- Les parois et talus des déblais proches des zones de travail et des bâtiments voisins, ainsi que ces bâtiments, devront faire l'objet d'une surveillance attentive.*

* Réutilisation : *classe RTR A3m – mise en dépôt impérative.*

* NB. Les catégories de déblais sont définies par référence aux caractéristiques moyennes des matériaux, pour une mise en œuvre normale, hors critères économiques et/ou contractuels. En effet, les méthodes d'extraction dépendent étroitement des moyens mis en œuvre par le terrassier. Les limites figurées sur la planche hors-texte sont approximatives (lissage des irrégularités et des hétérogénéités locales).

Remblais

* Localisation : *partie aval du bâtiment nord et voirie.*

* Hauteur maximum : *≈ 3 m*

* Préparation de l'assise : *création de redans – décapage ≈ 0,5 m – compactage – cloutage dans les zones très argileuses – apport à la demande de grave peu argileuse (RTR B4) pour obtenir des gradins plans et homogènes – drainage de chaque gradin.*

* Stabilité de l'assise : *correcte à la rupture et au tassement, sous réserve que la stabilité du pied de versant soit assurée.*

* Matériau : *utilisation des matériaux locaux impossible – utilisation de grave d'emprunt peu argileuse, au moins B4.*

* Mise en œuvre : *compactage moyen par couches minces, au cylindre vibrant de classe au moins V3, à préciser selon le matériau utilisé (planche d'essai recommandée).*

* Talus : *pente 2/3 (H/B) – protection contre les ruissellements par drainage et plantations.*

* Contrôles nécessaires en cours d'exécution : *– valeur des paramètres de compactage au niveau de la plate-forme achevée, $Ev2 \geq 500$ bars et/ou $Ev2/Ev1 \leq 2$.*

– effets des vibrations et du tassement de consolidation sur les bâtiments proches.

* Précautions générales : *de la qualité des matériaux et de la rigueur de leur mise en œuvre dépendront la stabilité à la rupture de la plate-forme ainsi que l'importance et la durée des tassements de consolidation du corps de remblai.*

* Paramètres de poussée des terres à l'aval : *à préciser selon le matériau et la compacité obtenue – en première approximation, pour une grave B4, densité ≈ 2,1 – frottement ≈ 35° – cohésion ≈ 0 – poussée hydrostatique négligeable à condition que l'assise et le talus soient bien drainés.*

SOUTÈNEMENTS

* Localisation : *en pied de versant, en amont de la plate-forme de construction.*

* Type et structure : *de préférence, murs-poids à structure souple et déformable (enrochements ou plots de béton juxtaposés et empilés) – à la rigueur et avec précaution, panneaux en béton à fortes rigidités longitudinale et transversale, préfabriqués ou coulés sur place, nombreux joints de rupture transversaux.*

* Paramètres de poussée des terres : *densité ≈ 2 – frottement ≈ 15° – cohésion ≈ 0,5 b – poussée hydrostatique négligeable si le drainage est correct.*

* Fondations : *semelles filantes – $qa \leq 1,5 b$ – encastrement ≈ 1 m.*

* Drainage : *dispositif drainant amont, vertical contre le parement et horizontal au-dessus des semelles, exutoire gravitaire – nappes de barbacanes étagées, nombreuses et denses, régulièrement entretenues.*

On rappelle que l'instabilité d'un mur de soutènement, ainsi que les dommages susceptibles de l'affecter sont généralement dus à un défaut de drainage, insuffisance à la construction ou colmatage dans le temps.

FONDACTIONS

Pour le choix, la conception et la réalisation de tout système de fondation, le critère de tassement exprimé par la raideur du sol (k) et éventuellement celui de sensibilité au retrait/gonflement, est plus contraignant que le critère de rupture exprimé par la portance du matériau d'ancrage (R_c). La stabilité de l'ouvrage dépendra en premier lieu de l'aptitude de sa structure à supporter les effets des tassements que sa construction provoquera inévitablement. La répartition, l'amplitude et les effets des tassements dépendent des caractères géotechniques du site, des dimensions, de la forme et de la masse de l'ouvrage, de sa position dans le site, de la rigidité de sa structure, de son mode de fondation. Une étude spécifique est nécessaire pour les préciser et contrôler leur compatibilité avec la tolérance de la structure.

Ce site est en zone sismique II ; le pied de versant est en stabilité limite ; il est donc absolument nécessaire de prévoir des structures continues, très rigides, particulièrement bien fondées. Les sous-sols pourraient être traités en caissons.

Plusieurs types de fondations sont présentés. Le choix dépend de l'emplacement de l'ouvrage, de l'aptitude de sa structure à supporter les tassements correspondants, et accessoirement des coûts et des facilités de mise en œuvre comparés de chaque solution. Dans le cas de solution mixte, des joints de rupture devront séparer chaque partie de construction.

F1 (plaine alluviale)

* Type : radier

* Structure : forme, répartition des charges et tolérance adaptées à la rigidité propre du radier.

* Matériau type d'assise : plate-forme stabilisée sur matériau 2.

* Pression de service : $q_a \leq 1,5 b$.

* Tassements : ordre de grandeur à préciser ; en première approximation, le radier souple équivalent d'une structure-type déformable de dimensions $\approx 30 \times 10$ m, transmettant une contrainte totale de $\approx 1,5 b$ à un matériau de ≈ 6 m d'épaisseur et de ≈ 5 b/cm de raideur, subirait les tassements suivants : moyen ≈ 1 cm – centre $\approx 2,5$ cm – milieu de la longueur $\approx 2,5$ cm – milieu de la largeur $\approx 2,5$ cm – angle $\approx 0,5$ cm.

* Stabilisation de la plate-forme d'assise : décapage à la demande (≈ 1 m) – compactage au cylindre lourd vibrant, apport de grave peu argileuse (B4) à la demande pour obtenir une plate-forme plane et traficable, localement, cloutage au moyen de ballast $\approx 50/80$ – dispositif anticontaminant – drainage général – couche de forme en grave routière, $e^a 1$ m, énergiquement compactée – contrôle, $Ev_2 \approx 500$ b, $Ev_2/Ev_1 \leq 2$.

F2 (pied de versant)

* Type : semelles filantes, semelles isolées, puits selon la position sur la plate-forme mixte, reliés en tête par des longrines armées (poutres de rigidité).

* Structure : sous-sols en caissons très rigides, adaptés à d'éventuels séismes II et à la stabilité limite du pied de versant.

* Matériau type d'assise : 4 – molasse.

* Particularités : matériau hétérogène, sensible à l'eau et à l'altération atmosphérique.

* Niveaux moyens d'encastrement : ≈ 1 m (partie de plate-forme en déblais) à ≈ 4 m (partie de plate-forme en remblais).

* Pression de service : semelles $\leq 3 b$ – puits $\leq 5 b$.

* Tassements : négligeables – les risques de dommages dus à d'éventuels mouvements du sol, ne résulteraient pas de tassements stricto sensu, mais de l'instabilité latente du pied de versant.

* Fouilles : godet étroit et puissant, refus absolu atteint – stabilité des parois précaire à court terme – nettoyage des fonds.

* Précautions particulières : bétonnage immédiat de chaque fouille dès achèvement – mise en œuvre déconseillée en périodes de précipitations ou de gel. Dans le cas où la mise en œuvre des fondations ne serait pas enchaînée à la fin des terrassements généraux en déblais, on conseille d'arrêter ces derniers à $\approx 0,5$ m au-dessus de la côte finie et de les reprendre en même temps que les fouilles de fondation. Dans le cas contraire, des surprofondeurs non négligeables d'encastrement pourraient devenir nécessaires.

Les fûts des puits devront pouvoir supporter la poussée latérale vers l'aval des remblais.

F3 (plaine alluviale)

* Type : pieux forés et moulés.

* Structure : sous-sols en caissons très rigides, adaptés à d'éventuels séismes II.

* Matériau type d'assise : 4 – molasse.

* Particularités : compacité du matériau d'assise variable selon l'endroit – présence de maçonneries et de grave cimentée dans les matériaux à traverser.

* Niveau moyen d'encastrement : 3 à 4 m sous le toit de 4, selon la compacité locale du matériau et le procédé mis en œuvre, soit ≈ 15 m de profondeur par rapport au sol actuel.

* Pression de service : $q_a \leq 20$ à 50 b, à préciser selon le procédé mis en œuvre et l'encastrement obtenu.

* Tassements : nuls si l'encastrement est correct.

* Exécution : l'usage éventuel de la bentonite imposerait de prendre des précautions pour éviter sa perte dans des lentilles très perméables de 1 et de 3 ; dans ces mêmes matériaux, l'usage éventuel de la tarière creuse pourrait être gêné par la présence de maçonneries, blocs, et lentilles cimentées. La hauteur d'encastrement de chaque pieu dépendra de l'emplacement, du procédé, de l'usure des outils d'attaque et de la puissance des engins ; il devra être soigneusement contrôlé et le matériau d'ancrage, clairement identifié. Une partie du matériau 2 étant fluante, on veillera à éviter toute rupture de fût au déubage ou toute discontinuité de bétonnage dans la boue de forage. Les dimensions réduites de la fouille, l'intraficabilité du fond de fouille, et la nécessité de fonder rapidement les murs périphériques des sous-sols et les voiles de contreventement, imposeront de réaliser les pieux depuis le sol actuel, avant exécution de la fouille.

NB. Les niveaux d'encastres figurés sur la planche hors-texte sont approximatifs (lissage des irrégularités et des hétérogénéités locales).

PROTECTION DES SOUS-SOLS CONTRE LES INFILTRATIONS

Matériaux dans lesquels seront établis les sous-sols, pratiquement imperméables – risques de rétention des eaux d'infiltrations proches (précipitations, arrosages, fuites de réseaux, tranchées mal drainées...) dans les remblais périphériques – nécessité d'étanchéisation et drainage extérieurs des murs et dallages – collecte intérieure des infiltrations inévitables à terme, par un réseau de rigoles aboutissant à un puisard de reprise. On rappelle que la partie sud du site pourrait être exceptionnellement inondée.

REMBLAIS PÉRIPHÉRIQUES DES SOUS-SOLS

Les remblais contre les murs périphériques des sous-sols devront être mise en place après purge éventuelle des matériaux de décharge du chantier et mise en place du dispositif de drainage. On souligne que la stabilité des plates-formes périphériques des bâtiments dépendra essentiellement de la qualité des matériaux utilisés et de la rigueur de leur mise en place, notamment contre les murs (cf. paragraphe Terrassements généraux – remblais).

CHAUSSÉES ET AIRES DE SERVICES

* Sol de portance médiocre, classe S1.

* Traitement de la plate-forme brute de terrassement : décapage à la demande – compactage au cylindre lourd vibrant, apport de grave peu argileuse (B4) à la demande pour obtenir une plate-forme plane et traficable, localement, cloutage au moyen de ballast $\approx 50/80$ – drainage général – contrôle, $Ev_2 \approx 500$ b, $Ev_2/Ev_1 \leq 2$.

* Structure-type de chaussée, pour un trafic T3 (faible), gel non pris en compte

- roulement : enduit ou béton bitumineux – e ≈ 5 cm
- base : grave-ciment – e ≈ 15 cm
- fondation : grave non traitée (D2) – e ≈ 25 cm
- forme : grave silteuse (B3) – e ≈ 30 cm
- dispositif anticontaminant.

DALLAGES

Les dallages légers sur plate-forme brute en planchers bas de sous-sols sont déconseillés car des fissures ou déformations se produiroient à plus ou moins long terme, susceptibles d'affecter les dallages eux-mêmes, ainsi que les cloisons légères et les huisseries. Nécessité de stabiliser et de drainer l'assise, d'armer le béton.

DRAINAGE GÉNÉRAL

On évitera d'établir des réseaux d'eau enterrés, susceptibles de fuir à proximité de talus (coulées de boues, éboulements...) ou de fondations superficielles (poïçonnements, tassements, gonflements...). Drainage des fonds de toutes les tranchées de réseaux enterrés.

La stabilité générale du pied de versant pourrait être compromise à plus ou moins long terme par défaut de drainage des eaux de ruissellement ou d'infiltration. Les eaux de toitures, talus, plates-formes et voies, ainsi que les excédents d'arrosage devront être collectées et évacuées par un réseau pluvial ; les descentes d'eau et les exutoires devront être revêtus.

Contractant : xxx
 Avant -projet – désignation : xxx – caractéristiques : xxx
 Situation – département : xxx – commune : xxx – lieu-dit : xxx
 Étude – genre : (*géotechnique (générale, de terrassements, de fondations), hydrogéologique*)
 – étape : (*faisabilité, APS, APD, STD, expertise*)
 – contenu du rapport
 texte : *n* pages – moyens : *n* pages
 calculs : *n* pages – planches hors texte : *nb*

Moyens d'étude

Documentation – cartes topographiques : IGN xxx n° *n* à 1/*n* – plan de masse à 1/*n*
 – carte géologique : xxx à 1/*n*
 – photographies aériennes : xxx n° *n*
 – documents divers : xxx

Géologie – cadre général : cartographie à 1/*n*, télédétection – étude du site : lever de terrain et implantation des travaux à 1/*n*
 Géophysique – traîné électrique : *nb* – sondages électriques : *nb* – sondages sismiques : *nb* –

...

Sondages mécaniques : (*nombre de chaque type*)
 Essais *in situ* : (*nombre de chaque type*)
 Essais de laboratoire : (*nombre de chaque type*)

La responsabilité professionnelle de xxx, découlant de l'utilisation de ces documents indissociables, est engagée vis-à-vis du seul contractant qui lui a confié la mission de constater l'état du sol et du sous-sol du site et, autant que faire se peut, d'établir un diagnostic de comportement du site lors de son aménagement, dans le cadre de l'étude dont le genre et l'étape sont précisés ci-dessus.

Elle ne saurait être mise en jeu, même partiellement, à la suite d'utilisation inattentive, erronée ou abusive. Elle ne saurait être évoquée en raison d'interprétation ou d'avis différents de ceux exprimés dans ces documents, si xxx n'en a pas reconnu par écrit le bien-fondé et n'a pas participé en ce qui le concerne, aux prises de décisions en découlant.

Xxx conserve ses droits d'auteur sur cette étude et sur tous les documents qu'il a établi pour la réaliser et en rendre compte. Il en garde les minutes et les originaux et remet au seul contractant les copies strictement nécessaires aux participants à l'aménagement du site et à la construction, qui ne peuvent les utiliser que dans ce but, à l'étape précisée ci-dessus.

En aucun cas, ces documents ne doivent être transmis à qui que ce soit et pour quelque raison que ce soit.

Toutes les publications présentent le volet scientifique de la géotechnique, parfois son volet technique, mais négligent généralement son volet économique. Or, ses applications pratiques et/ou de recherche/développement sont des opérations économiques : d'abord, l'estimation du coût de l'ouvrage détermine en grande partie la décision de réaliser telle variante du projet plutôt que telle autre ; ce coût doit être aussi bas que possible sans affecter la destination de l'ouvrage ; en cas de dommage, ceux qui sont reconnus responsables doivent toujours compenser financièrement le maître d'ouvrage. Ensuite, le géotechnicien est rémunéré par le maître pour produire l'étude géotechnique de son projet. Enfin, la recherche géotechnique, universitaire ou autre, est financée plus ou moins directement par ceux, État, collectivités, entreprises... qui attendent des avantages économiques de ses résultats ; et si certains chercheurs sont désintéressés, leurs commanditaires publics ou privés ne le sont sûrement pas. Il n'est donc pas déplacé de consacrer quelques pages de cet essai à l'économie géotechnique.

Les conséquences financières d'une étude géotechnique douteuse, erronée, mal interprétée, négligée... sont presque toujours graves pour l'économie de l'ouvrage. L'insuffisance ou même l'absence d'étude peut avoir d'aussi graves conséquences, mais l'économie immédiate paraît alors intéressante ; certains maîtres d'ouvrages s'en contentent, car s'ils supportent les conséquences financières directes dont ils ne mesurent pas toujours l'importance, les dommages à l'ouvrage qui pourraient leur être souvent imputées à cause de leur ladrerie ou de leur inconscience, ne leur coûtent pas grand-chose : la loi en rend automatiquement responsables ceux qu'elle appelle les constructeurs, maîtres d'œuvres, techniciens, entrepreneurs et parfois aussi les géotechniciens considérés comme tels, ce qu'ils sont rarement.

6.1 Économie de l'ouvrage

L'économie de l'ouvrage est paradoxalement presque toujours négligée par le maître d'ouvrage quand il consulte un géotechnicien : il décortique le devis de l'étude proposée sans trop se préoccuper de ce sur quoi il est fondé, mais en le souhaitant aussi bas que possible. Or le coût d'une étude géotechnique est marginal, comparé au coût de l'ouvrage qui la motive ; l'économie qu'il peut faire sur son coût est donc négligeable. Par contre, une étude géotechnique défectueuse peut entraîner des surcoûts et des dépassements de délais impor-

tants lors de l'étude du projet, de la construction de l'ouvrage et/ou après sa mise en service ; il peut aussi en résulter des dommages à l'ouvrage dont certains peuvent mettre en cause sa destination et imposer des réparations d'un coût exorbitant ; on a vu qu'il peut même en résulter la ruine comme à Malpasset (cf. 1.1.3).

Mais pour de nombreuses raisons dont fait partie la chance, l'absence ou la défektivité d'une étude n'est ni nécessaire ni suffisante pour qu'un ouvrage subisse un dommage ; bien souvent, il ne se passe rien d'anormal à l'étude du projet, à la construction puis à l'usage de l'ouvrage. C'est sans doute ce qui permet ce type de négligence.

6.1.1 Lors de l'étude du projet

Si l'on s'aperçoit de l'insuffisance d'une étude géotechnique lors de l'étude du projet, on doit la compléter ou en faire une autre ; le coût de la correction est alors limité. Ce cas n'est pas fréquent car peu de constructeurs sont capables de s'en rendre compte à ce niveau ; c'est souvent la chance qui les y aide comme dans l'exemple de la station d'épuration du § 1.1.3.2.

Ce peut être aussi la nécessité d'y regarder à deux fois avant de prendre une décision très pénalisante : un petit affaissement s'était produit sur un stade de zone urbaine ; à proximité, se trouvait une zone connue et bien délimitée d'anciennes carrières de gypse dont le toit s'effondrait de temps en temps ; elle était évidemment *non aedificandi* mais le stade était situé assez loin d'elle. Des sondages destructifs autour de l'affaissement annonçaient la présence de gypse sous le stade, car ils avaient délivré une poudre blanche que l'on n'avait même pas soumise au test de l'acide chlorhydrique ; on attribuait ainsi l'affaissement à l'effondrement d'une galerie sous-jacente qui n'avait pas été localisée ; cela obligeait à délaisser le stade et à en construire un ailleurs ; mais le problème de la sécurité de ses abords urbanisés demeurait posé. Heureusement, il l'a été à un géotechnicien qui connaissait un peu de géologie ; il lui est tout de suite apparu que pour d'évidentes raisons structurales, le stade n'était pas dans une zone sous laquelle il pouvait y avoir du gypse ; un sondage carotté exécuté sur l'affaissement a montré qu'il correspondait à un vieux puits fermier, profond d'une vingtaine de mètres, qui avait été remblayé sommairement lors de la construction du stade. Les travaux de remise en état n'ont pas coûté bien cher, mais surtout, le stade a pu être conservé sans risque et les riverains ont pu être rassurés.

6.1.2 Lors de la construction de l'ouvrage

Il n'est pas rare que l'on s'aperçoive que l'étude géotechnique est défective lors de la construction de l'ouvrage. Les cas les plus classiques sont les erreurs de définition ou de calage de fondations, de stabilité de talus ou de parois, de débit de fouille ; ils ne sont pas les seuls. Il faut alors arrêter le chantier, trouver et étudier une solution de remplacement, modifier l'ouvrage et sa

construction... ; cela entraîne évidemment des surcoûts et des allongements de délais de construction qui peuvent être très élevés.

Tel passage inférieur d'autoroute avait été projeté comme un portique, avec des fondations sur semelles filantes dans de l'argile réputée consistante, à 1,5 m de profondeur avec une pression de service de 2 bars ; à l'ouverture des fouilles en saison pluvieuse, on s'est aperçu qu'à la faible profondeur prévue, l'argile était humide, peu consistante et que la pression ne pouvait y dépasser 0,5 bar pour éviter des tassements non négligeables. Une étude de contrôle a montré qu'un approfondissement compatible avec des semelles filantes était impossible et une solution sur pieux n'était pas envisageable car on ne pouvait pas disposer d'une foreuse adaptée dans les délais impartis à la construction des ouvrages de la section ; on a donc décidé de remplacer le portique ouvert par un cadre fermé qui s'est comporté correctement ; la substitution n'a pas été très onéreuse, car d'autres cadres étaient prévus dans le lot de l'entreprise qui le construisait.

Les immeubles d'un grand ensemble devaient être fondés sur semelles filantes à 1 m de profondeur à 2,5 bars ; à l'ouverture des fouilles, pour des raisons analogues au cas précédent, on s'est aperçu qu'il fallait fonder à 1,5 m et à 1,5 bar ; la modification du projet n'a pas été bien grande, le délai d'exécution n'a pas été largement dépassé mais, compte tenu de l'important linéaire des semelles, le surcoût a été très élevé.

Le sous-sol de cette ville n'est pas pire qu'ailleurs ; il y est même plutôt de bonne qualité. Quelques cas d'instabilité de talus de déblais et de parois moulées ont fait penser le contraire, mais le vice du sol, toujours évoqué *a priori*, n'a jamais tenu devant les défauts d'études et/ou les vices d'exécution : dans une ancienne carrière d'argile, connue pour l'instabilité de ses fronts, un grand terrassement en déblais entrepris sans précautions a déclenché un glissement qui a d'une part, arrêté le chantier durant de nombreuses semaines, mais surtout, a provoqué la quasi-destruction de bâtiments implantés en crête et l'évacuation d'autres à proximité par précaution ; ensuite, la plupart des constructions réalisées dans la zone ont subi des dommages tellement graves que certaines ont dû être démolies et abandonnées et d'autres reprises en sous-œuvre à grand frais, avec encore quelques échecs. Quelques années avant, ce site avait été pressenti pour la construction d'immeubles d'habitations ; le projet avait été abandonné en raison des risques encourus qui étaient apparus dès l'étude géotechnique préliminaire ! Une dizaine d'années après, à l'autre bout de la ville, plusieurs villas construites dans une carrière analogue ont été détruites par un glissement. Au centre-ville, dans la même formation, des déplacements de parois moulées lors de constructions successives de parkings enterrés voisins, ont provoqué alentour des dommages importants analogues ; dans chaque cas, les constructeurs étaient intervenus sans s'intéresser aux échecs de leurs prédécesseurs.

De nombreux parkings souterrains comportent des radiers drainants : c'est une solution présentée comme économique au maître d'ouvrage ; un réseau de drainage et un groupe de pompage sont effectivement moins onéreux qu'un couvage ; elle ne l'est réellement que pour de très faibles débits car autrement, le coût du pompage permanent peut être prohibitif. Quand l'ouvrage est construit, il est difficile et onéreux d'y remédier ; de plus à terme, un gros débit

provoque souvent des renards, ce qui détériore les pompes, augmente le débit et peut entraîner des dommages à l'ouvrage et aux alentours. Généralement, la décision de mettre en place un radier drainant a été prise à la suite de l'évaluation d'un débit acceptable de la fouille, fondée sur une étude déficiente. L'excès de débit permanent de ce type d'ouvrage est parmi les plus difficiles à corriger ; rares sont les cas où l'on y parvient correctement : la solution est soit d'accepter un coût d'exploitation très supérieur à l'estimation initiale, soit d'effectuer des injections de produits colmatants autour de l'ouvrage, ce qui est difficile et onéreux, sans garantie de succès à plus ou moins long terme. En tous cas, un cuvelage aurait été préférable, même en considérant le surcoût d'ancrage ou d'alourdissement de la structure pour compenser la pression hydrostatique.

6.1.3 Après la mise en service

Une étude géotechnique absente, mal interprétée ou négligée peut être la cause de réparations très onéreuses dont la nécessité n'apparaît généralement qu'après la mise en service de l'ouvrage ; on l'a vu à propos du silo de Transcona (*cf. 1.1.2.3*), de l'ensemble de pavillons fondés différemment (*cf. 1.1.3.1*)...

Un pavillon isolé de banlieue fait rarement l'objet d'une étude géotechnique. Si ensuite, il se fissure gravement, sa reprise en sous-œuvre par micro-pieux coûte fréquemment aussi cher qu'a coûté sa construction ; les propriétaires sont gravement perturbés, mais financièrement peu affectés car de telles opérations sont presque toujours à la charge de l'assureur de dommages-ouvrage qui sera ensuite indemnisé par les assureurs des constructeurs (*cf. 7.2*).

Un cas très fréquent d'absence ou d'insuffisance d'étude qui se révèle après la mise en service de grands ouvrages de génie civil, est l'instabilité de leurs accès ; on a soigneusement étudié la géotechnique de l'ouvrage principal, mais pas celle des ouvrages annexes, souvent confiés à des constructeurs différents. On ne compte plus les hauts remblais qui se sont affaissés contre des culées de ponts ; un des accès d'un grand tunnel alpin a posé de tels problèmes de stabilité qu'il aurait été opportun de ne pas placer sa tête là où elle est ; les travaux de stabilisation sur un versant montagneux particulièrement instable qui, bien que connu, n'avait pas été évité, ont atteint un coût pour le moins imprévu ; il demeure un coût permanent d'entretien qui ne l'est pas moins car les fondations d'un viaduc sont instables et doivent être régulièrement reprises.

6.2 Le commerce géotechnique

La géotechnique est un marché dont le produit est l'étude qu'un maître d'ouvrage achète à un géotechnicien pour savoir dans quelles conditions l'ouvrage qu'il projette pourra être adapté au site dont il dispose pour le construire. Mais il ne peut pas comparer concrètement les propositions des géotechniciens qu'il consulte ; il détermine son choix sur des prix de propositions commerciales, pas sur des qualités de produits : l'étude géotechnique est

un produit intangible qu'il commande sans devoir l'utiliser directement et sans savoir s'il est bon au moment où il le paie ; sur un site et pour un ouvrage donnés, on ne réalise jamais deux études pour confronter leurs résultats et choisir la meilleure. C'est donc une opération commerciale particulièrement risquée pour le maître d'ouvrage.

6.2.1 Le marché de la géotechnique

Naguère, peu de maîtres d'ouvrages connaissaient les avantages financiers que pouvait leur apporter une étude géotechnique sérieuse et il ne s'en exécutait que pour de grands ouvrages risqués. Le monde de la géotechnique qui ne s'appelait pas encore ainsi, était très fermé ; quelques grands maîtres d'ouvrages consultaient quelques grands noms des géosciences et leurs relations étaient d'autant moins commerciales que pour la plupart de ces savants, leur activité de conseil était très accessoire. Le marché de la géotechnique était alors un marché d'entreprise parmi d'autres, à peu près limité à la seule exécution de sondages mécaniques et d'essais *in situ* et de laboratoire ; les règles commerciales définissant les relations des maîtres d'ouvrages et des entrepreneurs de sondages n'étaient pas essentiellement différentes de celles de n'importe quel autre marché d'entreprise. Ainsi, l'exercice de la géotechnique ne présentait aucune particularité commerciale ; selon l'usage général, l'entrepreneur était désigné après consultation ou appel d'offres plus ou moins ouvert, avait un cahier des charges, devait obéir à des ordres de service et était payé par application de la série de prix, après que ses travaux réels avaient fait l'objet d'attachements contradictoires. Le programme des travaux et les clauses du cahier des charges étaient définis par le maître d'ouvrage, conseillé par son maître d'œuvre avec parfois l'appui d'un géotechnicien ; si, parmi ces derniers, il y en avait de plus chers que d'autres en ce qu'ils proposaient des programmes plus onéreux, ils obéissaient seulement à des mobiles techniques ; ils ne pouvaient pas être soupçonnés d'accroître volontairement le volume de leur programme pour en tirer un quelconque avantage matériel puisqu'ils ne réalisaient pas ces travaux.

Cette conception du commerce de la géotechnique persiste chez les maîtres d'ouvrages et leurs conseils qui confondent encore campagne de sondages et étude géotechnique, au seul profit des entrepreneurs de sondage et des laboratoires d'essais qui n'ont évidemment aucun intérêt à ce que cela change ; ces derniers peuvent ainsi exécuter les travaux commandés avec le seul souci de leur rentabilité propre, sans assumer la responsabilité pourtant essentielle, de leur rentabilité par rapport à l'étude et à l'ouvrage ; elle demeure celle du maître d'œuvre, rarement compétent en géotechnique.

Pour se prémunir des inconvénients de cette pratique qui conduit souvent à des dépenses incontrôlées et à une forte dilution de responsabilité, les maîtres d'ouvrages souhaitent que les responsables des études dont ils ont besoin, en proposent les programmes et assurent l'exécution des travaux de sondages et d'essais nécessaires. Le géotechnicien est alors directement intéressé à l'aspect économique et commercial de l'étude ; il est donc à la fois un ingénieur-conseil et un entrepreneur, fonctions naguère incompatibles ; le maître d'ouvrage, mal

habitué à cette double fonction, ne sait s'il doit le considérer commercialement comme l'un ou comme l'autre ; et malheureusement, se méfiant ataviquement de l'entrepreneur qui, selon le folklore du BTP, passe son temps à essayer de le gruger, il persiste à vouloir limiter la nécessaire liberté d'action du conseil en contraignant le géotechnicien à se soumettre aux règles étriquées du marché d'entreprise ; il lui impose une série de prix, un devis estimatif, un cahier des charges... pour les travaux de sondages et d'essais ; ce sont les seules prestations qu'il estime à tort faciles à contrôler ; il fixe ainsi son attention sur les moyens et non sur la fin qui est l'étude elle-même. Des propositions de plusieurs géotechniciens consultés sur de vagues indications du type d'ouvrage concerné et sans que soit précisée l'étape de l'étude demandée, il ne retient que les séries de prix et les compare au moyen d'un même mètre, purement fictif ; il s'oblige ainsi à retenir, et pour cette seule raison, la proposition dans laquelle le prix du mètre linéaire de sondage, de l'essai pressiométrique... est le plus faible. Or, l'économie ou la dépense de quelques dizaines de francs sur un mètre de sondage ou un essai, et même de quelques milliers de francs sur le coût total d'une étude géotechnique, représentent bien peu de choses quand on les compare à celles qu'est susceptible d'entraîner le fait que, pour des fondations sur semelles filantes par exemple, on diminue ou accroît la profondeur d'encastrement d'un mètre ou, la pression de service d'un bar...

Cela est d'autant plus grave que parallèlement à cette évolution et sans doute du reste à cause d'elle, le marché de la géotechnique s'est radicalement transformé. Les maîtres d'ouvrages et les géotechniciens, beaucoup plus nombreux, ne se connaissent plus et les premiers ne savent plus comment choisir les seconds. Leur décision est finalement d'autant plus difficile à prendre que, pour profiter de l'expansion rapide et continue d'un marché dans lequel la demande a longtemps dépassé l'offre, sondeurs, géophysiciens, géologues, ingénieurs, géomètres... se sont faits géotechniciens du jour au lendemain. Ils ont compliqué un marché déjà difficile à saisir, en proposant des services qui ne sont plus adaptés aux besoins car, n'ayant pas vécu l'évolution de la géotechnique, ils ne peuvent qu'en proposer les images figées de son proche passé. Le marché de la géotechnique s'est ainsi saturé de façon anarchique, selon la loi économique générale qu'un marché en expansion attire beaucoup de gens dont peu d'entre eux sont techniquement capables de le satisfaire, ce qui casse les prix du marché et entraîne la médiocrité des prestations. Il en est résulté des luttes commerciales pipées dont l'effet a été la disparition de quelques uns et le discrédit de la plupart des autres ; on y discute du prix du mètre de sondage ou de celui de l'heure de vacation d'ingénieur, comme s'il s'agissait de vendre ou d'acheter un produit matériel, garanti par le vendeur, bien connu de l'acheteur et dont la qualité peut être appréciée par rapport à des normes bien définies ; on agit comme si la compétence d'un géotechnicien amené à prendre de lourdes responsabilités dans la conception d'un projet et la réalisation d'un ouvrage, pouvaient raisonnablement s'acheter au rabais.

Pour une même affaire, les montants des propositions des géotechniciens varient couramment du simple au double et même plus. Cela est évidemment anormal et le moins-disant qui est généralement choisi, se rattrape quand il le peut, en faisant surpayer des prestations imprévues et inutiles, mais surtout, ce qui est beaucoup plus grave, en exécutant sa mission avec un manque total

d'imagination, de recherche et de perfectionnement qui lui permettraient de proposer des solutions techniques originales, sûres et économiques, aux problèmes qui lui sont soumis.

Le géotechnicien essaie ensuite de prévenir les reproches de légèreté qu'il pourrait encourir, en persuadant son client que d'autres sondages et essais s'imposent alors qu'ils lui permettent seulement d'accroître le volume d'un rapport dont le poids est la seule expression de sa qualité. Commercialement parlant, l'opération est extrêmement fructueuse, ce qui aux yeux de certains est suffisant pour la justifier : *Il faut bien vivre et le client peut payer* m'a un jour écrit un géotechnicien célèbre en son temps. Il est même prêt à payer cher le transfert de sa propre responsabilité sur le géotechnicien, mais on peut être assuré qu'il ne lui fera aucun cadeau en cas d'accident. Cyniquement, on peut ainsi qualifier de réaliste une telle pratique qui n'est pas très recommandable.

On aurait pu penser que, compte tenu des déplorables résultats auxquels elle conduit habituellement, cette pratique s'assainisse et que seuls les géotechniciens compétents et efficaces demeurent. Il n'en est rien et cela n'a pas favorisé l'évolution rationnelle de la géotechnique ; cela ne profite même pas à ses utilisateurs qui se contentent de victoires à la Pyrrhus, quand ils ont la satisfaction de recevoir et d'accepter un devis apparemment raisonnable qui promet sûrement beaucoup plus qu'il ne tiendra et qui débouche souvent sur une étude douteuse.

6.2.2 Fournisseurs et clients

Comme n'importe quelle autre opération commerciale, l'étude géotechnique est soumise à des rapports de fournisseur à client. Quelle que soit la forme sous laquelle il l'exerce, le fournisseur géotechnicien fonde la rentabilité de son activité qu'il veut évidemment rendre aussi élevée que possible, sur la vente de son savoir et de son savoir-faire ; ce souci de rentabilité peut n'être qu'apparent dans le cas d'organismes publics ou para-publics qui vivent de subventions et de marchés captifs. Le client maître d'ouvrage investit de l'argent dans l'étude géotechnique et en attend un large profit à la construction de l'ouvrage. Pour le géotechnicien, le bilan financier de l'étude elle-même doit être bénéficiaire alors que pour le maître d'ouvrage, le bilan financier de la construction de l'ouvrage doit être amélioré par les résultats de l'étude.

Apparemment, leurs intérêts commerciaux ne sont pas les mêmes. En établissant le programme de son étude et en le réalisant, le géotechnicien doit néanmoins avoir pour constant souci de rentabiliser son activité tant de son propre point de vue que de celui du maître d'ouvrage ; c'est du reste là le souci normal de n'importe quel commerçant et l'on juge habituellement que les meilleurs d'entre eux sont ceux qui rendent les meilleurs services aux meilleurs prix. Et il est bien rare que, quand la rentabilité d'une prestation est assurée de son point de vue, le client se montre exigeant au point qu'elle ne l'est pas aussi pour son fournisseur. C'est en effet l'intérêt de l'un que les soucis commerciaux de l'autre soient limités, de façon qu'il puisse se consacrer en toute sérénité et avec le maximum d'efficacité à la conduite de sa mission. La rémunération du

géotechnicien devrait donc être liée à la valeur du service que l'on attend de lui, afin de l'inciter à le bien rendre mais il n'est pas sûr que cela serait suffisant pour y parvenir. Le juste prix est une des utopies du folklore du BTP que l'on évoque toujours quand la situation économique conduit certains à proposer des prix anormalement bas ; malheureusement, si le moins-disant d'un appel d'offres est facile à identifier, le mieux-disant ne l'est pas ; or, le code des marchés publics l'impose maintenant ; on peut regarder cela comme une plaisanterie douteuse quand un maître d'ouvrage justifie ainsi le choix contestable d'un favori. La célèbre lettre que Colbert adressa à Louvois le 17 septembre 1685 expose, analyse et critique ce problème ; toujours posé, jamais résolu, c'est le sort commun des bonnes intentions.

6.2.3 Les risques du maître d'ouvrage

La qualité d'une étude géotechnique est fonction de la compétence du géotechnicien et de l'importance des moyens matériels mis à sa disposition. Elle a une influence directe et importante sur le coût de l'étude et de la construction de l'ouvrage. Pour être profitable, une étude géotechnique doit en effet conduire à des économies de conception et de réalisation. Si elle est de mauvaise qualité ou insuffisante, le maître d'ouvrage voit s'accroître de façon démesurée la durée et le coût de l'étude technique, car à mesure qu'on s'en aperçoit, on doit multiplier les réunions, les discussions, les rapports, entreprendre des études complémentaires et refaire tout ou partie des plans d'exécution. Il risque aussi, sans s'en rendre compte, d'utiliser un site de construction beaucoup plus onéreux à aménager qu'un autre site dont il aurait pu disposer ou de surdimensionner tout ou partie de l'ouvrage. Il y pense assez rarement ; par contre, il est plus généralement conscient qu'il risque d'importantes dépenses supplémentaires d'exécution ; en cas d'erreurs géotechniques, souvent qualifiées d'aléas géologiques pour en rendre responsable le sort, son programme de construction peut être gravement perturbé et son chantier immobilisé pour attendre un complément d'étude et une décision.

Un maître d'ouvrage ne devrait donc pas trop lésiner sur le coût d'une étude géotechnique. Et comme ce coût est beaucoup moins élevé que celui des travaux qu'elle conditionne et qu'il est dérisoire par rapport au coût de l'ouvrage entier ou à celui des dommages qu'il risquerait de subir, il devrait être convaincu que de faibles économies sur l'étude géotechnique entraîneraient de grosses dépenses d'exécution.

Ce raisonnement est assez juste mais trop schématique ; sauf erreur grossière d'estimation, le coût d'un ouvrage est presque une donnée ; à mesure donc que s'accroît le coût de l'étude géotechnique, le rapport de la diminution éventuelle du coût de l'ouvrage à cet accroissement diminue jusqu'à ce que le gain général devienne illusoire. Sous réserve que la sécurité ne soit évidemment pas en cause, il existe ainsi une limite pratique au coût de l'étude géotechnique, qu'il est souhaitable d'atteindre mais qu'il ne faut pas dépasser. Fixer cette limite est le rôle commun du maître d'œuvre et du géotechnicien.

Ce peut être aussi un raisonnement dangereux ; il conduit à choisir le géotechnicien en ne considérant que le critère commercial et à fixer *a priori* un pourcentage rigide de dépense géotechnique par rapport au budget total d'un ouvrage. En faire matériellement plus qu'il n'est nécessaire lors de l'étude, peut en effet donner bonne conscience et une illusion de sécurité susceptibles d'entraîner un dangereux relâchement d'attention durant la construction.

D'autres maîtres d'ouvrages, pingres ou victimes d'expériences antérieures malheureuses, n'achètent au géotechnicien que sa responsabilité ; et il s'en trouve pour la leur vendre au rabais, ce qui au bout du compte, ne fait l'affaire de personne.

6.2.4 Structure du prix d'une étude

La prestation du géotechnicien comporte trois parties ; deux d'entre elles seulement participent à la structure du prix de l'étude. Au début de son intervention, la première partie est purement intellectuelle ; elle consiste à étudier la proposition qu'on lui demande de faire, à établir un programme d'étude et à le chiffrer ; c'est une prestation de maître d'œuvre qui n'est pas rémunérée, bien que très souvent, le maître d'ouvrage utilise tout ou partie du programme pour lancer une large consultation ou même, le fait directement exécuter par un favori. Il doit ensuite exécuter les travaux de terrain et de laboratoire, géophysique, sondages et essais prévus dans son programme ; c'est une prestation matérielle d'entrepreneur qui fait parfois l'objet de prises d'attache. Sa prestation redevient intellectuelle, d'abord pour l'exploitation des renseignements recueillis et leur mise en forme qui sont des prestations de bureau d'étude, ensuite pour étudier les problèmes géotechniques que pose la construction de l'ouvrage et proposer des solutions tant théoriques que pratiques, comme le mode de fondation d'un immeuble ; c'est une prestation d'ingénieur-conseil. Cette dernière prestation fait toute la valeur de l'étude ; c'est pourtant elle qui est la plus mal rémunérée alors que c'est sur elle que l'on fonde l'appel en garantie du géotechnicien considéré comme constructeur en cas de dommage à l'ouvrage. On retrouve là une expression de la confusion de l'étude et de la campagne de sondages.

Pour une étude donnée, la partie matérielle, sondages et essais, qui fait l'objet d'une série de prix détaillée, ne vaut jamais moins de 90 % du coût total, tandis que toute la partie intellectuelle, y compris la dernière, de loin la plus importante, généralement forfaitisée, atteint péniblement 10 % ; le travail intellectuel du géotechnicien n'est donc pratiquement pas rémunéré. En acceptant cela, le géotechnicien lui-même agit plus comme un entrepreneur que comme un ingénieur-conseil ; c'est pourtant en cette qualité que l'on s'adresse à lui ; c'est sur son efficacité en tant que tel, que repose en partie l'économie de l'ouvrage et c'est en cette qualité qu'il encourt éventuellement la responsabilité de constructeur. Les maîtres d'ouvrages qui regrettent de recevoir des études décevantes et ceux qui en ont subi les conséquences, devraient méditer cela, comme les géotechniciens et leurs assureurs, qui se voit appelés en garantie à la suite de dommages ou d'accidents.

6.2.5 Le coût d'une étude

Le rapport du coût d'une étude géotechnique au coût total de la construction est rarement inférieur à 0,2 % dans le cas de très grands ouvrages comme les autoroutes de liaison en rase campagne, pour lesquelles de nombreuses tâches du géotechnicien sont répétitives et concernent des techniques de construction simples pour la plupart. Il est très difficilement supérieur à 3 % dans le cas où l'étude géotechnique est en fait l'étude principale du projet comme quand il s'agit de barrage en terre. EDF aurait toutefois dépensé près de 10 % du coût total de l'ensemble hydroélectrique de Sainte-Croix-du-Verdon, pour en réaliser l'étude géotechnique ; le cas paraît exceptionnel et correspond à l'aménagement audacieux d'un site ingrat, par un maître d'œuvre particulièrement scrupuleux et prudent.

Pour un ouvrage en petit site imposé comme un bâtiment urbain, le coût de l'étude est plutôt déterminé par la plus ou moins grande complexité du sous-sol du site que par l'importance de l'ouvrage, bien qu'il soit proportionnellement toujours plus élevé pour un petit ouvrage que pour un grand ; l'étude des fondations d'un immeuble-tour implanté sur le rocher affleurant est beaucoup moins onéreuse que celle des fondations d'un immeuble de quatre niveaux implanté sur 30 m d'argile peu consistante. Pour le bâtiment, on peut estimer qu'en moyenne, le coût raisonnable d'une étude géotechnique concernant à la fois les problèmes de terrassements généraux et de fondations, devrait se situer entre 1 et 2 % du coût total de l'ouvrage, selon les difficultés géotechniques et techniques spécifiques ; en fait, il n'est pas rare qu'il soit nettement inférieur car les promoteurs de constructions ne sont pas réputés pour leurs largesses. Si l'on compare le coût d'une étude hydrogéologique destinée à la création d'un captage au coût du captage, on peut évidemment obtenir un pourcentage très supérieur à 3 % ; il arrive même que l'on dépasse largement 100 % dans les cas dont l'étude est très difficile ou dans le cas de grands réseaux, quand la sécurité de l'alimentation doit être vérifiée avec la plus grande rigueur. En fait, on ne réalise jamais un captage pour lui-même, mais pour alimenter un réseau et c'est par rapport au coût global du réseau et à son bilan de fonctionnement à long terme, qu'il faut comparer le coût de l'étude. On arrive alors à des pourcentages analogues aux précédents.

Ces indications correspondent évidemment aux coûts globaux d'études géotechniques menées jusqu'au niveau de l'exécution (RDT) y compris éventuellement le coût des études préliminaires qui sont généralement infimes tant que des travaux de géophysique, de sondages et d'essais ne sont pas entrepris sur le site. En fait, pour estimer préalablement le coût raisonnable d'une étude géotechnique, on doit tenir compte d'un grand nombre de facteurs comme la nature, les particularités techniques et le budget général du projet, mais aussi comme les particularités géotechniques du site ; on peut seulement apprécier ces dernières puisque c'est précisément elles que l'on devra définir. Dans ces conditions il n'est pas possible de faire mieux que proposer avec plus ou moins de bonheur un cadre financier, limité par un coût minimum au-dessous duquel on ne peut raisonnablement pas aller sans courir le risque d'exécuter un projet mal étudié et un coût maximum au-dessus duquel l'étude ne serait plus justifiée. La légèreté ou le perfectionnisme sont tout aussi critiquables du point de vue économique et

l'on doit toujours assurer la cohérence de l'ensemble qualité/délais/coût de l'étude géotechnique d'une part, et de l'ensemble sécurité/coût de l'ouvrage d'autre part.

Un cas particulier de coût qui peut être exorbitant, est celui de l'étude géotechnique que l'on réalise à la suite d'un accident ou d'un dommage à l'ouvrage ; sans que cela soit vraiment nécessaire et sans que cela apporte grand-chose, les experts dépensent généralement sans compter pour preuve de leur sérieux et à proportion de leur perplexité, les fonds qu'on leur accorde généreusement pour réparer ce qui aurait pu être évité si on avait consacré des fonds nettement inférieurs à une étude correcte du projet. À la suite d'un dommage de fondation de bâtiment, personne n'est choqué de ce que le coût de l'étude géotechnique que l'on réalise pour comprendre et réparer, soit d'environ dix fois ce qu'aurait été le coût d'une étude sérieuse faite avant la construction et qui aurait évité le dommage. Certains géotechniciens sont des spécialistes de ce marché rémunérateur, pratiquement sans risque.

6.2.6 L'étude frelatée

Comme tout autre produit commercial, l'étude géotechnique peut être surfacturée et/ou frelatée ; la victime de l'opération peut être consentante ou non. La surfacturation est préparée avant la commande qui en fixe le prix, par l'entente du géotechnicien et du maître d'ouvrage ou plus fréquemment d'un de ses représentants ; le prix annoncé et même contractuel d'une étude, peut être facilement augmenté en cours d'exécution ; il est aussi facile de rentabiliser une étude obtenue à prix insuffisant, sans que son coût annoncé augmente.

La méthode la plus courante et la moins risquée d'augmenter le prix annoncé consiste à monter en épingle ou à inventer en cours d'étude, des observations préoccupantes sur le sous-sol du site ; si l'affaire est bien montée, le maître d'ouvrage est pratiquement obligé d'accepter la multiplication et l'approfondissement des sondages, la multiplication des essais, des vacations d'ingénieur... découlant de la situation exposée et donc l'augmentation du coût de l'étude.

On peut falsifier les prestations d'une étude, même quand elle est l'objet d'un contrat très contraignant et que les travaux de terrains sont contrôlés au moyen d'attachements. C'est évident pour les prestations intellectuelles : qui peut contrôler le temps qu'un ingénieur consacre à une étude ? Il arrive que les profondeurs réelles des sondages n'aient que de lointains rapports avec celles qui apparaissent sur les coupes et dans les factures ; le mètre-étalon de sondage n'est pas déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres. La multiplication miraculeuse des sondages est plus risquée et donc moins courante ; il n'en va pas de même de celle des essais, pains bénits des sondeurs pressés et des laborantins rêveurs. Il s'agit évidemment de pratiques frauduleuses ; elles ont peu de chances d'être découvertes si la construction et le comportement de l'ouvrage sont ceux attendus. En cas d'imprévus, de dommages ou d'accidents, dont l'étude frelatée est une cause non négligeable, l'étude d'expertise réserve souvent de bien curieuses surprises ; on entend alors dire que le sol est réellement vicieux et la

nature, réellement fantasque, mais on ne met jamais en cause les raisons évidentes des défauts de l'étude initiale.

6.2.7 Les prix vus par les géotechniciens

L'une des choses les plus étonnantes que constate un maître d'ouvrage quand il consulte des géotechniciens de même niveau technique et de même surface commerciale, est l'étendue et la diversité des prix proposés, même quand l'objet et l'étape de l'étude sont clairement définis.

Si sa consultation est un appel d'offres sur bordereau de prix et devis estimatif qu'il a lui-même fixés, les différences de prix des prestations unitaires sont telles que le total peut varier du simple au double ou davantage ; le prix de chaque prestation peut lui, varier dans des proportions bien plus grandes, de un à cinq pour certains essais. Une récente consultation nationale portant sur un important programme de sondages et essais nombreux et variés auprès de 17 géotechniciens, a obtenu une répartition des prix à peu près conforme à la distribution normale de Gauss ; le maximum était le double du minimum et la moyenne, très proche de la médiane. Les géotechniciens proposent-ils leurs prix au hasard ? Il n'existe en tous cas pas de mercuriale géotechnique ; c'est une preuve d'indépendance et d'originalité des géotechniciens !

Si la consultation est un concours pour lequel les géotechniciens doivent proposer un programme et un coût global d'étude, l'étonnement n'est jamais moindre. Pour ce qui peut être considéré comme un même produit, les prix proposés peuvent varier du simple au quadruple et ils sont souvent assortis de réserves sur le coût final de l'opération. S'il veut désigner celui qu'il a choisi, même s'il est le plus cher, devant plusieurs offres de prix assez différentes, le maître d'ouvrage peut facilement amener le plus-disant au niveau du moins-disant. On ne s'étonnera pas que dans ces conditions, certains maîtres d'ouvrages aient tendance à déconsidérer les géotechniciens.

À quoi ça sert ? Qu'est-ce que ça coûte ? Questions fondamentales que doit se poser tout maître d'ouvrage sérieux. Il est rare qu'un géotechnicien y réponde clairement et quand il le fait, qu'il soit entendu.

6.3 Attribution de l'étude

Quand le maître d'ouvrage a défini le cadre financier de l'étude dont il a besoin, il procède à son attribution. Il peut confier directement l'étude au géotechnicien qu'il connaît et qui l'a aidé à établir son budget. Il doit autrement faire appel à la concurrence, solution beaucoup plus épineuse du problème de l'attribution selon des critères exclusivement commerciaux, parfois déguisée en sélection du meilleur : le maître ne dispose pas de tableau de compétence des géotechniciens et il ne connaîtra la qualité de la prestation de celui auquel il a confié l'étude que quand l'ouvrage aura été construit et qu'il n'aura pas subi de dommage.

6.3.1 Attribution directe

Quand elle est honnête, la bonne façon d'attribuer l'étude est de le faire directement à un géotechnicien compétent choisi sur références, ou connu du maître d'ouvrage et/ou du maître d'œuvre.

6.3.1.1 Sur références

Le choix sur références évite la plupart des problèmes commerciaux susceptibles d'influencer la qualité de l'étude, à moins que le géotechnicien ne soit tenté de faire surpayer ses prestations sous prétexte qu'il est seul à en fixer le prix. Une telle attitude ne servirait finalement pas ses intérêts s'il voulait conserver la confiance de son client et sa liberté d'action ; en effet, il tendrait à altérer le rapport intérêt/coût de son intervention et risquerait donc de conduire le maître à se passer de l'étude ou à s'adresser à un autre que lui.

L'attribution sur références pose évidemment le problème des critères de compétence. Pour un ouvrage particulier de haute technicité, c'est la notoriété du géotechnicien qui prime. Pour un ouvrage courant, dont l'étude pourrait être confiée à divers géotechniciens, ce peut être la recommandation d'un tiers ayant pu apprécier les services de l'un d'entre eux ou, avec plus d'incertitude, l'utilisation de la liste d'agrément d'un organisme de qualification ou d'un syndicat professionnels.

6.3.1.2 Par copinage ou concussion

Le copinage entre contractants directs, maître d'ouvrage et/ou maître d'œuvre et géotechnicien, n'est pas anormal : le maître assume les conséquences de son choix s'il est mauvais.

La perversion de ce procédé est de faire passer des critères personnels souvent inavouables ou même illicites, avant les critères de compétence : si le copinage implique un autre décideur, il lèse non seulement les géotechniciens arbitrairement écartés, mais aussi le maître d'ouvrage en cas de mauvais choix.

Quand il s'agit d'un maître d'ouvrage public, le procédé est risqué mais les moyens de le déguiser ne manquent pas ; si le choix est bon, il peut se justifier ; s'il est mauvais, c'est le contribuable qui paiera, mais on ne le lui dira pas ! La concussion est pire que le copinage ; le choix est toujours mauvais et le décideur, toujours malhonnête ; le contribuable paiera davantage et aura un ouvrage défectueux ; on le lui dira peut-être si, à la suite d'un grave accident, l'affaire devient scandaleuse.

6.3.2 Appel à la concurrence

S'il ne connaît pas de géotechnicien, s'il veut en comparer d'autres à celui qu'il connaît, ou pour suivre à des règles administratives moins strictes qu'on le prétend afin de rester maître du jeu, le maître d'ouvrage fait appel à la concurrence.

Parmi les avantages qu'il attend d'une étude géotechnique, l'avantage financier est généralement celui sur lequel se cristallise son attention ; et comme il confond toujours plus ou moins confusément le court et le long terme, il lance un appel d'offre pour sélectionner le géotechnicien par le coût prévisionnel de l'étude. Alors, les choses vont se compliquer pour lui ; il va évidemment manquer de critères de choix techniques ; aucun de ceux qu'il utilise pour sélectionner ses entrepreneurs de travaux ne le mènera à la meilleure étude géotechnique possible : bien qu'on l'assimile volontiers à un entrepreneur de sondages voire de fondations et travaux spéciaux, le géotechnicien n'est pas un entrepreneur ; sa prestation n'est pas matérielle mais intellectuelle. En effet, c'est seulement quand l'ouvrage sera réalisé, que le maître pourra apprécier la véritable valeur de l'étude qui lui aura été fournie : si c'est traditionnellement au pied du mur qu'il peut juger son maçon, c'est seulement quand le mur sera construit depuis quelque temps qu'il pourra juger son géotechnicien. Mais le maître ne pourra évidemment pas utiliser ce critère pour choisir celui qui réalisera l'étude ; et il n'aura ni le loisir, ni les moyens de faire réaliser plusieurs études d'un même ouvrage afin de pouvoir ensuite comparer les avantages qui résulteraient de chacune d'elles pour l'économie de l'étude et de la construction de l'ouvrage ; ce serait objectivement la meilleure façon de résoudre son problème.

Bien entendu, le copinage et la concussion ont aussi leur place éventuelle dans les appels d'offres ; le respect scrupuleux de la forme que l'on avance toujours est loin d'être le garant de l'honnêteté de l'attribution.

6.3.2.1 Appels d'offres

La condition préalable du succès d'un appel d'offres est la sélection sévère des concurrents ; l'incompétence du géotechnicien ne peut pourtant pas être écartée et quand elle se présente, elle crée une fausse situation de concurrence puis entraîne éventuellement de graves conséquences techniques et économiques. Elle est rendue possible par l'incompétence géotechnique encore plus grande de la plupart des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvres qui sont généralement incapables de juger sagement la proposition technique qui leur est faite et se laissent séduire par une proposition financière alléchante, même s'ils sentent confusément que celui qui l'a faite n'est pas exactement celui dont ils ont besoin. Si l'appel d'offres est très ouvert, on trouve presque toujours parmi les candidats, un entrepreneur de sondages et/ou de fondations et travaux spéciaux dont les connaissances géotechniques sont limitées à leurs spécialités, pour proposer une étude en annonçant un prix défiant toute concurrence, généralement pour préparer son éventuelle intervention future ; sa proposition est très souvent retenue comme la moins chère et pour cette seule raison, car à court terme, l'attrait d'une moindre dépense l'emporte habituellement sur toute autre considération. Et il arrive que l'étude ainsi réalisée doive ensuite être reprise si l'on s'aperçoit à temps de l'insuffisance de ce curieux géotechnicien. Plus souvent, cela n'apparaîtra qu'à la construction, ce qui peut être grave, tant pour le délai d'exécution que pour le coût final de l'ouvrage et plus encore pour la réputation de la géotechnique.

► Appel d'offres restreint sur concours

Apparemment, la meilleure façon de faire appel à la concurrence est de demander aux géotechniciens consultés, de proposer à la fois un programme et un budget détaillés, c'est-à-dire, en termes administratifs, de lancer un appel d'offres restreint sur concours. Restreint, car il est essentiel d'avoir soigneusement présélectionné les concurrents, afin de pouvoir comparer des gens et des niveaux de compétence qui soient réellement comparables. Cette première sélection ne peut se faire que sur références ou recommandations ; si injuste que cela soit pour ceux qui seront alors éliminés d'office, il est difficile de faire autrement dans ce type d'appel d'offres, si le maître ne veut pas multiplier les contacts préliminaires avec tous les géotechniciens susceptibles de s'intéresser à l'affaire. Pour éviter que cette situation ne se reproduise, rien n'empêche le maître qui voudrait connaître sans risque de nouveaux géotechniciens, de les consulter préalablement à l'occasion d'études limitées et faciles.

Le premier défaut de cette démarche est la possibilité pour le maître d'éliminer ou de favoriser qui bon lui semble sans avoir vraiment à se justifier, ce qui fausse le jeu de la concurrence, en paraissant respecter la démarche d'attribution. Et s'il agit régulièrement, malgré toutes les précautions préalables qu'il ait pu prendre, il lui sera très difficile et même hasardeux de juger des concurrents et d'en choisir un de cette façon.

Chacun des concurrents sélectionnés propose en effet un programme d'étude détaillée, y adjoint une série de prix et un devis estimatif correspondant aux prestations qu'il pense devoir fournir pour le réaliser. Du point de vue financier au moins, la situation est claire car il est évidemment facile de déterminer celui qui propose le moindre prix ; si sa démarche est normale, c'est lui que le maître doit retenir puisque la sélection technique a déjà été faite.

En fait, il est risqué de retenir ce seul critère, apparemment simple et net : la sous-estimation intentionnelle ou non du prix proposé est un autre défaut de cette démarche. Un concurrent de bonne foi et compétent peut minimiser sa proposition sur une erreur d'appréciation ou pour qu'elle ait plus de chance d'être agréée ; cela se produit en période économique difficile quand les affaires sont rares et la concurrence agressive. Rien ne permet d'affirmer qu'il ne devra pas modifier son programme en cours d'étude et proposer des compléments de travaux, souvent fort onéreux, pour préciser ses premières informations. S'il pouvait fixer *a priori* son programme de façon rigide, cela voudrait dire qu'il connaîtrait parfaitement le site qu'on lui demande d'étudier ; la réalisation du programme proposé ne serait utile que pour contrôler ses informations ; il pourrait toujours faire cela de façon simple et peu onéreuse, mais peu compatible avec son intérêt financier. Il est donc peu probable qu'un maître rencontre une telle situation.

Un maître d'ouvrage ne peut pas prendre le risque apparent ou non, de refuser des travaux susceptibles de fournir les compléments d'informations présentés comme indispensables ; il est en général incapable d'en apprécier l'utilité réelle. Il est alors facile et sans danger commercial pour un géotechnicien compétent mais peu délicat, de minimiser son programme initial pour être choisi, puis de convaincre son client que les premiers renseignements recueillis étant sensi-

blement différents de ceux qu'il attendait, il importe d'accroître le volume des travaux initialement prévu. Pour accaparer un marché prometteur qui se développe rapidement, de façon anarchique, comme celui de la géotechnique et pour éliminer ses confrères moins solides ou isolés, c'est une pratique sans risque et avantageuse pour un concurrent riche et/ou bien épaulé ; à moins d'être consentant, peu de maîtres d'ouvrages sont capables de l'éventer au niveau de l'appel d'offres et elle peut les léser gravement. L'étude géotechnique voit son coût final devenir plus ou moins largement supérieur à celui du devis, au point que s'il avait été avancé dès l'abord, il aurait été jugé parfaitement déraisonnable ; cela aurait conduit à mettre en question la rentabilité globale de l'étude, c'est-à-dire l'opportunité de sa réalisation telle qu'elle était proposée.

L'appel d'offres restreint sur concours présente donc trop d'inconvénients pour que l'on puisse conseiller à un maître d'ouvrage d'en adopter les règles à moins qu'il ne soit lui-même particulièrement compétent en géotechnique et soit ainsi capable d'éventer les propositions pièges de certains concurrents.

C'est par contre un excellent moyen pour lui, d'attribuer l'étude à qui bon lui semble tout en respectant pour la forme, les règles administratives. En dehors de celui qu'il veut favoriser, il ne sélectionne que des concurrents dont il sait qu'ils ne pourront pas répondre correctement au programme qu'il propose, soit faute de moyens, de compétence ou de références, soit parce que ce programme comporte des rubriques spécifiques de l'activité du favori.

► **Appel d'offres restreint sur bordereau de prix**

À première vue, la deuxième façon de faire appel à la concurrence en géotechnique, l'appel d'offres restreint sur bordereau de prix, paraît beaucoup plus facile à mettre en œuvre et semble devoir conduire à un résultat commercial beaucoup plus sûr ou tout au moins beaucoup plus simple à interpréter que la première ; c'est la raison pour laquelle elle est la plus courante ; elle est pratiquement la règle pour le public et le parapublic.

En fait elle aussi aboutit à une impasse. Le maître propose lui-même le programme complet de l'étude géotechnique détaillée et le cadre d'un bordereau de prix que les géotechniciens consultés remplissent. Il compare ensuite les prix unitaires et surtout le montant total de chaque soumission et, bien entendu plus ou moins poussé par la règle ou un contrôleur financier, il est pratiquement contraint de choisir le moins disant même s'il n'y est pas absolument obligé par les textes. Mais une étude géotechnique n'est pas un chantier de travaux publics et le géotechnicien n'est pas un entrepreneur ; certains géotechniciens entretiennent la confusion entre étude géotechnique et campagne de sondages pour le leur faire oublier ! On voit le ridicule d'une telle pratique qui le conduit à choisir le géotechnicien auquel il va confier une part importante de responsabilités techniques et économiques dans l'étude et la construction de son ouvrage : il préfère devoir payer quelques francs de moins pour l'exécution d'un mètre de sondage alors que le prix moyen d'une journée d'ingénieur vaut plusieurs de ces mètres et qu'une journée d'ingénieur qualifié bien employée peut réduire de quelques dizaines de mètres une campagne de sondages mal préparée et surtout conduire à une étude correcte.

D'autre part, il y a fort peu de chances pour que le maître d'ouvrage propose un programme bien adapté à ses besoins car son incompetence en géotechnique est à peu près certaine. Il fausse du reste ainsi le jeu de la concurrence dans la mesure où c'est précisément le programme d'un géotechnicien, reflet de sa façon de concevoir son activité, qui permet de le distinguer d'un autre. Enfin, il est difficile d'exiger que le géotechnicien engage sa responsabilité sur les résultats d'une étude dont il n'aurait pas établi le programme, ou alors il faudrait que le maître accepte qu'une fois le géotechnicien choisi sur la base d'un programme type plus ou moins dénué de sens réel, il ait la possibilité de proposer un programme personnel, ce qui serait pour le moins malhonnête vis-à-vis des concurrents écartés.

En fait, il n'est pas indiqué de sélectionner sur appel d'offres un géotechnicien en qui on doit avant tout avoir confiance : entre le maître et son géotechnicien, les rapports de client à fournisseur doivent passer largement derrière les rapports de consultant à consulté, car leur intérêt commun est l'économie de l'ouvrage, pas celui de l'étude dont le coût est infime, comparé à celui de l'ouvrage.

6.3.2.2 Le maître d'ouvrage géotechnicien

La troisième façon courante de résoudre le problème est que le maître d'ouvrage assure lui-même la fonction de géotechnicien, souvent en la déléguant à un ingénieur plus ou moins spécialisé, plus rarement à un vrai géotechnicien vacataire ou salarié ; il confie la mise en œuvre des différentes techniques d'étude à des entreprises spécialisées qui n'interviennent alors que pour produire un travail plus ou moins précis avec seulement, en théorie tout au moins, une simple responsabilité d'exécution. La concurrence peut alors normalement jouer entre ces entreprises mais en fait, il ne s'agit plus de concurrence géotechnique ; ce système escamote le problème en le fractionnant et en le vidant de son objet initial. En fait même, il est bien rare que dans le travail d'une entreprise spécialisée, il n'entre pas une certaine part de responsabilité de conception et d'interprétation car même une coupe de sondage carotté n'est pas parfaitement objective ; cela entraîne finalement une inextricable interpénétration de responsabilités, dont le maître d'ouvrage s'accommodera difficilement s'il veut conserver sa sérénité de jugement et sa sûreté de décision ; comment savoir si les résultats d'un essai de laboratoire sont douteux parce que l'échantillon a été mal prélevé ou parce que l'essai a été mal fait ?

De toute façon, une telle organisation ne peut présenter quelques avantages que pour de très grands projets imposant des études longues et complexes. Elle ne peut pas être généralisée car seul peut y avoir recours un maître d'ouvrage permanent qui réalise l'un après l'autre d'importants projets.

Enfin cette démarche est certainement très longue, très malaisée et très onéreuse à appliquer. Il est d'une part nécessaire de préparer très soigneusement le programme de chaque technique, de consulter les spécialistes, juger leurs réponses, en choisir un, attendre qu'il ait réalisé son travail et déposé ses conclusions, les exploiter pour recommencer avec la technique suivante. Il est d'autre part évident que chaque spécialiste veut faire en sorte que son intervention soit

rentable en elle-même et a donc tendance à la justifier, même s'il s'aperçoit au cours de son travail qu'elle n'est pas particulièrement apte à résoudre le problème posé. Il est enfin admis que l'on ne dérange jamais un spécialiste pour une petite intervention, de sorte que chaque intervention devra être gonflée et sera donc en grande partie inutile. Un gros entrepreneur de sondages ne s'intéresse qu'à un programme initial assez volumineux, ce qui obligera le maître d'ouvrage à le prévoir tel s'il veut l'intéresser à son appel d'offres ; le sondeur choisi a intérêt qu'au cours d'une même campagne, les sondages se multiplient et s'approfondissent même s'il s'aperçoit qu'un petit nombre de sondages peu profonds serait suffisant ; et si c'est le maître qui s'en aperçoit, il peut difficilement modifier le déroulement des travaux en raison de l'existence du marché bâti sur le programme initial.

6.3.2.3 Sévère sélection, concours limité et marché à commandes

Comment donc résoudre le problème commercial du choix du géotechnicien anonyme ? La solution suivante n'est sûrement pas tout à fait satisfaisante mais pour la géotechnique, elle peut être considérée comme la moins mauvaise. Bien entendu, elle procède un peu de toutes mais elle présente sur elles l'avantage de permettre au maître loyal mais attentif, de conserver jusqu'au bout sa liberté et son pouvoir de contrôle vis-à-vis du géotechnicien choisi.

En premier lieu, le maître dresse une liste restreinte de géotechniciens très sévèrement sélectionnés, d'abord sur références scientifiques et techniques réelles et personnelles. Les grands bureaux d'études de sols et les grandes entreprises de sondages ou de travaux spéciaux relatifs au sous-sol, ont de très nombreux ingénieurs spécialisés et pourront donc fournir facilement de telles références ; dans le cas où l'un d'entre eux serait choisi, le maître risque de devoir l'obliger à confier effectivement l'étude au géotechnicien proposé, ce qu'il ne ferait sans doute pas sans cela. Une perversion fréquente de la sélection est le copinage d'un géotechnicien avec le conseil du maître d'ouvrage.

La sélection porte ensuite sur les moyens matériels de l'équipe du géotechnicien. Comme il s'agit de confier à un même groupe, sous la responsabilité d'un seul homme ou d'une équipe restreinte, l'ensemble de l'étude, c'est-à-dire entre autres, la mise en œuvre directe ou par sous-traitance de n'importe quelle technique de la géotechnique, il est évidemment nécessaire que le maître sache avec le maximum de précision, quels sont les moyens matériels de chaque géotechnicien consulté. Bien que la sous-traitance par le géotechnicien de certaines techniques soit envisageable et en tout état de cause, préférable à un marché direct entre un spécialiste et le maître d'ouvrage, ce dernier a intérêt à choisir un géotechnicien disposant de la plupart des principaux moyens nécessaires à l'étude ; il évitera de choisir un praticien trop spécialisé, très bien équipé dans sa spécialité et obligé de sous-traiter les autres travaux dont il n'aurait de toute façon qu'une connaissance sommaire.

À condition qu'elle soit honnête, cette sévère sélection, fondée à la fois sur des considérations scientifiques, techniques et matérielles, permet de ne retenir que deux ou trois géotechniciens compétents. Le maître leur propose d'élaborer un programme en deux phases ; d'abord il fixe seulement le but et le niveau de

précision d'une étude préliminaire pour la rétribution de laquelle il demande un prix forfaitaire non révisable qui ne sera jamais bien élevé, de façon à ne pas gêner le géotechnicien choisi dans le cas où il aurait commis une erreur d'appréciation ; chaque géotechnicien doit ensuite présenter le programme et établir le budget prévisionnel de l'étude détaillée, véritable objet de la consultation. Comme le maître ne peut exiger que les géotechniciens puissent, avant d'avoir réalisé l'étude préliminaire, présenter un programme et un budget détaillés alors qu'ils ignorent à peu près tout du problème géotechnique qu'ils devront résoudre, il utilise uniquement ces indications pour comprendre et juger la façon dont chacun travaille et pour connaître les prix qu'il a l'habitude de pratiquer. Si, avec une proposition ferme d'étude préliminaire et un programme d'étude détaillée, il est possible de choisir l'un d'entre eux, il lui suffit ensuite d'attendre que ce dernier ait réalisé son étude préliminaire pour discuter avec lui de la mise au point de son programme définitif d'étude détaillée ; le maître est alors beaucoup mieux armé pour discuter avec lui de ce programme et de son budget. Un marché sur bordereau de prix peut alors être établi et son montant évalué d'un commun accord entre le maître d'ouvrage et le géotechnicien. Pour le public et le parapublic, la forme du marché à commandes passé de gré à gré, est particulièrement bien adaptée au cas de la géotechnique ; le coût d'une étude ne dépasse pratiquement jamais le maximum autorisé pour ce type de marché. Elle offre une grande souplesse d'application dans l'hypothèse probable où le programme initial devrait être modifié dans son déroulement sinon dans son budget. Il importe bien entendu que le déroulement du programme se fasse ensuite par phases de sorte que le maître ait le contrôle permanent du budget mis initialement à la disposition du géotechnicien, en organisant des réunions périodiques au cours desquelles les résultats déjà acquis lui seront présentés et la suite des travaux sera définie jusqu'à la réunion suivante.

Si par contre, la proposition d'étude préliminaire et la présentation d'un programme détaillé ne permettent pas de départager deux concurrents, il est sage de faire exécuter concurremment par chacun, l'étude préliminaire dont le budget ne peut être qu'infime, comparée au budget total de l'étude détaillée. Chacun d'eux peut alors présenter en toute connaissance de cause son programme et son devis d'étude détaillée sur lesquels le maître d'ouvrage peut exiger un engagement ferme de la part du concurrent choisi. Le maître doit bien entendu exercer encore en permanence, un contrôle analogue à celui défini dans le cas précédent.

Cette démarche peut paraître compliquée et longue à mettre en œuvre. C'est pourtant la seule que puisse utiliser un maître d'ouvrage obligé ou soucieux de choisir équitablement entre plusieurs géotechniciens qu'il ne pourrait classer sur d'autres bases. Elle ne peut évidemment être utilisée que pour des études importantes, ou bien pour la première étude d'une série.

Des rapports de confiance réciproque seront ensuite toujours préférables à une démarche administrative rigide dont le résultat, pour être positif, exige un luxe de précautions qu'il serait fastidieux et vain de prendre à tout propos. On pourra donc ensuite recourir à l'attribution directe ; quoi que l'on en dise, le marché de gré à gré est presque toujours licite pour des commandes publiques, car le coût de la plupart des études géotechniques atteint rarement le montant maximum autorisé pour ce type de marché.

LA RESPONSABILITÉ DU GÉOTECHNICIEN

En cas de dommages au gros œuvre d'un bâtiment, et maintenant de plus en plus d'un ouvrage quelconque, sans même vérifier s'ils affectent sa solidité et le rendent impropre à sa destination, ce qui n'est pas souvent le cas bien que la loi (cf. 7.2) en fasse la condition de son application, les experts d'assurance puis éventuellement l'expert judiciaire qui sont rarement compétents en géotechnique, évoquent souvent *a priori* un défaut de fondation résultant d'un « vice du sol » comme dit l'article 1792 du Code civil, alors qu'ils résultent presque toujours de défauts architectoniques ; la responsabilité du géotechnicien est donc systématiquement recherchée, même si l'étude qu'on lui avait commandée et qu'il a produite était au plus du niveau APS ; dans ce cas, n'ayant pas participé en ce qui l'aurait concerné, à la totalité de l'étude du projet et de la construction de l'ouvrage, le géotechnicien ne devrait pas être considéré comme un constructeur au sens de la loi : la nature de sa responsabilité devrait être distinguée de celle des autres intervenants ; on pourrait avancer qu'il n'a pas assumé correctement son devoir de conseil et qu'il aurait dû proposer une étude de niveau STD... que la plupart des maîtres d'ouvrages refusent de financer : l'utilisation abusive de l'étude géotechnique sommaire est en effet une pratique courante, délibérée ou non, du BTP. Il est rare que l'avocat choisi par l'assureur du géotechnicien conteste sa qualité de constructeur au prétexte que cette position indisposerait les magistrats, ce que l'expérience infirme souvent en première instance et toujours en appel : c'est en fait parce qu'elle troublerait sa routine et le souhait de tous les assureurs, partager le plus largement possible les responsabilités entre tous les intervenants et donc les indemnités entre eux.

7.1 La garantie du risque géotechnique

Une première difficulté de garantir le risque géotechnique réside dans l'indigence et la foison de textes législatifs et réglementaires spécifiques qui en permettraient la prévention. Le plus important concerne les PPR qui réglementent la construction sur certains territoires communaux très exposés aux mouvements de terrains et autres phénomènes naturels parfois destructeurs ; les PPR publiés constituent des servitudes d'utilité publique ; d'autres textes permettent d'intervenir au cas par cas. Certaines annexes du Code des marchés publics attirent l'attention sur le risque géotechnique et indiquent les mesures à prendre pour s'en prémunir ; elles ne concernent que les ouvrages publics.

Une deuxième difficulté de garantir le risque géotechnique réside dans l'imprécision des textes utilisables pour sanctionner les accidents. Pour les ouvrages privés en dehors des zones de PPR ou de zones particulières, on ne dispose que de l'action judiciaire fondée sur le Code civil ; comme toute action de sanction, elle ne peut intervenir qu'après l'événement dommageable, c'est-à-dire trop tard. Cette action doit elle-même s'appuyer sur des textes législatifs, forcément généraux, et être menée selon un scénario qui lui est propre, lourd, onéreux et techniquement peu fiable.

Les textes généraux sont ceux du droit commun ; en matière civile, c'est-à-dire quand l'accident n'a occasionné que des dommages matériels, ce sont les articles du Code civil qui traitent de la responsabilité générale, contractuelle ou décennale ; en matière pénale, quand il y a eu atteinte à la personne humaine, les articles du Code pénal qui sanctionnent les coups, blessures et homicides involontaires... Ces textes de bases sont ainsi très imprécis. Ils tiennent en quelques pages voire en quelques lignes et s'appliquent à tous les cas de responsabilité, quelle qu'elle soit. La jurisprudence, c'est-à-dire la manière dont ces textes ont été interprétés par les tribunaux dans des cas spécifiques, permet de les préciser selon le cas envisagé en arrêtant une doctrine de mise en œuvre. Bien que la jurisprudence évolue lentement et, à une époque donnée, règle assez étroitement la décision d'un tribunal, elle n'a pas force de loi et rien n'empêche deux tribunaux de juger différemment des cas analogues, pourvu que leurs jugements demeurent en accord avec les articles de référence du droit commun.

La jurisprudence géotechnique spécifique est quasi inexistante. Celle qui concerne les rapports du maître d'ouvrage, du maître d'œuvre et de l'entreprise n'est pas adaptée à l'activité du géotechnicien qui n'intervient pas directement sur l'ouvrage et ne paraît que très rarement sur les chantiers ; du reste, la loi comme la jurisprudence laisse clairement le soin du risque du sol au maître d'œuvre. Sauf dans le cas de dommages à l'ouvrage où la responsabilité des constructeurs est de plein droit, l'appréciation de la responsabilité se réfère à des notions aussi générales que l'incompétence, l'imprévoyance, l'imprudence, la légèreté, la négligence..., qui ressortissent plus au domaine de la psychologie et de la morale qu'à celui de la science et de la technique. Mais pour le juge, ce sont au contraire des notions très précises de comportements fautifs, qu'il peut considérer par appréciation souveraine comme des faits générateurs d'accidents, constitutifs de quasi-délits.

La troisième difficulté qui n'est sans doute pas la moindre, réside dans la mise en œuvre et dans le déroulement de l'action judiciaire. Un accident géotechnique qui n'a causé que des dommages matériels, amène une action judiciaire simple, n'opposant que des parties de droit privé. Généralement peu spectaculaires et par là même ignorés du public qui pense plutôt aux catastrophes, de tels accidents sont extrêmement fréquents en période de travaux, alors que l'ouvrage est particulièrement vulnérable ; ils opposent en principe le maître d'œuvre et l'entreprise au maître d'ouvrage et éventuellement à des tiers. L'éboulement d'une paroi de fouille en site urbain, affecte le chantier mais aussi le voisinage ; avant même que s'ouvre un contentieux, il importe que l'on prenne des mesures de sécurité immédiates ; les parties les plus diligentes, même si elles seront opposées dans le contentieux, portent conjointement sans délais l'affaire devant

le Tribunal de grande instance du lieu. À l'audience de référé, le président entend les parties mais sans préjuger le fond, il ne peut que décider des mesures d'urgence et/ou conservatoires et ainsi désigner un expert puisqu'il est incompetent sur le plan technique ; de toute façon, il ne connaît de l'accident que ce que les avocats des parties lui exposent en quelques minutes. Et au cours d'une même audience, il entend l'exposé d'une vingtaine d'affaires allant du défaut d'étanchéité de robinets sanitaires à l'écroulement d'une paroi moulée et celle-là est heureusement parmi les plus rares ; il est évidemment beaucoup plus familier du premier type d'affaire, au niveau duquel il risque inconsciemment de placer le second. Pour choisir l'expert, le président d'un tribunal encombré, mal informé et sollicité par les affaires suivantes, ne peut que parcourir rapidement des yeux la liste des experts de la Cour, ou bien désigner quelqu'un qu'il connaît. Il n'y a pratiquement aucune chance pour que ce soit un géotechnicien, d'abord parce que les experts de cette spécialité sont très peu nombreux et ensuite parce que pour le président, un ingénieur du bâtiment ou un architecte sont déjà des techniciens ultra spécialisés, parfaitement capables de l'éclairer. On peut donc dire sans exagérer, que dans les affaires géotechniques, l'expert, pratiquement désigné au hasard, est rarement compétent.

7.1.1 Les limites de la géotechnique

L'exercice de la géotechnique a des limites qui ne permettent pas d'atteindre la certitude qu'exige le droit pour lequel il importe de ne rien laisser au hasard et de ne prendre aucun risque. Elle aide seulement à déterminer avec plus ou moins de précision, la probabilité des corrélations d'un fait géotechnique et de ses causes ou de ses conséquences supposées et d'obtenir des résultats plus ou moins acceptables selon la difficulté du projet, la complexité du site et l'état des connaissances technico-scientifiques du moment ; la sécurité absolue qui correspond à la probabilité rigoureusement nulle de voir se produire un accident est une vue de l'esprit.

La source du droit est la loi, éventuellement interprétée par la jurisprudence ; à une époque donnée, cette interprétation se fait toujours dans des limites assez étroites et elle évolue très lentement, par touches imperceptibles, généralement pour préciser un détail, très rarement pour modifier l'esprit de la loi ; elle demeure donc rigide. La dialectique du droit seul, qui est en fait une collection de lois rigoureuses et déterminées, facilement accessibles à l'esprit humain parce qu'elles en sont le pur produit, peut difficilement être confrontée à celle de la science qui essaie avec plus ou moins de succès de discerner dans les faits observables, des lois très nuancées et difficilement accessibles à l'esprit humain, parce que ce qu'elles représentent existe indépendamment de lui. En fait, le droit et la science attribuent au mot loi des concepts tout à fait différents ; pour le premier, les lois sont en effet des règles qu'il importe de suivre et pour la seconde, elles ne font que traduire des processus que l'on essaie de comprendre et des conditions que l'on s'efforce de connaître sans jamais y parvenir complètement.

Le juriste, habitué à la manipulation de règles obligatoires et nécessaires, admet difficilement que le géotechnicien avec lequel il n'a en fait pas de langage commun, doive se contenter d'utiliser des conditions de relations de phénomènes plus ou moins bien définis pour donner une image fugitive, personnelle et forcément schématique du site et du comportement de l'ensemble site/ouvrage. Il doit pourtant considérer qu'en fait, le géotechnicien ne peut faire mieux qu'essayer de définir le moins mal possible, les grandes lignes de l'évolution de cet ensemble, qu'il ne pourra jamais préciser cette évolution avant d'avoir observé le comportement de l'ouvrage après la construction et qu'au moment de l'étude, il peut seulement établir un diagnostic qui contribue tout au plus à accroître les chances de réussite du pari que fait tout maître qui construit un ouvrage dont de toute façon, l'état final sera toujours la ruine. Et en droit, une erreur de diagnostic ne peut être assimilée à une faute qu'avec beaucoup de réserves, selon l'appréciation souveraine du juge.

7.1.2 Le risque calculé

La confrontation de ces points de vue totalement divergents, conduirait à un dialogue de sourds et condamnerait la recherche scientifique appliquée en général et l'étude géotechnique en particulier, si l'on n'admettait pas la notion évidemment dangereuse dans la mesure où elle serait abusivement utilisée, de risque calculé. Prendre un risque calculé, c'est d'abord le définir et c'est ensuite faire en sorte que la probabilité de voir se produire un accident limité soit aussi faible que possible ou du moins compatible avec la raison d'être de l'ouvrage et la sécurité de ses environs. Prendre de tels risques est le lot commun de tous les innovateurs, ce que sont toujours les constructeurs puisque tout ouvrage est un prototype, particulièrement dans ses relations avec le site. Ainsi, dans l'acte de construire, c'est le géotechnicien qui est le plus amené à en faire prendre au maître. En cas de dommage qui démontrerait que le risque a été mal calculé, il pourrait difficilement le lui reprocher s'il a été prévenu et a donné son accord : on ne peut pas reprocher une erreur à qui fait une expérience en prenant toutes les précautions possibles pour avoir le maximum de chances de la réussir ; mais si l'erreur est établie, le juge peut la considérer comme fautive même si elle n'est pas intentionnelle, ce qui favorise le maître. En fait, le droit français ne prend pas formellement position sur cet aspect de la responsabilité du concepteur vis-à-vis du maître d'ouvrage qui peut avoir intérêt à prendre un tel risque pour améliorer son ouvrage ou son opération ; certains droits européens le font au bénéfice du concepteur.

En cas d'accident géotechnique aux conséquences catastrophiques, il faut résoudre le problème quasi insoluble de la conciliation de la morale et de l'intérêt qui veulent un responsable, du droit qui doit qualifier la responsabilité par l'existence ou l'absence d'un acte personnel ou collectif fautif qui aurait avec la catastrophe une relation de cause à effet, et de la science qui connaît ses limites et doute ainsi de la valeur intrinsèque de la compétence humaine. On est alors tenté d'admettre que la nature détient des secrets qu'à un moment donné, la science n'est pas capable de percer, ce qui reviendrait à supprimer la respon-

sabilité humaine par le jeu de la fatalité : la fatalité et/ou le hasard sont souvent évoqués à la suite d'événements catastrophiques.

Selon le sens commun, la fatalité se définit soit comme la force occulte réglant d'avance et de façon irrévocable, un événement qui peut être éventuellement prévu mais demeure inévitable, soit comme l'enchaînement malheureux ou le concours fâcheux de circonstances entraînant un événement imprévu et inévitable. Le juriste ne connaît pas la fatalité mais le cas fortuit et de force majeure, événement imprévu, contraignant et insurmontable, empêchant l'exécution d'une obligation et libérant l'obligé. Formellement, la thèse de la fatalité n'a donc rien de juridique mais elle est fréquemment soutenue lors de procès consécutifs à des catastrophes dites naturelles. Elle doit donc être précisée ici ; car si le bien fondé de la prémisse philosophique de cette thèse ne peut être mis en doute, sa conclusion juridique peut paraître excessive dans la majorité des cas. Il est donc essentiel de tenter de définir dans quelles conditions elle peut être admise ou non, c'est-à-dire de préciser dans quelles conditions un événement ayant eu des conséquences catastrophiques était ou non prévisible, soit encore de dire si sa production était ou non le fait du hasard.

Du point de vue scientifique, le hasard pur ne saurait être considéré comme le seul moteur de l'évolution, car alors aucune loi ne pourrait être exprimée et par conséquent, aucune prévision ne serait possible, ce qui aurait pour corollaire la vanité de la recherche scientifique et même l'inexistence de la science ; à la suite de Démocrite et d'Épicure, Monod avait associé la nécessité au hasard pour expliquer l'évolution ; on peut y ajouter les circonstances et sans doute bien d'autres choses que l'on connaît mal ou que l'on ignore. Le hasard serait alors une manifestation de ce que nous ne savons pas prévoir ou même de l'imprévisible.

Si le phénomène n'est pas parfaitement connu, déterminé, c'est-à-dire s'il n'est pas lié à ses causes et à ses effets par des lois quantitatives rigoureuses, clairement exprimées comme des égalités, le hasard scientifique peut se manifester de trois façons. Dans la première, la connaissance précise du phénomène est rendue impossible par sa nature même ; on le dit alors aléatoire, c'est-à-dire, statistiquement pondérable ; des lois quantitatives comme des inégalités ou des intervalles de définitions de fonction de ce phénomène, peuvent dans ce cas être rigoureusement exprimées ; elles ont la même valeur épistémologique que les lois précédentes. Dans la deuxième, la connaissance du phénomène ainsi que de ses causes et ses effets, est imparfaite car l'étude n'en est pas encore assez avancée ; des lois approchées, qualitatives ou semi-quantitatives peuvent alors être exprimées avec plus ou moins de réserves et l'on peut espérer que, dans un avenir plus ou moins proche, on pourra exprimer à son sujet des lois définies de l'un ou l'autre type. Dans la troisième façon, le phénomène est ignoré car il n'a jamais été observé ; aucune loi même qualitative, n'a donc pu encore être exprimée à son sujet et c'est seulement à la manifestation d'un tel phénomène que l'on pourra légitimement évoquer la fatalité.

Tout le reste ressortit uniquement à la légitimité d'avoir pris consciemment ou non un certain risque calculé à propos d'un phénomène plus ou moins bien connu ; c'est sur l'opportunité de l'avoir pris que l'on devrait juger, pour dire si

l'acte était compatible avec le degré de connaissance du phénomène et la gravité de ses conséquences possibles ; généralement, on préfère s'en tenir au caractère fautif ou non des comportements, décisions ou actes éventuellement à l'origine de la prise de risque. En fait toute construction d'ouvrage est plus ou moins risquée financièrement et/ou matériellement ; avant de décider de prendre un risque, le maître a dû l'évaluer et le confronter aux avantages qu'il pouvait attendre à le prendre. C'est une analyse difficile et subjective qui peut être biaisée, volontairement ou non, en minimisant le risque et en exagérant les avantages. En géotechnique, s'il s'agit d'un phénomène naturel, c'est la fréquence statistique de ses événements dangereux qui permet de décider ; s'il s'agit d'un phénomène induit, il faut en faire l'étude détaillée ; on peut aussi faire une évaluation arbitraire et pas toujours honnête pour forcer une décision ; c'est très dangereux mais de pratique courante en matière de grands ouvrages publics. On constate parfois que le coût et les délais d'exécution d'un grand terrassement, d'un ouvrage souterrain... peuvent plus que doubler à la suite d'un grave accident géotechnique ; presque toujours, cela résulte en grande partie de l'optimisme affiché par les constructeurs pour convaincre des décideurs réservés ; et pourtant dans certains cas, l'étude géotechnique montrait clairement que le risque était patent ; mais ensuite les rapports de telles études sont particulièrement volatils !

Quand le risque n'est que financier, on finit toujours par construire l'ouvrage en modifiant le projet initial ; ce fut le cas du canal de Panama et de ses gigantesques terrassements, irréalisables comme ils avaient été prévus ; il fonctionne toujours et le scandale financier est oublié depuis longtemps.

Prendre le risque de voir se produire quelques désordres n'affectant ni la solidité ni le bon fonctionnement de l'ensemble d'un ouvrage peut être parfaitement admis par le maître qui en attend quelque avantage financier ; pour un parking enterré, un radier drainant peut s'avérer moins onéreux qu'un cuvelage, à condition que le coût du débit permanent soit faible ; en décidant d'en faire un, on prend le risque de voir le bilan financier de l'opération gravement affecté, si ce débit a été mal évalué à l'étude.

Prendre le risque de voir la solidité ou le fonctionnement d'un ouvrage compromis au point de le rendre dangereux ou inutilisable, ne peut évidemment être admis en aucun cas ; à moins d'être fou ou foncièrement malhonnête, personne ne prend ce genre de risque dont la réalisation le conduirait droit en prison.

7.2 Le contentieux géotechnique

Avant la construction d'un ouvrage, un contentieux géotechnique peut résulter d'une difficulté d'exécution – terrassement, drainage, fondation..., ou d'un accident – glissement, tassement..., affectant le chantier et/ou son voisinage ; après la réception de l'ouvrage, il peut résulter d'un dommage à l'ouvrage – tassement, inondation... Les cas sont très fréquents et très nombreux, mais ils ne sont souvent considérés comme « géotechniques » que pour attribuer sans

fondement au sol tous les vices plus ou moins difficiles à caractériser d'une construction défectueuse.

La règle du contentieux géotechnique après réception est la loi 78-12 du 4 janvier 1978 dite loi Spinetta, relative à la responsabilité et à l'assurance dans le domaine de la construction (Code civil et Code des assurances).

Selon l'article 1792 CC : *Tout constructeur d'un ouvrage est responsable de plein droit, envers le maître ou l'acquéreur de l'ouvrage, des dommages, même résultant d'un vice du sol, qui compromettent la solidité de l'ouvrage ou qui, l'affectant dans l'un de ces éléments constitutifs ou l'un de ses éléments d'équipement, le rendent impropre à sa destination.*

Selon l'article 1792-1 CC : *Est réputé constructeur de l'ouvrage : Tout architecte, entrepreneur, technicien ou autre personne liée au maître d'ouvrage par un contrat de louage d'ouvrage...*

Selon l'article 2270 CC, la responsabilité des constructeurs se prescrit par dix ans.

Quand un géotechnicien est mis en cause à la suite d'un dommage à l'ouvrage qui n'est pas forcément d'origine géotechnique, c'est-à-dire résultant du vice du sol, c'est en sa qualité plus que discutable de constructeur : le géotechnicien est lié au maître d'ouvrage par un contrat de louage de service destiné à renseigner les constructeurs sur les caractéristiques du site et à établir un diagnostic de comportement, et non sur un contrat de louage d'ouvrage comme participant à l'étude du projet et à la construction de l'ouvrage : dans la plupart des cas, il fournit un rapport sur l'état du site que les constructeurs utilisent comme bon leur semble, sans qu'il intervient directement dans l'étude ni dans la construction et donc *a fortiori*, sans prendre de décision.

Mais dans la plupart des cas, quel que soit le « dommage » affectant le gros œuvre, la mise en péril de l'ouvrage et/ou son impropreté à destination sont admises *a priori* sans être discutées ni même évoquées, le « vice du sol » rarement caractérisé techniquement est la cause retenue par défaut car elle paraît indiscutable aux non-spécialistes et la nature du contrat du géotechnicien n'est jamais analysée. La règle du jeu est donc faussée dès le départ au détriment du géotechnicien.

Contre l'intérêt du géotechnicien, son assureur ne conteste jamais sa qualité de constructeur : il lui a généralement établi un contrat d'assurance obligatoire dans le cadre de la loi de 1978, qui n'est pas adapté à son activité. Certains assureurs prudents exigent toutefois que leurs assurés géotechniciens mettent dans leurs propositions, contrats et rapports, des clauses plus ou moins inspirées par le décret de 1973, la loi MOP et/ou la norme NF (cf. 5.6.2) ; elles affirment évidemment l'obligation de moyen et non de résultat du géotechnicien dans la plupart des cas où il intervient, ce qui est contraire à l'objet du contrat d'assurance et éventuellement, à la loi.

Le contentieux géotechnique purement matériel est d'abord amiable, par l'intermédiaire des assureurs des parties en cause et de leurs experts ; en cas de désaccord qui est pratiquement la règle en matière de dommages-ouvrage malgré les dispositions de la loi de 1978, il devient judiciaire ou administratif.

7.2.1 Le contentieux amiable

La loi de 1978 impose que, sauf dérogations spécifiques, le maître soit assuré pour d'éventuels dommages à l'ouvrage et que la responsabilité professionnelle de chaque constructeur soit elle-même assurée pour le même risque. À l'origine, ce système assez aberrant de responsabilités gigognes – si le maître d'ouvrage est sûr d'être indemnisé en cas de dommage, pourquoi doit-il être assuré pour cela ? entraînant la miraculeuse multiplication des primes, n'a pas été pour déplaire aux assureurs ; à l'usage, il s'est montré très pernicieux car si tous voulaient bien encaisser, aucun n'a voulu payer ; tous se sont donc retrouvés devant des tribunaux, ce que la loi voulait précisément éviter ; ceux-ci leur ont imposé des solutions rarement favorables et rarement équitables pour les constructeurs passés au second plan, car ils doivent être légalement assurés : que les assureurs paient et le dieu des assurances reconnaîtra les siens ! Pour les dommages hors du champ de la loi, les professionnels sont pratiquement tous assurés et la plupart des particuliers ont une assurance de défense-recours. Ainsi, les contentieux amiables sont pratiquement tous pris en main par des assureurs.

En cas de dommage relevant de la loi, le régleur de sinistre de l'assureur du maître propose une indemnisation ; puis, en cas de désaccord, l'expert de cet assureur et ceux des assureurs des constructeurs, qui sont souvent des consultants différents d'un même cabinet d'expertise, établissent ce qu'ils considèrent comme les causes du sinistre, attribuent à chaque constructeur une part de responsabilité, définissent et évaluent les travaux de réparation et fixent le montant de l'indemnité due au maître d'ouvrage ; l'assureur du maître la paie puis chaque assureur de constructeur l'indemnise au prorata de responsabilité de son client ; tout cela est imposé par la loi et organisé par une convention inter-assurances qui codifie le règlement de tout risque répertorié ; quand tout se passe bien, c'est-à-dire quand le dommage est modique, le maître est rapidement indemnisé. Si le sinistre ne relève pas de la loi, c'est l'assureur en défense-recours du demandeur qui intervient ; l'expertise est analogue mais le financement des travaux n'est pas automatique.

En fait, le régleur puis les experts cherchent à minimiser, voire à contester, les obligations des assureurs plutôt qu'à réparer concrètement le dommage. Dans les deux cas, le maître d'ouvrage ou le demandeur peuvent donc ne pas être satisfaits des propositions des assureurs ; ils portent alors l'affaire devant le tribunal de grande instance ou administratif dans le ressort duquel se trouve l'ouvrage ; c'est pratiquement automatique quand le dommage est important, ce qui est toujours le cas quand il est « géotechnique ». La réparation du dommage dépend alors de l'expertise judiciaire, ce qui en aggrave considérablement le délai et le coût ; c'est le tribunal qui fixe l'indemnité due au maître d'ouvrage et la répartition des responsabilités, rarement au bénéfice des assureurs. Ces derniers se plaignent alors de dérives judiciaires à propos des experts et de dérive jurisprudentielle à propos des magistrats ; ce sont leurs vaines querelles qui les provoquent. Après avoir tué la poule aux œufs d'or, de plus en plus d'assureurs abandonnent les assurances dommages-ouvrage et décennale-constructeurs qui sont devenues chroniquement déficitaires.

7.2.2 Le contentieux judiciaire

Le président du tribunal saisi, entend les parties lors d'une audience de référé à l'issue de laquelle sont généralement réservés les droits des parties et les dépens, et commis un ou plus rarement trois experts, à la demande des parties ou par décision du tribunal. En matière de génie civil et de bâtiment, l'expertise est un mode d'instruction facultatif que le juge n'est pas tenu de mettre en œuvre ; il s'en dispense rarement. Au civil, cet expert est généralement inscrit sur la liste d'agrément du ressort du tribunal ou sur la liste nationale, mais cela n'est pas obligatoire ; les tribunaux administratifs n'ont pas de liste officielle d'experts. Dans tous les cas, il est rare que l'expert soit géotechnicien et même qu'il ait quelle compétence que ce soit en géotechnique.

L'expert doit déposer son rapport dans un délai donné ; il peut rarement le faire quand l'affaire est compliquée, ce qui est toujours le cas en « géotechnique » ; on joue alors les prolongations : des expertises de dommages de fondations notoirement insuffisantes subis par de nombreux pavillons d'un grand lotissement, ont pu ainsi durer plus d'une dizaine d'années sans que quiconque autre que les occupants ne s'en soit offusqué et recevoir des solutions différentes, plus ou moins efficaces et coûteuses selon les experts. En possession de ce rapport, si une ou plusieurs parties poursuivent au fond, le juge de la mise en état instruit l'affaire, entend les parties demeurées en cause, s'accorde un délai de réflexion, rend une ordonnance de clôture et renvoie l'affaire devant le tribunal ; celui-ci entend les plaidoiries, délibère et rend son jugement, dans lequel il fixe généralement le montant du dommage éventuellement subi par le demandeur et en répartit le paiement au prorata de la responsabilité de chaque partie. L'ensemble des parties ou certaines d'entre elles, peuvent évidemment faire appel de son jugement, ce qui engage de nouvelles procédures, éventuellement jusqu'à la Cour de cassation ou au Conseil d'État. En matière de génie civil et de bâtiment, le règlement d'un litige résultant d'un accident « géotechnique » est ainsi très compliqué, très long et très onéreux. Le délai et le coût des reprises en sous-œuvre de pavillons mal construits, y compris celui de l'expertise, dépassent souvent très largement celui de la construction initiale.

Or, les conséquences financières des dommages subis par le maître d'ouvrage ou par des tiers, du fait d'accidents survenus au chantier ou à l'ouvrage, sont évidemment garanties par l'assurance dommages-ouvrage et par les assurances professionnelles des divers participants. Ainsi, à travers le formalisme de l'appareil judiciaire, c'est en fait une bataille d'assureurs qui se poursuit ; les assureurs des responsables de droit sinon de fait ont intérêt à différer autant que possible son issue, afin de régler le plus tard possible le montant du dommage et des dépens, en le partageant le plus largement possible entre le plus grand nombre possible d'intervenants ; ils peuvent ainsi cumuler le plus possible de franchises à la charge des responsables et répartir au mieux entre eux ce qu'il reste à leur charge.

C'est là un important effet pervers de la loi qui, contre l'intention de ses promoteurs, a multiplié les actions de dommages-ouvrages en justice. Cette curieuse situation est une conséquence directe de la loi : les obligations contractuelles de l'assureur d'un constructeur sont subrogées dans les obligations légales de son

assuré, car la loi désigne *a priori* les responsables, tous les constructeurs ; quoiqu'il ait fait, chacun est présumé fautif et il ne peut s'exonérer qu'en évoquant le cas fortuit, de force majeure ou le fait d'un tiers, en ayant la charge de le démontrer. Le caractère aléatoire de la survenance du dommage et l'indemnisation sans enrichissement du demandeur, fondements de l'assurance, ont disparu en pratique : sans avoir la charge de la preuve, le demandeur maître d'ouvrage déclare un sinistre pas toujours réel et souvent surestimé ; et même, il n'est pas rare que son action soit entreprise à la veille de la fin du délai décennal alors que l'ouvrage n'est manifestement pas en péril et/ou impropre à sa destination ; et sa demande est presque toujours satisfaite !

7.2.2.1 L'expert judiciaire

La mission de l'expert est définie par le président du tribunal, dans son ordonnance de référé. Elle lui impose en général de se rendre sur les lieux, de les décrire, de constater les dommages, d'en déterminer les causes, d'en évaluer le montant, de définir et évaluer les travaux de remise en état de l'ouvrage, éventuellement de prendre les mesures conservatoires nécessaires à la sécurité de l'ouvrage et à l'administration de la justice. Pour l'accomplir, il peut se faire assister de sapiteurs, techniciens spécialistes de certains aspects particuliers de sa mission ; l'expert en bâtiment non-géotechnicien le fait rarement, ce qui lui permet d'attribuer au « vice du sol » tous les dommages imaginables dont il ne sait pas déterminer la cause réelle ; il en va ainsi généralement des fissures de pavillons mal construits. Il doit entendre les parties, répondre à leurs observations, préciser leurs rapports contractuels, leurs rôles respectifs dans l'étude et la réalisation de l'ouvrage, leurs degrés d'immixtion dans les causes des dommages et remettre son rapport au tribunal.

Son rôle est d'éclairer les magistrats de la mise en état puis du fond, en leur donnant un avis objectif ; il ne doit pas leur imposer un point de vue subjectif de spécialiste, qu'ils pourraient difficilement discuter puisqu'ils ne sont pas techniciens. Il doit donc se borner à décrire le dommage, puis à en établir les causes ; en matière géotechnique, cela est toujours très compliqué.

Pour y parvenir, il est souvent amené à faire entreprendre une nouvelle étude géotechnique qui ne sera pas forcément correcte ; n'étant pas lui-même géotechnicien, il ne peut qu'entériner les conclusions de cette étude. C'est ainsi que des forêts de micropieux ont été, sont et seront encore longtemps plantées inutilement mais au grand profit des entreprises spécialisées, souvent consultées comme conseils, sous une multitude de pavillons plus ou moins fissurés : ils étaient fondés sur un sol « vicieux », il faut donc les fonder sur le « bon sol » ; tout le monde peut comprendre cela, mais c'est souvent ce genre de raisonnement qui est vicieux ; l'aggravation de la fissuration après la mise en place des micro-pieux le confirme parfois et ouvre un nouveau contentieux.

L'expert doit ensuite dire si, avec les connaissances et les moyens techniques dont on disposait au moment de l'étude, il était possible ou non de prévenir le dommage ; cela peut conduire à des discussions interminables car il est difficile de faire abstraction de ce que l'on sait à un moment donné pour penser à la manière de celui qui intervenait quelques années avant ; il n'est pas rare que

l'action judiciaire soit entreprise vers la fin du délai décennal- alors que l'ouvrage n'est manifestement pas *en péril* ou *impropre à sa destination* !- et qu'elle dure elle-même plusieurs années. Les causes maintenant évidentes d'un dommage, peuvent très bien avoir échappé en toute bonne foi à celui qui faisait alors l'étude, pour peu qu'il n'ait pas été sensibilisé au phénomène à l'époque mal connu ou ignoré ; naguère, l'aptitude au retrait/gonflement des sols argileux a été mise en évidence par la multiplication des dommages subis par des pavillons mal construits ; on a ainsi attribué au « vice du sol » les conséquences de vices de construction ; on continue à le faire quasi automatiquement. La loi sur l'indemnisation des catastrophes naturelles est venue renforcer cette tendance en faisant des mouvements de terrains consécutifs à la sécheresse, le deuxième type par le nombre, des catastrophes affectant légalement le territoire national ; chaque maire voulait la sienne pour contribuer à l'entretien du parc immobilier de ses administrés. Devant les abus qui en sont résultés, la franchise imposée aux « victimes » a été considérablement augmentée.

L'expert doit enfin dire si l'étude initiale était incorrecte ou si elle avait été mal utilisée. Pour cela, il s'en tient généralement aux conclusions de l'étude qu'il a fait exécuter dans le cadre de sa mission ; elles ne sont pas toujours objectives : le monde de la géotechnique est petit ; les rancunes personnelles ou la concurrence commerciale peuvent orienter ces conclusions. Dans un cas au moins, cela s'est terminé tragiquement pour un géotechnicien qui n'a pas supporté la décision injuste qui le ruinait, consécutive à une telle manœuvre de la part d'un confrère ; d'autres, moins affectés, ont dû néanmoins abandonner le métier ; plus attentifs au déroulement de l'expertise et mieux défendus, quelques uns ont pu faire invalider des études douteuses et montrer que les causes des dommages expertisés n'étaient pas « géotechniques ».

La mission de l'expert comporte deux actions particulièrement lourdes de conséquences. Il doit d'abord se substituer aux techniciens spécialisés dont la défaillance éventuelle est cause de l'accident, afin d'assurer la sécurité et la réparation de l'ouvrage ; cette action strictement technique, partie active de sa mission, est la plus importante pour l'avenir de l'ouvrage et pour ses futurs utilisateurs. Il est regrettable qu'elle ne soit pas toujours accomplie par une personne qui en ait conscience et soit réellement compétente.

Il doit ensuite éclairer le juge, en fait, lui indiquer ce qu'il pense de l'affaire. En aucun cas pourtant, un expert ne doit préjuger la responsabilité de quiconque. Ceux qui le font ou prétendent le faire, et ils sont hélas fort nombreux, outrepassent l'objet de leur mission. Pour leur éviter cette tentation, le magistrat qui les désigne, doit définir cet objet aussi précisément que possible dans son ordonnance, en rappelant le caractère exclusivement technique d'une expertise, imposé par tous les codes de procédure.

7.2.2.2 Le tribunal

Dans les affaires civiles, le juge du fond suit généralement les conclusions de l'expert pour motiver sa décision qui est rarement en faveur des constructeurs.

Il doit ensuite qualifier la cause du dommage, cause extérieure, erreur ou faute professionnelle et la part de responsabilité, c'est-à-dire le degré d'immixtion dans l'acte de construire, de chaque personne ayant participé à l'étude et à la construction de l'ouvrage. Il motive son jugement par des attendus techniques et juridiques et parfois sur des considérations psychologiques ou sociales implicites. Quand la faute de plusieurs constructeurs a concouru à la réalisation de l'entier dommage mais quelquefois aussi, pour simplifier le problème de la répartition des responsabilités, souvent très difficile à résoudre, il les condamne *in solidum*. En cas de « vice du sol » juridiquement établi, souvent sur des considérations techniques douteuses, le géotechnicien risque alors de se voir obligé de supporter une part importante de dommage à l'origine duquel il n'a pris qu'une part secondaire, voire nulle ; cela est arrivé à un géotechnicien auquel un maître d'ouvrage reprochait d'avoir sous-estimé le volume de la partie rocheuse d'un grand terrassement ; il avait été condamné pour une faible part *in solidum* avec l'entrepreneur, à supporter le surcoût qui en était résulté, bien qu'il n'ait pas été partie au marché de l'entreprise et qu'il ne soit jamais intervenu sur le chantier ; à la suite de la faillite de l'entreprise, mal assurée pour ce type de risque, il a eu la charge presque totale de ce « dommage » uniquement financier.

En général l'importance relative des considérations psychologiques s'avère moins grande qu'un profane pourrait s'y attendre ; on peut alors affirmer que le tribunal a bien pesé sa décision en ayant tenu compte de l'opinion de l'expert sans qu'elle se soit imposée à lui. Des considérations sociales non dites, sont davantage retenues ; dans la ligne de Treilhard mais à propos de maîtres d'ouvrages plus avertis et compétents que les propriétaires d'antan, les tribunaux se montrent particulièrement sévères à l'encontre des constructeurs ; ils le sont toutefois moins que le Code d'Hamourabi qui condamnait à mort le maître d'œuvre d'un ouvrage endommagé ; mais en fait, ils donnent ainsi à leurs assureurs le rôle social d'indemniser quoi qu'il en soit.

Le cas échéant, la recherche et l'appréciation de la responsabilité pénale de chaque participant à l'acte de construire seraient toujours nécessaires si l'accident résultait d'une action délictueuse ou affectait des personnes. Le jugement pénal s'impose au tribunal civil ; c'est bien ainsi qu'a été écartée la responsabilité des constructeurs dans l'affaire de Malpasset (cf. 1.1.1.3).

7.2.3 La garantie du géotechnicien

Le géotechnicien prend donc des risques contentieux importants et souvent mal définis dans l'exercice de son métier ; il importe qu'il s'en prémunisse.

La meilleure façon de le faire est évidemment d'être un bon géotechnicien, de bien faire son métier et d'être bien assuré. Ce n'est pas suffisant ; tout le monde peut se tromper et les assureurs ont souvent des manières restrictives d'interpréter les contrats ; ils peuvent même se comporter comme les adversaires implicites de leurs clients.

C'est en cas de dommages à l'ouvrage qu'il a le plus de risque d'être recherché et condamné ; considéré comme constructeur, il serait en effet responsable de

plein droit. Or, son activité courante ne lui donne pas cette fonction ; il ne l'assume que s'il est explicitement maître d'œuvre de l'étude et de la construction des parties d'ouvrage directement en relation avec le sous-sol, terrassements, fondations et drainage ; c'est rarement le cas et quand cela l'est, il doit agir, être rémunéré et être assuré en conséquence.

Pour que sa qualité de prestataire de service, assujéti à une obligation de moyens et non à celle de résultat des constructeurs, puisse être éventuellement reconnue par un tribunal, il est indispensable que son activité et les limites de sa mission soient clairement définies, que ses propositions, contrats et rapports (cf. 5.7.3) les précisent et qu'il agisse en restant strictement dans son rôle.

7.2.3.1 Nature de l'activité

L'étude géotechnique consiste à constater et non à garantir, l'état d'un site et à prévoir, autant que faire se peut, le comportement général de l'ensemble site/ouvrage quand il sera construit ; elle porte sur un projet plus ou moins bien défini et non sur l'ouvrage dont il ignore généralement par qui et comment il a été étudié, et ce qu'il sera. Le géotechnicien est donc un pur prestataire intellectuel, seulement tenu à un devoir de conseil.

7.2.3.2 Limites de la mission

La mission du géotechnicien est limitée à l'étude du site de construction du futur ouvrage, à l'étape de l'étude technique où en est le projet quand il intervient ; il est rare qu'il intervienne au-delà de l'APD. Dans ce cadre strict, ses observations sur le site et ses pronostics sur le futur comportement de l'ensemble site/ouvrage, sont à la disposition du maître d'œuvre qui assume le soin du risque du sol de son projet ; ce dernier et les autres techniciens, notamment de structure, peuvent les interpréter et les utiliser comme bon leur semble et ils le font souvent de façon inattentive voire abusive ou même erronée.

Dans la plupart des cas, le géotechnicien n'assume aucune fonction, même partielle, de maîtrise d'œuvre ; il ne produit ou contrôle ni calcul, ni plan, ni descriptif, ni devis propres à l'ouvrage dont il ignore tout, sauf son implantation et son type approximatifs. Il ne connaît pas les dispositions arrêtées par le maître d'œuvre et les autres techniciens, pour adapter l'ouvrage au site ; il ignore en particulier le mode de terrassement, le type de structure, le parti de fondation, le système de drainage... adoptés, et donc s'ils sont compatibles entre eux, avec les caractères spécifiques du site et s'ils suivent ses indications. Il n'est pas informé des clauses des marchés d'entreprises ; il en ignore les conditions de dévolution, les prescriptions techniques, les modalités de facturation... Il n'assiste à aucune réunion de chantier et ne connaît donc pas la façon dont ont été réalisés les travaux. Il ne participe pas à la réception de l'ouvrage.

On lui demande souvent, comme une sorte de service après vente, d'assister à l'ouverture des fouilles ; le prétexte est qu'il confirme que le sol est bien conforme à ce qu'il a indiqué dans son rapport. Il s'agit en fait d'une espèce de piège qui, s'il s'y fait prendre, le transforme en constructeur : sa visite sera

mentionnée dans un compte-rendu de chantier ; en confirmant le sol, il confirme implicitement les dispositions constructives arrêtées par le maître d'œuvre et les techniciens, dont il ne peut connaître que les grandes lignes. Quoi qu'il puisse lui en coûter commercialement, il doit donc refuser une telle visite généralement non rémunérée, ou bien se faire confier une mission spécifique d'assistance de chantier, rémunérée à sa juste valeur et assurée en conséquence. Tous les constructeurs y ont intérêt mais rare sont les maîtres d'ouvrages qui acceptent de les financer.

7.2.3.3 Pièces contractuelles

En plus de ce qu'il est habituel d'y faire figurer, les pièces contractuelles, proposition, rapport (cf. 5.7) et facture, que le géotechnicien remet au maître d'ouvrage, doivent préciser clairement l'étape de l'étude selon le catalogue figurant en annexe de l'arrêté sur la rémunération des missions d'ingénierie, ainsi que l'objet de l'étude, terrassements, fondations, eaux souterraines, ou général c'est-à-dire l'ensemble des trois ; il s'agira d'étude géotechnique *d'APS de terrassement, générale d'APD...* De plus, le rapport doit présenter des principes généraux d'adaptation site/ouvrage, des conseils techniques aux constructeurs qui pourront ou non en tenir compte, et non des instructions ou des directives de constructions qui leur seraient imposées ; on doit aussi y souligner que son utilisation ne doit pas être abusive, erronée et/ou inattentive. Les plans et coupes annexées au rapport doivent être qualifiées de schématiques ; les limites exactes du site et d'emprise de l'ouvrage doivent y figurer à l'échelle utilisée pour l'étude, généralement celle du plan de masse et non des plans d'exécution, jamais disponibles quand il intervient. Ce sont des indications simples et précises ; il est plus facile pour un juriste de vérifier si elles ont bien été respectées par les constructeurs que d'apprécier d'un point de vue technique, le degré d'immixtion éventuel du géotechnicien dans la construction de l'ouvrage.

Un géotechnicien avait réalisé une étude d'APS de fondation pour la construction d'un immeuble urbain ; son rapport présentait plusieurs principes généraux de fondation, susceptibles d'être adoptés selon la structure du bâtiment qu'il ne connaissait pas ; ses plans et coupes étaient à 1/250 qui est une échelle de plan de masse, trop petite pour un projet d'exécution de fondation. Après le dépôt de son rapport et jusqu'à sa mise en cause, il a ignoré quand et à qui le maître d'ouvrage avait transmis ce document et ce qu'en avaient fait ceux qui l'avaient reçu. L'ingénieur de structure avait prévu des fondations que le bureau de contrôle avait acceptées sur plans puis jugées inacceptables à l'ouverture des fouilles ; le maître d'ouvrage a refusé de payer le surcoût important des fondations nécessaires. Mis en cause, le géotechnicien a pu facilement montrer à l'expert et aux parties que son rapport avait été utilisé abusivement, une étude d'APS n'étant pas une étude d'exécution, inattentivement en ce que l'ingénieur avait reporté sans adaptation, les indications des documents graphiques à l'échelle du 1/250, sur ses propres plans à 1/50 et de façon erronée en ce que son projet ne correspondait à aucun des principes généraux de fondation figurant dans le rapport. Pour le géotechnicien, l'affaire n'est pas allée au fond.

Il en a été de même pour un géotechnicien qui avait été appelé pour des dommages à un bâtiment situé sur un lotissement industriel dont il n'avait étudié qu'une partie ; le lot sur lequel était construit le bâtiment était limitrophe de la zone étudiée par le géotechnicien, ce que les plans et coupes annexés au rapport de l'étude, montraient clairement.

Une cour d'appel a mis hors de cause un géotechnicien maltraité en première instance dans une affaire de grave dommage à un bâtiment, « attendu que dans le cadre de sa mission d'étude (*d'APD*), il ne lui appartenait pas de s'assurer que ses avis avaient été suivis d'effets et de prendre ou faire prendre toute mesure nécessitée par la détection d'éventuelles déficiences... que, n'étant pas intervenu sur l'ouvrage lui-même, sa responsabilité était celle d'un prestataire de service assujéti à une obligation de moyen et ne ressortissait pas à une obligation de résultat ».

Cela ne constitue pas une jurisprudence, mais pourrait en devenir une si les géotechniciens adoptaient ces principes élémentaires de bonne conduite de leurs affaires, si leurs assureurs et les avocats qu'ils lui attribuent en tenaient compte.

7.3 Pour un droit géotechnique

S'il existait et était enseigné, le droit géotechnique serait une ramille du droit de la construction. Ce serait en tous cas un droit nouveau ; le juriste s'intéresse au géotechnicien depuis peu de temps, à la suite d'appels en garantie de plus en plus fréquents dans des affaires de dommages-ouvrages. Ce serait un droit mixte, défini par son objet, la géotechnique ; pour l'essentiel il serait apparenté au droit privé mais, à travers le Code des marchés publics et de ses annexes, le droit public pourrait largement l'inspirer ; en fait, les tribunaux judiciaires et les tribunaux administratifs appliquent pratiquement les mêmes principes dans des affaires analogues. Il ne serait pas autonome ; à travers le droit public, il aurait des relations évidentes avec le droit de l'environnement, de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'eau, avec le droit minier...

Paradoxalement, ce droit inexistant repose sur un principe clairement posé du droit civil : selon l'article 1792 CC, le sol peut être « vicieux » et quand il le montre, les constructeurs en sont responsables de plein droit. Cela avantage outrageusement le maître d'ouvrage moderne qui n'est plus que rarement le propriétaire naïf et incompétent que Treilhard entendait protéger dans la rédaction initiale du Code civil ; privé ou public, c'est maintenant un professionnel averti, qui n'est pas formellement tenu de prendre le soin du risque du sol. Seuls, les textes d'application du Code des marchés publics attirent l'attention sur l'intérêt d'une étude géotechnique préalable aux travaux. La jurisprudence administrative modère à peine les conséquences de ce principe en utilisant très restrictivement ceux de l'imprévision et des sujétions imprévues ; ils sont étrangers au droit privé.

Si le sol est connu du juriste, le géotechnicien en est pratiquement ignoré. Pour lui, c'est un technicien parmi d'autres, qui intervient dans l'acte de construire. Son activité professionnelle est soumise aux règles du droit civil et éventuel-

lement du droit commercial ; il n'a pas de statut professionnel spécial ; l'article 1792-1 CC semble en faire un constructeur lié au maître par un contrat de louage d'ouvrage. À ce titre, quand un ouvrage dont il a étudié le site, subit un dommage de nature à compromettre sa solidité ou à le rendre impropre à sa destination, si le dommage est lié à ce que l'article appelle un « vice du sol », il serait responsable de plein droit sans qu'il soit besoin de préciser si son obligation est de moyen ou de résultat.

Or, le rôle du géotechnicien dans l'acte de construire est d'étudier le sol qui va supporter l'ouvrage et non l'ouvrage lui-même ; ainsi, le géotechnicien ne participe ni à l'étude du projet, ni à la construction de cet ouvrage ; son rôle ne saurait donc être assimilé à celui des autres techniciens qui interviennent directement sur l'ouvrage pour en étudier le projet puis pour le construire ; il n'aurait ainsi qu'une obligation de moyen, incompatible avec la responsabilité de plein droit qui est de résultat. Il importe donc de définir les conditions dans lesquelles le géotechnicien pourrait néanmoins éventuellement être considéré comme constructeur, locateur d'ouvrage ; c'est d'elles que dépend la qualification de sa responsabilité.

Le géotechnicien, personne physique ou morale, engage sa responsabilité civile vis-à-vis du maître d'ouvrage ; personne physique, il engage aussi sa responsabilité pénale vis-à-vis de la société, même s'il n'est que salarié d'une personne morale. Il doit en accepter les conséquences éventuelles sans arrière-pensée mais il doit aussi pouvoir compter sur la bonne foi et l'équité de ceux qui pourraient être amenés à lui demander des comptes. Plusieurs affaires ont montré que le sol, dont la réputation juridique de vicieux n'est plus à faire, peut être la cause commode mais fautive de dommages difficilement explicables ; la moindre fissure de cloison ou de dallage d'un pavillon mal construit, est attribuée à un sol gonflant, sans autre preuve que l'avis d'un expert qui ignore à peu près tout de la géotechnique ; le géotechnicien risque ainsi de devenir le bouc émissaire tout indiqué de procès embrouillés.

7.3.1 La responsabilité des constructeurs

La responsabilité civile de chacun des participants à l'acte de construire peut être plus ou moins engagée, directement ou indirectement, individuellement ou conjointement, en cas de dommages accidentels, résultant d'actes de bonne foi ; selon les articles 1382 à 1386 CC, celui ou ceux qui sont reconnus responsables du dommage, sont tenus de le réparer c'est-à-dire généralement, d'indemniser celui qui le subit ; la prescription de cette responsabilité est trentenaire. Mais l'article 2270 CC, déroge au droit commun en réduisant et en limitant la prescription à dix ans en ce qui concerne la responsabilité des autres participants vis-à-vis du maître d'ouvrage, quand seul l'ouvrage subit des dommages, sauf manœuvres frauduleuses, fautes lourdes ou vices cachés qui sont des quasi-délits dont la prescription est trentenaire. La jurisprudence interprète ce délai décennal non comme un délai de prescription mais comme un délai préfix de garantie en le limitant strictement même en cas de défaut caractérisé ; selon l'article 1792-5, il ne peut plus être contractuellement écourté. L'article 1792 a

été profondément modifié par la loi du 4 janvier 1978 en ce que la responsabilité du constructeur est de plein droit dès lors que le dommage affectant l'ouvrage est constitué, c'est-à-dire quand sa solidité est compromise et/ou s'il est impropre à sa destination, conditions dont on tient rarement compte lors d'un procès ; il ne peut se dégager de cette présomption de responsabilité qu'en prouvant que le dommage est dû à une cause étrangère, force majeure, fait de la victime ou d'un tiers.

La responsabilité peut être quasi délictuelle et éventuellement pénale quand des dommages graves affectent les propriétés des tiers ou en cas d'erreurs dues à des insuffisances manifestes engageant la vie humaine, même si aucun accident grave ne survient. L'appréciation, très délicate, de ce niveau de responsabilité appartient au juge d'instruction qui connaît de la plainte et peut, à l'issue de sa mission, soit engager des poursuites, soit conclure à un non-lieu et éventuellement au renvoi de l'affaire devant une juridiction civile. Elle est enfin délictuelle et pénale quand l'accident cause des dommages corporels (blessures ou homicides involontaires) ou bien quand certaines règles administratives ou certaines lois n'ont pas été respectées.

Donc, si l'accident n'affecte que l'ouvrage et moins de dix ans après son achèvement ou sa réception définitive, la responsabilité civile de certains participants comme le maître d'œuvre, les techniciens et l'entrepreneur peut être engagée de plein droit vis-à-vis du maître d'ouvrage ou ultérieurement d'un autre propriétaire. Si par contre, l'accident résulte de manœuvres frauduleuses, de fautes lourdes ou de vices cachés, ou bien lèse un tiers dans ses biens ou dans son corps, leur responsabilité civile ou pénale, peut aussi être engagée durant trente ans, éventuellement à travers celle du maître d'ouvrage ou du propriétaire au moment de l'accident. Passés trente ans, seul le propriétaire de l'ouvrage demeure responsable vis-à-vis des tiers, mais on pourrait imaginer que la responsabilité de certains participants puisse être évoquée si l'accident prenait une allure de catastrophe dont, avec raison, la justice voudrait établir les causes.

Dans le cas de ce que l'on appelle un peu vite une catastrophe « naturelle », on peut en effet se demander si, en un lieu où un phénomène naturel comme un séisme, une crue, ou un accident comme un éboulement, une rupture de voûte de galerie... est possible sinon prévisible, le fait d'avoir construit un ouvrage inadapté à en subir les effets sans dommage, n'engagerait pas la responsabilité humaine et si un accident éventuel survenant n'importe quand à cet ouvrage, ne devrait pas être ainsi considéré comme un accident géotechnique qui ne serait pas le fait de la fatalité.

Cela n'a jamais été l'avis d'un tribunal. On peut donc admettre que, pour le moment, il ne se produit théoriquement plus d'accident géotechnique dix ans après la construction d'un ouvrage.

7.3.2 La responsabilité du géotechnicien

Par l'article 1792-1, la loi semble bien prescrire qu'en tant que technicien, la responsabilité civile du géotechnicien puisse être engagée vis-à-vis du maître

d'ouvrage selon les principes définis plus haut. Mais, jusqu'à présent, aucune jurisprudence ne s'est établie à ce sujet car l'activité géotechnique est trop récente pour qu'un nombre suffisant d'arrêts du Conseil d'État et de la Cour de cassation aient été rendus à propos d'affaires courantes. Dans la plupart des cas, les géotechniciens assignés ont été mis hors de cause durant l'instruction ou en première instance parce qu'ils étaient intervenus en amont de l'étude et de la construction de l'ouvrage et n'en avaient pas suivi le déroulement. Il serait évidemment souhaitable qu'une telle jurisprudence s'établisse et dise, en s'appuyant sur des principes spécifiques clairs, dans quelles conditions un géotechnicien est ou non un constructeur.

7.3.2.1 Position du géotechnicien dans l'acte de construire

Le géotechnicien est un technicien spécialisé dans l'étude du site de construction d'un ouvrage. Son rôle est d'en constater l'état et d'en prévoir le comportement ; il n'intervient pas directement sur l'ouvrage. C'est un ingénieur-conseil ou un bureau d'études indépendant du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre ; il est en premier lieu responsable vis à vis de ce dernier, même si son contrat d'intervention qui n'est pas un contrat de louage d'ouvrage mais un contrat de louage de service, le plus souvent tacite, a été établi par le maître d'ouvrage, généralement au moyen d'une simple lettre de commande répondant à sa proposition.

Il n'est pourtant ni le vassal, ni le mandataire du maître d'œuvre car il n'assume pas la direction et la surveillance des travaux et ce dernier répond en premier lieu des erreurs et des fautes qu'il pourrait éventuellement commettre et qui entraîneraient des dommages à l'ouvrage ou à des tiers. Mais le maître d'œuvre peut bien entendu, se retourner contre le géotechnicien, présumé innocent, en entreprenant une action récursoire, à charge pour lui de démontrer que le dommage a bien pour origine un acte spécifiquement géotechnique, c'est-à-dire lié à l'ensemble indissoluble site/ouvrage et concernant plus particulièrement le site. Le géotechnicien ne peut évidemment pas être tenu pour responsable de l'ensemble de l'ouvrage sur lequel il n'intervient pas directement, puisqu'il reçoit seulement une mission bien déterminée concernant strictement la définition des relations du site avec l'ouvrage et l'adaptation de l'un à l'autre. Mais, là réside précisément la difficulté majeure de l'art de bâtir. Dans certains cas particulièrement difficiles, quelles que soient la compétence et la conscience professionnelle du géotechnicien, rien ne permet d'affirmer qu'il pourra objectivement remplir cette mission, c'est-à-dire contribuer à éviter tout dommage ou tout accident à l'ouvrage et dans ses alentours. Il risque ainsi de se voir reprocher non pas d'avoir mal fait mais seulement d'avoir fait ; et s'il est démontré qu'il a réellement bien fait tout ce qu'il fallait, il peut craindre que cela ne soit retenu que comme circonstance atténuante dans l'appréciation d'une responsabilité objective, sans faute. Or l'engagement de cette responsabilité très partielle et même pas du tout évidente dans les cas très difficiles, peut pourtant avoir de très lourdes conséquences, puisqu'elle concerne les fondations, partie la plus importante de l'ouvrage, pratiquement la seule par laquelle les dommages peuvent s'étendre à l'ensemble ; et cet engagement de responsabilité peut même déborder largement les limites de l'ouvrage lui-même et se

faire vis-à-vis de tiers, quand des dommages d'origine géotechnique, imputables à la réalisation de l'ouvrage, affectent les constructions voisines. On conçoit que dans ces conditions, les assureurs aient longtemps évité d'avoir des géotechniciens dans leur clientèle, tout en favorisant leur intervention qui a pour conséquence la diminution du risque de vice du sol, engageant formellement la responsabilité du maître d'œuvre et de l'entrepreneur.

7.3.2.2 Fondements de la responsabilité du géotechnicien

En premier lieu, la responsabilité du géotechnicien vis-à-vis du maître d'ouvrage paraît pouvoir être engagée au titre des articles 1382 et 1383 CC, s'il a commis une erreur dont on s'aperçoit avant ou durant l'exécution, c'est-à-dire s'il a fait une étude défectueuse qui oblige les autres participants à modifier une partie de leurs plans ou de l'ouvrage et ainsi, à perdre du temps et à dépenser plus que prévu. Dans le cas d'un immeuble par exemple, ce peut être d'avoir conduit le maître d'œuvre à prévoir des fondations sur semelles ou bien des sous-sols non cuvelés, alors qu'il s'avère à l'exécution que des fondations sur pieux ou des cuvelages sont nécessaires. Une telle faute s'analyse comme un défaut de prévision ; n'ayant vis-à-vis du maître d'œuvre qu'une obligation de moyens, il serait d'autant plus difficile de la lui reprocher qu'il n'aurait pas pris part aux décisions successives du projet de base et de l'exécution. Il serait de toute façon maladroit de le faire car on pénaliserait alors son esprit d'initiative et d'innovation qui devrait au contraire, être encouragé pour que l'on puisse espérer réaliser des économies et faire progresser la technique. On attend du géotechnicien une précision absolue, impossible à atteindre. Il pourrait donc redouter qu'un défaut de prévision, objectivement excusable et assez négligeable si ses conséquences sont corrigées à temps de façon à ne pas affecter la sécurité de l'ouvrage, lui soit reproché ; il serait alors conduit à affecter systématiquement ses indications de confortables coefficients de sécurité qui deviendraient alors des coefficients de prudence, afin d'être en tout cas à l'abri de tout reproche. Cette attitude entraînerait un large surdimensionnement des parties de l'ouvrage en relation avec le sous-sol, qui impliquerait des dépenses autrement importantes qu'une modification de ses parties en cours d'exécution.

On doit à ce propos remarquer qu'il est normal que l'accroissement de dépense résultant de la modification, demeure à la charge du maître d'ouvrage puisque ce n'est pas l'ouvrage qui doit être modifié mais le projet. Que le géotechnicien se soit trompé ou non, le maître aurait bien dû payer son ouvrage tel qu'il est après modification et non tel qu'il avait été prévu ; le défaut de prévision fait partie de son risque normal ; il est évidemment essentiel de le réduire autant que possible mais il ne peut être nul. Le décret du 2 février 1973 relatif aux conditions de rémunérations des missions d'ingénierie et d'architecture remplies pour le compte des collectivités publiques par les prestataires de droit privé, prévoit ainsi un coût d'objectif, un taux de tolérance en plus ou en moins et un taux de pénalité ou de prime sur le montant des honoraires, selon que le coût effectif de l'ouvrage s'avère supérieur ou inférieur au coût d'objectif augmenté ou diminué du taux de tolérance. En s'inspirant de ce texte, on pourrait à la rigueur pénaliser le géotechnicien responsable d'un défaut de prévision, en minorant plus ou moins le montant de ses honoraires mais sûrement pas lui faire

supporter l'accroissement de dépense résultant de la modification correspondante. Et même, en droit strict, il ne paraît pas possible que l'on puisse admettre une telle présomption de responsabilité fondée sur le défaut de prévision, puisque l'article 1792 ne prévoit l'indemnisation du maître, qu'en cas de dommages tels que la solidité l'ouvrage est compromise et/ou qu'il est impropre à sa destination ; si la partie d'ouvrage en litige n'est pas construite ou en cours de construction, l'appel en garantie du maître d'ouvrage ne devrait pas être recevable.

Ce point de vue peut sembler favoriser outrageusement le géotechnicien négligent ; il est justifié en considérant que, si le maître d'œuvre n'a pas suivi les conseils du géotechnicien, on ne pourra jamais prouver qu'ils étaient effectivement mauvais ; le géotechnicien pourra donc contester la décision du maître d'œuvre de ne pas les avoir suivis. Recevoir l'appel en garantie du maître d'ouvrage engagerait donc un procès d'opinion, ce que ne permet pas le droit. Et en tout cas, après la construction de l'ouvrage et en l'absence de tout dommage, aucun élément matériel ne permettrait d'apprécier la réalité du défaut de prévision qui pourrait être reproché au géotechnicien. De plus, la recevabilité d'un tel appel ouvrirait la porte à des actions délictueuses au préjudice des assureurs ; en particulier, l'assureur du géotechnicien, appelé en garantie pour un défaut de prévision, pourrait toujours mettre en doute la bonne foi du maître d'ouvrage qui aurait pu surprendre celle du géotechnicien ou s'entendre avec lui pour qu'il propose une solution peu onéreuse, la sachant irréalisable afin de faire supporter à l'assurance, le prix beaucoup plus élevé de la seule solution acceptable ; il arrive malheureusement que cela ce fasse.

Il paraît donc que c'est seulement par rapport à l'ouvrage que la responsabilité du géotechnicien puisse être engagée et c'est donc seulement en cas d'accident matériel ou humain qu'elle peut être engagée. Cela ne veut pas dire qu'il soit normal que le maître d'ouvrage l'appelle directement au titre de l'article 1792, conjointement au maître d'œuvre et aux autres techniciens. N'ayant aucune mission de réalisation, il n'a aucune obligation de résultat vis-à-vis du maître d'ouvrage ; c'est le maître d'œuvre qui, appelé par le maître d'ouvrage, devrait appeler le géotechnicien en garantie au titre des articles 1382 et 1383.

L'origine géotechnique d'un accident peut être une erreur de conception qui engage la responsabilité civile du géotechnicien, à travers la responsabilité contractuelle du maître d'œuvre ou une erreur d'exécution qui engage en plus, la responsabilité civile d'un ou de plusieurs entrepreneurs (fondations spéciales, terrassements, gros œuvre) et éventuellement, celle du vendeur-constructeur.

Parmi les erreurs de conception, on peut citer, d'après la jurisprudence relative à la responsabilité du maître d'œuvre, le fait de ne pas avoir cherché un bon sol d'assises, de l'avoir insuffisamment étudié, d'avoir mal interprété les renseignements géotechniques recueillis dans le site ou d'avoir effectué des calculs erronés... Comme conséquences d'erreurs d'exécution, on peut citer les affouillements et les éboulements chez le voisin, les ébranlements dus au battage de pieux, à l'usage d'explosifs ou aux vibrations de compactage, les tassements subis par les immeubles voisins, les assèchements de puits... La jurisprudence reconnaît en effet au maître d'œuvre, l'obligation de prendre toute mesure propre à assurer la préservation et la consolidation des ouvrages

voisins et des travaux, de rechercher l'origine des dommages et de prendre les mesures propres à les combattre.

Ainsi, on peut d'abord remarquer que dans la plupart des cas, pour engager l'entière responsabilité du géotechnicien, il doit être intervenu de façon permanente et en accord avec les autres participants depuis l'étude du projet jusqu'à l'exécution et à l'entretien de l'ouvrage ; toutefois, l'obligation de surveillance attentive ne peut pas lui être opposée puisqu'il n'est pas maître d'œuvre et que, sauf très rares spécifications contractuelles, sa mission n'implique pas qu'il ait reçu délégation d'une partie de cette obligation qui appartient au maître d'œuvre.

Seule une grossière erreur de conception, assimilable à un dol, pourrait peut-être engager son entière responsabilité si le géotechnicien n'était intervenu qu'au niveau de l'étude et *a fortiori* de la préétude, mais il est bien improbable qu'un véritable homme de l'art puisse en commettre une telle à ce niveau. En cas d'accident survenu à l'ouvrage, soit lors de sa construction, soit après, il serait en effet bien difficile de prétendre engager l'entière responsabilité d'un géotechnicien dont le rôle se serait borné à remettre à son client le rapport d'une étude si détaillée soit-elle, sans qu'il ait été ensuite au moins tenu au courant de son utilisation, de façon à pouvoir éventuellement faire part de ses observations et sans qu'il ait pu vérifier si ce qu'il a conseillé a été rigoureusement suivi. Il ne peut pas être tenu pour responsable d'avoir effectué une étude dont les conclusions ont été mal comprises ou négligées et les risques pour l'ouvrage ou les terrains voisins, mal appréciés ou escamotés.

7.3.2.3 Obligation de moyens

Mais alors que les autres constructeurs ont une obligation de résultat vis-à-vis du maître d'ouvrage dans le cadre d'une mission de réalisation, le géotechnicien n'a lui, qu'une obligation de moyens vis-à-vis du maître d'œuvre, dans le cadre d'une mission d'étude ; il en rend compte par la production d'un rapport et n'intervient pas sur l'ouvrage. Son intervention dans l'acte de construire est largement préliminaire à cet acte ; sa mission lui est confiée et il l'accomplit, longtemps avant que l'on entreprenne de construire l'ouvrage et souvent même sans que le projet de cet ouvrage soit définitif. Ce peut être soit une mission de constat d'état du site, soit une mission de prévision de son comportement, soit une mission de conseil, en proposant des solutions de principe à des problèmes géotechniques, sans qu'il puisse et doive en choisir une et l'imposer, soit une mission de vérification que l'on a bien tenu compte de ses avis dans les plans et dans les travaux, soit enfin plusieurs ou l'ensemble de ces missions.

Comme à tout autre consultant, l'obligation de moyens lui impose d'accomplir complètement la mission qui lui est confiée en mettant objectivement et sans restriction ses connaissances et son savoir-faire à la disposition du maître d'œuvre. Il est nécessaire qu'il agisse avec prudence et circonspection. Si le maître d'œuvre lui demande son avis, il doit conseiller d'écarter des modes de constructions inadaptés ou défectueux ou bien formuler et motiver expressément ses réserves. Il doit clairement lui indiquer les difficultés que l'on pourrait rencontrer au moment de l'exécution des travaux et souligner les risques de dommages qui pourraient en résulter, tant pour l'ouvrage lui-même, que pour les

environs. Dans la mesure du possible et dans cette mesure seulement qu'il appartiendrait au juge d'apprécier, car en droit, une erreur de diagnostic n'est pas nécessairement une faute, il doit aussi prévoir les dangers qui pourraient apparaître après la construction et envisager les mesures à prescrire pour assurer la conservation de l'ouvrage et préserver l'intégrité des biens des tiers voisins. Quand, et seulement quand son contrat le prévoit explicitement, il peut participer à la surveillance des travaux mettant en œuvre le sous-sol, sans que le maître d'œuvre puisse se décharger entièrement sur lui de son obligation de surveillance attentive, car on ne peut raisonnablement pas exiger du géotechnicien ou de l'un de ses collaborateurs, une présence permanente sur un chantier qui ne le concerne en fait que pour une faible part. Du reste, on ne lui demande le plus souvent que d'assister à l'ouverture des premières fouilles ; on ne l'appelle ensuite que s'il se pose des problèmes d'exécution. Cette participation limitée ne peut évidemment pas être considérée comme l'exercice d'une fonction de maîtrise d'œuvre partielle et elle n'entraîne pas d'obligation de résultat.

7.3.2.4 Des règles qui évoluent

Le fait d'avoir en partie failli à l'un ou à plusieurs des devoirs que lui impose son obligation de moyens ne paraît même pas suffisant pour que la responsabilité du géotechnicien puisse être entièrement retenue. Il ne pourrait assurément pas les remplir tous parfaitement, même s'il en avait la volonté et les moyens techniques et financiers : la géotechnique a en effet des limites qu'il ne peut pas transgresser ; c'est en partie une science expérimentale dont les théories et les règles de mise en œuvre évoluent de façon permanente, à mesure des progrès scientifiques et technologiques, et non une technique éprouvée, reposant sur des règles strictes dont l'inobservation peut être rigoureusement reprochée au praticien ; il n'y a pas de règles de l'art géotechniques mais seulement quelques normes et DTU concernant les sondages, les essais, les formules de calcul et certains procédés d'exécution, suffisamment vagues pour ne pas être contraignants. D'une part en effet, l'exercice de la géotechnique n'est pas réglementé ; quiconque peut devenir géotechnicien du jour au lendemain sans en référer à qui que ce soit et on ne se prive pas de le faire actuellement, tant il semble que l'exercice de la géotechnique soit en passe de devenir une excellente affaire, en raison de la grande disproportion qui existe et s'amplifie entre un nombre trop restreint de véritables spécialistes et des besoins sans cesse grandissants. D'autre part, aucun organisme suffisamment représentatif de l'ensemble des géotechniciens sérieux n'a proposé une déontologie de la géotechnique ; sous la pression des événements, des organismes ont établi des documents définissant les missions du géotechnicien et les conditions d'exploitation des rapports de sol ; ils ne constituent pas des règles de comportement à l'attention de qui que ce soit mais des mises en garde à l'attention des maîtres d'ouvrages ; ce sont en fait des documents de précontentieux ; certains bureaux d'études de sols ont fait de même pour leur propre usage. De plus, le programme et la réalisation d'une étude géotechnique ne peuvent être codifiés car il est chaque fois nécessaire de les adapter au site et à l'ouvrage, ce que chaque géotechnicien fait de façon plus ou moins personnelle en s'appuyant sur sa propre conception de la géotechnique.

La définition de règles de l'art auxquelles serait censé être soumis le géotechnicien, n'est donc pas pour demain ; s'il en existe un jour, l'appréciation de leur valeur demeurera très subjective.

7.3.2.5 Des contraintes matérielles

En tant que technicien, l'activité du géotechnicien est généralement soumise à des contraintes matérielles qui ne peuvent que le gêner dans l'accomplissement de sa mission et ainsi dégager en partie ou tout à fait sa responsabilité. C'est en principe le maître d'œuvre qui décide de la consistance et de l'étendue de sa mission, qui définit les moyens financiers et le temps mis à sa disposition pour l'accomplir. Et en général, sous la pression du maître d'ouvrage, il a tendance à les limiter en ne s'intéressant en fait qu'à l'aspect commercial de l'étude qu'il désire aussi rapide et peu coûteuse que possible. Car la nécessité morale et technique d'une étude géotechnique n'échappe plus au maître d'œuvre averti et il tient à en faire exécuter une pour se décharger d'une partie de sa responsabilité sur le géotechnicien. Seulement, le maître d'ouvrage est habitué à limiter le coût de ses ouvrages en lésinant sur leurs moindres détails, en particulier s'ils ne sont pas apparents et s'ils concernent seulement la prévention ; il entend acheter aussi sa tranquillité et la sécurité de son ouvrage au moindre prix. Il ne se rend peut-être alors pas tout à fait compte de l'incohérence de cette attitude ou, s'il s'en rend compte, il exerce sciemment ou non une espèce de chantage sur le géotechnicien ; celui-ci peut certes attirer l'attention sur l'insuffisance des moyens et des délais mis à sa disposition mais il est rarement entendu ; il est souvent contraint de s'accommoder de ce qu'on lui accorde, sous peine de voir sa mission confiée à un autre moins scrupuleux ou plus téméraire, ce qu'il n'a pas toujours la sagesse d'accepter.

C'est donc le maître d'œuvre qui fixe implicitement le niveau de précision que peut atteindre l'étude géotechnique et l'importance du risque de dommage que courra l'ouvrage ou le bien d'un tiers voisin.

7.3.2.6 Pas de pouvoir de décision

Pas plus qu'il n'est ainsi maître de ses moyens, le géotechnicien n'a en fait de pouvoir de décision. Celui-ci appartient encore au maître d'œuvre : le géotechnicien peut le conseiller mais non décider pour lui. Il n'est même pas maître de l'usage que le maître d'œuvre fera de ses conseils ; à son insu, ils pourront ne pas être suivis ou ne l'être que partiellement. Il n'a le plus souvent connaissance que d'un projet ; si détaillé soit-il, ce projet peut être modifié après son intervention, sans qu'il en soit informé. L'ingénieur d'étude et l'entrepreneur recevront du maître d'œuvre, des directives qui leur seront transmises plus ou moins fidèlement et qu'ils suivront plus ou moins rigoureusement selon leur façon personnelle de les interpréter.

Bien entendu, le géotechnicien ne peut en aucune façon, garantir la valeur d'un projet ou l'opportunité de sa réalisation. Il peut tout au plus, s'il a de l'autorité, essayer d'imposer une modification susceptible de mieux assurer la sécurité de l'ouvrage, mais il ne peut interdire une entreprise dangereuse ; serait-il tenté de

le faire que l'on se passerait de son avis ; on lui opposerait peut-être même l'avis contraire d'un confrère ayant une conception tout à fait différente de sa mission. Cette attitude serait justifiée en avançant l'adage bien connu selon lequel la technique permet actuellement de tout faire, ce qui est loin d'être vrai.

7.3.2.7 Responsabilité discutable

Ainsi, dans la plupart des cas de dommages ou d'accidents mineurs, l'entière responsabilité du géotechnicien est discutable. Si l'on ne peut retenir contre lui l'intention malveillante qui échappe à mon analyse, on pourrait d'abord lui reprocher une erreur par manque de compétence, à condition de disposer de critères rigoureux pour en débattre. Ce n'est actuellement pas le cas car, à cause de l'inexistence d'une déontologie de la profession, l'extrême variété de compétence des géotechniciens partagera presque certainement les avis à ce sujet. On pourrait ensuite lui reprocher une faute professionnelle par omission, négligence, maladresse, inattention, imprudence ou, avec beaucoup de réserves déjà formulées, par inobservation de normes, de règles ou de règlements comme ceux imposés par les organismes de contrôle ou certaines administrations. On pourrait enfin lui reprocher une erreur par manque de clairvoyance, c'est-à-dire une erreur de diagnostic, ce qui en droit entraînerait difficilement l'engagement de sa responsabilité puisqu'il faudrait, pour ce faire, recourir à des critères psychologiques et moraux que le droit civil ne connaît en principe pas. De toute façon, le déroulement de sa mission a toujours été suivi par le maître d'œuvre sur lequel se portera une partie de la responsabilité du géotechnicien, soit qu'il ait fait un mauvais choix, soit qu'il ne lui ait pas donné des moyens d'études suffisants, soit qu'il n'ait pas tenu compte des avis reçus.

Sauf s'il est contractuellement le maître d'œuvre de grands terrassements ou de tunnels, qui n'entrent en principe pas dans le champ de l'article 1792, le géotechnicien n'est manifestement pas un locateur d'ouvrage ; il n'a vis-à-vis du maître d'œuvre, qu'une obligation de moyen même s'il est directement lié au maître d'ouvrage par un contrat ; c'est bien au maître d'œuvre de prendre le soin du risque du sol et donc d'en répondre en premier ressort. En assimilant le géotechnicien à un constructeur pour faire entrer son activité dans le champ de l'article, on commet peut-être un abus de droit ; il est malheureusement fréquent de le faire depuis la loi de 1978 qui met tous les techniciens du bâtiment dans le même panier, supprime la référence à l'obligation de moyen et rend l'assurance obligatoire sur la simple présomption d'être constructeur. Cela évite de poser une embarrassante question de doctrine.

Contre toute logique, le géotechnicien français est ainsi un constructeur déclaré mais pour le moins incertain.

7.3.3 Les droits européens

Chez la plupart de nos voisins, le risque géotechnique est clairement envisagé et les conséquences de son expression, logiquement à la charge du maître d'ouvrage. Le sol doit y être moins vicieux qu'en France ! Le géotechnicien y

est tout aussi ignoré que chez nous ; quand elle est évoquée, sa responsabilité n'y est pas considérée comme étant de plein droit ; il y est donc traité de façon plus équitable.

En Italie, le prestataire de services et l'entrepreneur sont nettement mieux traités que chez nous. L'article 2 236 du Code civil italien peut se traduire à peu près ainsi : *Si la prestation (des constructeurs) implique la solution de problèmes techniques de grande difficulté, le prestataire ne répond pas des dommages, sauf dol ou faute grave.* Reste évidemment, ce qui n'est pas rien, à définir une telle difficulté. Plus précis, l'article 1664 stipule que les difficultés d'exécution de caractère géologiques, révélées en cours de travaux, sont prises en compte par le maître d'ouvrage.

En Belgique, l'étude géotechnique préalable est obligatoire pour les travaux publics de terrassements et de fondations ; les aléas géologiques d'exécution sont indemnisés par le maître d'ouvrage.

La Suisse les met aussi à la charge du maître d'ouvrage qui a, vis-à-vis de l'entreprise, un devoir d'information, ce qui rend pratiquement obligatoire l'étude géotechnique préalable à toute construction d'ouvrage.

En Allemagne, il en va à peu près de même.

Aux Pays-Bas, les risques normaux sont à la charge de l'entreprise et les autres, à celle du maître d'ouvrage ; il paraît que cela ne pose pas de problème d'interprétation et d'application ; heureux néerlandais !

Dans les îles britanniques, l'entrepreneur a la charge des difficultés, mais il peut réclamer s'il les estime anormales ; on ne le satisfait pas toujours.

L'Espagne est apparemment le pays le plus proche de nous en la matière ; les aléas géologiques y sont clairement à la charge de l'entreprise et l'imprévisibilité n'y est pas bien vue.

Peut-être un jour, le droit communautaire mettra-t-il un peu d'ordre et de raison dans tout cela. Le Conseil des communautés a commencé une démarche dans ce sens par sa directive du 21/12/88 ; elle ne concerne que les produits de construction mais son annexe I stipule que l'ouvrage doit être conçu et construit de manière à éviter entre autres, son effondrement de tout ou partie, sa déformation d'ampleur inadmissible... qui sont souvent des dommages géotechniques.

7.4 La géotechnique et l'intérêt général

Entreprendre l'étude dédiée à la sécurité d'un site de construction est généralement laissée à l'initiative très discrète voire avaricieuse du propriétaire et/ou du maître d'ouvrage qui n'en entreprend une que si son propre intérêt le lui commande : il peut être assez facilement convaincu qu'une étude géotechnique contribue à assurer la rentabilité et la sécurité de son ouvrage durant la première décennie qui suit sa construction ; il n'est par contre jamais demandeur d'une étude pour les assurer à long terme : aux alentours d'un ouvrage et dix ans après

sa construction, le déluge, pourrait être la lourde paraphrase géotechnique d'un mot célèbre. Et si survient une crue, un séisme, un éboulement ou n'importe quel autre événement naturel ou induit, qualifié de catastrophique parce qu'il endommage un ouvrage, on dira que cet événement était imparable pour la seule raison que par ignorance ou négligence, personne ne l'avait prévenu, et en cas de catastrophe, que les pouvoirs publics n'ont pas assuré une protection suffisante du site et de ses occupants.

Le seul document réglementaire dont l'objet est de prévenir les accidents géotechniques est le Code du travail, très directif pour la prévention des accidents professionnels de terrassement qui sont souvent mortels par ensevelissement des travailleurs dans des tranchées mal blindées ; dans un but explicite de sécurité, son article L.230.2 impose que l'on procède à l'étude implicitement géotechnique d'un site avant d'y entreprendre des travaux de terrassement : éviter les risques, les combattre à la source, évaluer ceux qui ne peuvent être évités, adapter les méthodes de travail, tenir compte des innovations et de leur évolution, planifier la prévention... Ces prescriptions techniques sont précises et judicieuses ; leur application serait efficace quel que soit le risque, professionnel ou non. D'autres documents comme le PPR dont le volet prévention aurait pu s'en inspirer, conseillent sans les imposer formellement des dispositions non précisées, à définir au coup par coup, pour prévenir les accidents géotechniques dans des zones dangereuses, mais rien n'oblige les constructeurs à se soucier de la sécurité des ouvrages qu'ils sont chargés de réaliser dans des zones considérées comme calmes ; ils ne peuvent qu'être sanctionnés en cas de manquement entraînant au moins un dommage à l'ouvrage, c'est-à-dire trop tard. Les annexes du Code des marchés publics indiquent bien qu'une étude géotechnique est indispensable avant la construction d'un ouvrage public, pour éviter les dérives financières à la suite d'aléas réels ou non ; des textes apparentés en précisent même la mise en œuvre ; elle n'est jamais formellement imposée. Les fascicules à caractère géotechnique expliquent clairement ce qu'il faut faire et ne pas faire pour qu'un chantier de terrassement ou de fondation fonctionne correctement et aboutisse effectivement à l'ouvrage prévu sans inflation de son coût, mais n'abordent pas les problèmes de sécurité. En fait, tous ces textes s'attachent à définir dans les moindres détails la bonne façon de construire l'ouvrage quand la décision a été prise de le faire à un certain endroit et d'une certaine façon ; aucun d'entre eux n'évoque le problème de l'opportunité de le construire là et de cette façon. C'est pourtant ainsi que l'on pourrait obtenir au juste coût, des ouvrages convenables, sûrs et d'entretien aisé.

Le permis de construire est une formalité purement administrative dont l'attribution n'est subordonnée à la prise en considération de l'état du site que dans certaines zones de montagne, de bords de cours d'eau, de mines, de carrières..., notoirement connues pour les risques qu'on y encourt, où a été prescrit et approuvé un PPR ou un autre document risque. L'aménagement et la construction y sont placés sous le contrôle du maire, secondé par un service spécialisé de l'administration centrale qui, selon des critères propres et sous certaines conditions variant d'un site à l'autre, accorde ou refuse sans appel le droit d'aménager ou de construire, ou le soumet à des prescriptions contraignantes. Ailleurs, y compris dans les zones limitrophes des précédentes, rien n'oblige légalement quiconque construit à s'assurer de l'aptitude du site à

supporter la construction qu'il projette et à prouver que la sécurité générale de l'ouvrage qu'il a construit et de ses annexes sont assurées. Ceux qui le font agissent de leur propre chef, généralement parce que des expériences malheureuses antérieures, les ont convaincus qu'il fallait faire quelque chose. Les bureaux de contrôle qui les y obligent parfois, sont des organismes privés, initialement liés aux assureurs dont ils préservent les intérêts dans le cadre de la garantie décennale des constructeurs ; ils n'ont aucune responsabilité de service public et ne se soucient pas vraiment de sécurité publique. Les règles parasismiques, initialement publiées sous l'égide d'un bureau de contrôle, n'ont pas force de loi mais leur zonage est repris dans les PPR correspondants. Nul n'est en principe obligé de respecter les DTU, mais en cas d'accident, leur non-respect pourrait être considéré comme une faute professionnelle. Pour le reste, la plupart des plans d'urbanisme sont établis sans qu'un spécialiste du sol et du sous-sol n'intervienne, de sorte que l'on voit par exemple pousser des zones à urbanisation sociale ou industrielle dans des marécages désertiques, pour la raison que le sol y est évidemment bon marché et des rocades sur des flancs de coteaux instables et mal exposés, parce que personne ne se risquerait à proposer d'y implanter la moindre construction rentable : que le coût de l'adaptation au sol, notamment de fondations spéciales ou de drainage, d'un ensemble de logements sociaux dans le marécage remblayé dépasse de loin le coût d'un terrain voisin plus sain mais plus cher et que celui des travaux titanesques de construction d'une rocade dépassent les prévisions les plus pessimistes, qui s'en soucierait puisque personne n'est là pour attirer l'attention sur le fait que l'on aurait pu faire autrement ?

Il n'est donc pas normal de laisser n'importe qui construire n'importe quoi n'importe où et n'importe comment, de négliger le volet géotechnique de l'aménagement d'un site : une zone industrielle ou un lotissement de pavillons implantés dans le lit majeur d'une rivière subit tôt ou tard une inondation, à la suite de laquelle, après avoir réparé et indemnisé les dommages, on construit des ouvrages de protection qui ne sont pratiquement jamais à la charge des promoteurs de l'aménagement et sont rarement efficaces à plus ou moins long terme ; la surveillance et l'entretien d'une route d'accès à une station de ski, établie à travers une zone d'éboulements ou d'avalanches, impose aux services publics qui les assurent, des responsabilités et des dépenses à l'origine desquelles ils n'ont pas pris part...

On laisse toujours aux constructeurs la liberté technique de construire en site urbain ; les nuisances de chantiers et dommages aux tiers y sont particulièrement nombreux ; les grandes fouilles y provoquent souvent des accidents qui affectent les voies, réseaux et constructions périphériques ; seul, l'arrêté municipal permet d'agir au coup par coup, sans règle établie, selon l'humeur d'une administration locale, souvent timorée, qui interdit plutôt que de demander des études et des mesures de prévention sérieuses : les propres services techniques de cette grande ville, n'ont pas su ou pu éviter de graves dommages à plusieurs ouvrages publics, lors de grandes fouilles de sous-sols d'ouvrages en construction à proximité ; et pourtant, les accidents dont les causes étaient les mêmes, défauts d'ancrage de parois moulées, se sont succédés durant une courte période et la ville disposait d'un service géotechnique !

Des lots de zones industrielles se vendent fort cher alors que leurs promoteurs ne prennent pas la peine d'informer les acheteurs des difficultés d'aménagement et en particulier de fondations qu'ils pourraient rencontrer : telle zone avait à l'origine l'aspect d'une magnifique plate-forme facile à aménager, un carreau de carrière de roche depuis longtemps abandonnée qui n'a donc fait l'objet d'aucune étude géotechnique ; à mesure que l'on construisait sur chaque lot, on s'apercevait que certains recevaient les blocs éboulés d'un front demeuré en l'état, que d'autres étaient entièrement situés sur le rocher du carreau, d'autres sur les remblais de stériles répandus à l'aval dans le lit d'un petit ruisseau qui avait été sommairement couvert par l'exploitant de la carrière et d'autres encore, à cheval sur le rocher et sur les remblais. Contrairement aux apparences, chaque lot a dû être aménagé spécifiquement pour un coût de terrassements et de fondations extrêmement variable, alors que tous les lots avaient été vendus à la surface, au même prix unitaire. Il en est résulté presque autant de contentieux que de lots et une très mauvaise affaire pour l'aménageur.

Il faudrait donc procéder systématiquement à des études géotechniques pour assurer la sécurité et la rentabilité des aménagements, éviter le gaspillage, réduire au mieux le coût des travaux de construction et d'entretien, prévenir les effets dommageables voire destructeurs de certains événements naturels sur les aménagements et ouvrages existants ou à créer, prévenir les accidents susceptibles de les affecter, préjuger l'aptitude d'un site et de ses environs à recevoir l'aménagement projeté et ses indispensables ouvrages annexes comme les voies d'accès que l'on oublie généralement, définir les moyens techniques à mettre en œuvre pour adapter l'aménagement au site, définir les dispositions à prendre pour assurer la pérennité de l'aménagement et pour mettre son exploitation à l'abri des accidents géotechniques et éventuellement, définir les dispositions à prendre pour assurer la sécurité et la survie d'aménagements menacés de dommages ou de ruine de mêmes origines.

Il serait évidemment nécessaire que l'on dispose de moyens de contrôle et éventuellement de pression ou même de veto sur tous les maîtres d'ouvrages, en tous lieux et non pas seulement dans les zones à risques couvertes par un PPR. Il serait souhaitable que l'assez souple réglementation actuelle en matière d'aménagement du territoire et de permis de construire tienne compte du fait pourtant évident que la nature d'un site est un élément fondamental de la sécurité et de la rentabilité de son aménagement et des ouvrages que l'on va y construire. Il est certainement au moins tout aussi important que le Cos d'un ensemble immobilier ne dépasse pas une valeur fixée pour contrôler l'urbanisation et que cet ensemble soit construit dans un site dont l'occupation ne se révélera pas désastreuse à l'usage.

Il suffirait que l'on impose au maître d'ouvrage de produire au service chargé du contrôle administratif de son projet, un document attestant que le site a été l'objet d'une étude géotechnique, que l'ouvrage a été adapté au site et que sa sécurité et celle de ses annexes sont assurées. Dans le cas d'ouvrage dont la réalisation est subordonnée à l'obtention d'un permis de construire, ce serait une note jointe au dossier, décrivant le site et attirant éventuellement l'attention sur ses particularités susceptibles d'être considérées pour la conception de l'ouvrage afin d'en assurer la sécurité ; ensuite, pour l'obtention du certificat de

conformité, une note indiquerait que toutes les précautions nécessaires à l'adaptation du site au projet ont été prises et que l'ouvrage ne risque pas de se ruiner prématurément ou de mettre en danger des vies humaines par l'effet d'un événement naturel ou induit. Dans le cas de grands projets, réalisés par des maîtres d'ouvrages publics ou semi-publics, de telles notes pourraient faire partie du dossier de prise en considération ou de déclarations d'utilité publique d'une part, et du dossier de réception de l'ouvrage d'autre part ; dans les deux cas, ces notes devraient se référer à l'étude géotechnique effectuée au cours de l'étude technique de l'ouvrage ; elle serait une sorte d'étude d'impact spécialisée ou un volet sécurité clairement spécifié et obligatoire de l'étude d'impact.

Dans l'immédiat, ce type d'interventions paraît être le plus facile et le plus économique à mettre en œuvre de façon réaliste et efficace, sans trop bouleverser la réglementation existante, en s'y adaptant au mieux. Plus tard, utilisant l'expérience ainsi acquise, on pourrait établir sous la forme la plus ouverte possible, une réglementation suffisamment simple et cohérente pour être facile à mettre en œuvre sans ambiguïté, qui ne compliquerait pas inutilement l'acte de bâtir afin qu'elle ait les meilleures chances d'être respectée de façon non contraignante, et qui préciserait clairement le rôle et la part de responsabilité de chaque participant, administration, maître d'ouvrage et constructeurs.

Sachant que toute réglementation présente inévitablement des failles qu'exploiteront les constructeurs pour la contourner et les juristes pour la neutraliser, il serait souhaitable que le domaine d'une telle intervention de géotechnicien soit aussi large que possible et concerne tout ouvrage quels que soient son type, ses dimensions et son site de construction, pourvu que l'autorisation de sa réalisation soit subordonnée à la délivrance d'un permis de construire, à une déclaration d'utilité publique ou à toute autre formalité administrative. Comme on ne saurait tout prévoir, il serait tout aussi difficile et dangereux d'établir une réglementation géotechnique par rapport au site que par rapport à l'ouvrage. Il ne paraît donc pas souhaitable de dresser une liste de cas d'interventions, car il n'est pas possible de les imaginer tous, et il n'y a pas lieu de fixer des limites ou des normes d'interventions, car d'une façon ou d'une autre, tout aménagement de site peut *a priori* comporter un risque géotechnique qui devrait être apprécié par un spécialiste. De plus, fixer des limites ou des normes conduirait les projecteurs à tricher ou à s'en approcher autant que possible pour éviter cette intervention : et qui pourrait dire qu'un barrage ou un immeuble haut de 19 m est moins dangereux qu'un autre de 21 m, qu'un système de fondation ancré à 11 m est plus aléatoire qu'un autre ancré à 9 m ; qui pourrait soutenir qu'un édifice public important ou non doit être plus sûr qu'un immeuble collectif privé ou même qu'une villa et qui pourrait affirmer qu'un site donné est certainement à l'abri de toute catastrophe, séisme, crue, glissement, éboulement, effondrement, tempête... ?

Parallèlement à cette action réglementaire, destinée à obliger les maîtres privés ou publics à se préoccuper de la sécurité à long terme de leurs ouvrages, il serait souhaitable que l'on se préoccupe de l'aspect géotechnique de l'aménagement du territoire ; les organismes chargés de mettre au point les PLU, les schémas d'aménagement, les plans d'urbanisme, les Zac, les grands ouvrages... devraient obligatoirement recueillir l'avis d'un géotechnicien sur l'ensemble du projet au

niveau de la définition des principes généraux ; ils devraient ensuite faire effectuer des études géotechniques plus ou moins détaillées pour préciser en des points particuliers les caractères naturels du site ; ceux qui seront chargés de réaliser l'aménagement disposeront ainsi de renseignements leur permettant d'orienter leur choix ; ensuite, ceux qui construiront dans ces zones, pourraient estimer ce qu'ils vont devoir y faire pour y adapter leur ouvrage. Actuellement, cela n'est même pas possible dans les communes disposant d'un PPR !

BIBLIOGRAPHIE

Il existe peu d'ouvrages spécifiques de géotechnique. Évidemment, chaque auteur y attribue une place prépondérante à sa spécialité, néglige plus ou moins celles qui s'en rapprochent et oublie souvent celles qui s'en éloignent trop. À quelques rares exceptions près, on ne trouve pas d'exposé sérieux de géologie dans un ouvrage de géomécanique, ni de géomécanique dans un ouvrage de géologie du génie civil.

Les ouvrages et publications qui concernent les géosciences, fondamentales ou appliquées, et la technologie du génie civil ou du bâtiment, rédigés dans à peu près toutes les langues usuelles depuis que l'on s'intéresse à ces disciplines, sont par contre innombrables et certaines de leurs parties, sinon leur ensemble, présentent toujours quelque intérêt pour le géotechnicien. La littérature géotechnique est ainsi extrêmement abondante et très dispersée ; il ne pouvait donc être question d'en présenter ici une liste exhaustive.

Les ouvrages que propose cette bibliographie sommaire ne sont pas nécessairement les meilleurs, mais seulement les plus faciles à aborder pour un lecteur de langue française. La plupart ne sont plus disponibles en librairie, mais n'ont pas d'équivalent actuel ; tous peuvent aisément être consultés dans les bibliothèques universitaires ou achetés d'occasion sur Internet. On trouvera des bibliographies détaillées dans certains des ouvrages les plus récents cités ci-dessous.

Géosciences

Sciences

Géologie générale

L. MORET – *Précis de géologie* – Masson, Paris, 1967.

J.Y DANIEL *et al.* – *Sciences de la Terre et de l'univers* – Vuibert, Paris, 1999.

Géologie de la France

J. DEBELMAS – *Géologie de la France* – Douin, Paris, 1974.

J. DERCOURT – *Géologie et géodynamique de la France* – Dunod, Paris, 1997.

Géologie marine

F. OTTMANN – *Introduction à la géologie marine et littorale* – Masson, Paris, 1965.

Géomorphologie

R. COQUE – *Géomorphologie* – Albin Michel, Paris, 1993.

Géodynamique externe

CAMPY et MACAIRE – *Géologie des formations superficielles* – Masson, Paris, 1994.

Géophysique

M. CARA – *Géophysique* – Dunod, Paris, 1989.

Mécanique des sols

D. CORDARY – *Mécanique des sols* – TEC et DOC Lavoisier, Paris, 1995.

E. SCHLOSSER – *Éléments de mécanique des sols* – Presses P.C, Paris 1988.

Mécanique des roches

F. HOMMAND *et al* – *Manuel de mécanique des roches – t1, fondements* – Presses de l'École des Mines, Paris, 2000.

Hydrogéologie

G. CASTANY – *Principes et méthodes de l'hydrogéologie* – Dunod, Paris, 1982.

Hydraulique souterraine

G. SCHNEEBELI – *Hydraulique souterraine* – Eyrolles, Paris, 1987.

Hydrologie

A. GUILCHET – *Précis d'hydraulique marine et continentale* – Masson, Paris, 1965.

Sciences appliquées

Géologie du génie civil

P.-C.LEVÊQUE – *Géologie appliquée au génie civil, au génie nucléaire et à l'environnement* – TEC et DOC Lavoisier, Paris, 1983.

Géologie de l'environnement

J. GOGUEL – *Géologie de l'environnement* – Masson, Paris, 1980.

H. CHAMLEY – *Environnement géologique et activité humaine* – Vuibert, Paris, 2002.

Géologie des barrages

GIGNOUX et BARBIER – *Géologie des barrages et des aménagements hydro électriques* – Masson, Paris, 1955.

Géophysique

C. MAYER de STADELHOFEN – *Applications de la géophysique aux recherches d'eau* – TEC et DOC Lavoisier, Paris, 1991.

Mécanique des sols

TERZAGHI et PECK – *Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et aux bâtiments* – Dunod, Paris, 1961.

Mécanique des roches

J. TALOBRE – *La mécanique des roches et ses applications* – Dunod, Paris, 1967.

M. PANET *et al.* – *La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil* – Presses P.C, Paris 1976.

F. HOMMAND *et al.* – *Manuel de mécanique des roches – t2, applications* – Presses de l'École des Mines, Paris, 2005.

Géomécanique

D. GRAU – *Fondations et excavations profondes* – Eyrolles, Paris, 1967.

P. MARTIN – *Géomécanique appliquée au BTP* – Eyrolles, Paris, 2005.

Soutènement

M. *et* A. REIMBERT – *Mécanique des milieux granulaires... Ouvrages de soutènement* – TEC et DOC Lavoisier, Paris, 1991.

Hydrologie

G. RÉMÉNIÉRAS – *L'hydrologie de l'ingénieur* – EDF, Paris, 1986.

Hydrogéologie

G. CASTANY – *Prospection et exploitation des eaux souterraines* – Dunod, Paris, 1968.

Hydraulique souterraine

M. CASSAN – *Aide-mémoire d'hydraulique souterraine* – Presses P. C, Paris, 1994.

Géodynamique marine

R. PASKOFF – *Les littoraux – impacts des aménagements sur leur évolution* – Masson, Paris, 1994.

Mouvements de terrain

J. C. FLAGEOLET – *Les mouvements de terrain et leur prévention* – Masson, Paris, 1989.

Phénomènes naturels

BOLT *et al.* – *Geological hazards* – Springer Verlag, NY, 1975.

P. MARTIN – *Ces risques que l'on dit naturels* – Eyrolles, Paris, 2006.

Géotechnique

CAMBEFORT – *Introduction à la géotechnique* – Eyrolles, Paris, 1972.

Techniques du bâtiment et du génie civil

Procédés généraux

Bâtiment

M. NOVERRAZ – *La technologie du bâtiment, t1 – Le gros œuvre*, Eyrolles, 1986.

G. KARSENTY – *La fabrication du bâtiment, t1 – le gros œuvre*, Eyrolles, 1997.

Génie civil

P. GALABRU – *Traité des procédés généraux de construction (3t)* – Eyrolles, Paris, 1971.

Ouvrages et procédés spéciaux

Barrages

MALLET et PACQUANT – *Les barrages en terre* – Eyrolles, Paris, 1951.

Autoroutes

K. B. WOODS – *Highway engineering handbook* – Mack Graw Hill, N Y, 1961.

Tunnels

BOUVARD, COLOMBET et ESTEULLE, *Ouvrages souterrains* – Presses P. C, Paris, 1971.

Soutènements

L. LOGEAIS – *Les murs de soutènement* – CEBTP, Paris, 1992.

Fondations

A. LEONARDS – *Les fondations* – Dunod, Paris, 1968.

G. PHILIPONNAT et B. HUBERT – *Fondations et ouvrages en terre* – Eyrolles, Paris, 1998.

Forages

M. DETAY – *Le forage d'eau* – Masson, Paris, 1993.

Terrassements généraux

Groupe d'ingénieurs – *Cours de terrassements* – Eyrolles, Paris, 1973.

Travaux fluviaux

G. JAMME – *Travaux fluviaux* – Eyrolles, Paris, 1974.

Déchets, pollution

P. LECOMTE – *Les sites pollués* – TEC et DOC Lavoisier, Paris, 1995.

Terrassements aux explosifs

LANGEFORS and KIHLSSTRÖM – *Rock blasting* – Almqvist and Wiksell, Stockholm, 1973.

Construction

Organisation

ARMAND et RAFFESTIN – *Conduire son chantier* – Le Moniteur, Paris, 1995.

Prévention

N. VICTOR-BELIN – *Prévenir pour construire* – Le Moniteur, Paris, 1996.

Droit

Droit de la construction

R. GRELIER-BESSMANN – *Pratique du droit de la construction* – Eyrolles, Paris, 2002.

A. CASTON – *La responsabilité des constructeurs* – Le Moniteur, Paris, 1995.

Droit géotechnique

J. CATZ – *Les constructeurs et le risque du sol* – Le Moniteur, Paris, 1985.

INDEX

A

accident géotechnique 204
acteurs de la construction 89
Agadir 207
agents de renseignement 67
agents de transformation 64
autoroute A50 264
avalanches 172

B

barrage de Malpasset 12, 237, 354
barrages 8

- barrages-poids 10
- barrages-voûtes 11
- en remblais 9
- hydrauliques 8

boîte de Casagrande 152
Boussinesq 243

C

calcaires karstiques 227
California Bearing Ratio (CBR) 303
captages d'eau souterraine 200
catastrophes 88
chaussées 194
circulations karstiques 182
contentieux amiable 350
contentieux géotechnique 348
contentieux judiciaire 351
cristallographie 58
cycle de l'eau 160
cycle géologique 157
cycles atmosphériques 160
cycles naturels 156

D

déchets 203
delta du P6 211
diagraphies de microsismique 295
diagraphies électriques 294

diagraphies géophysiques 294
diagraphies mécaniques 293
dilatomètre ou pressiomètre 297
droits européens 366
dynamique 150

E

eau intersticielle 182
eau souterraine 180, 237
échantillons 247
échelles 246
école naturaliste 70
école physicienne 71
écoles géotechniques 68
écoles rationnelles 70
écroulements de parois 177
édifices inclinés 24
El-Asnam 223
épuisement 187
éruptions du Vésuve 211
éruptions volcaniques 166
essai CBR 255
essai de pompage 299
essai Lefranc 299
essai Lugeon 299
essais sismiques 295
étanchement 187
étude géotechnique 231, 245
eurocode 7 259
excavations et soutènements 185
expert judiciaire 352
extraction 186

F

Fellenius 140, 142, 147
fondations 194
formule de Terzaghi 269

G

géodynamique 57

géodynamique externe 159
 géodynamique interne 158
 géologie 56
 géologie appliquée 281
 géologie de l'ingénieur 48
 géologie structurale 57
 géologues 80
 géomatériau 56, 59, 263
 géomatériau français 161
 géomécánicos 80
 géomécanique 59
 géomorphologie 57
 géophysique 59, 282
 géophysique appliquée 47
 géotechnicien 89, 90, 272, 343
 géotechniciens 80
 géotechnique 33, 62
 granite 73
 gravimétrie 285

H

hydraulique 152
 hydraulique souterraine 46, 61
 hydrogéologie 57

I

inondations 172
 instrumentation de terrain 287

K

Kimméridgien (Jura) 267
 Kobé 222

L

logiciels 79
 loi de Coulomb 151, 269
 loi de Hooke 151
 loi Spinetta (loi 78-12 du 4 janvier 1978) 349
 lotissements 184

M

mécanique des roches 48
 mesures 309, 310, 311
 méthode de Boussinesq 269
 méthode de Dupuit 270
 méthode de Fellenius 106, 269
 méthode de Terzaghi 147

minéralogie 58
 mode d'extraction 185
 modèle cyclique 139
 modèle géotechnique de synthèse 139
 modèle probabiliste 135
 modèles analogiques 129
 modèles mathématiques 130
 modélisation 122, 228
 modélisation des formes 127
 modélisation du comportement 128
 mouvements de pente 175
 mouvements de terrain 173
 mouvements verticaux 178

N

nappes d'eau souterraines 181
 Newmark 243

O

œdomètre 243

P

paléontologie 57
 paramétrie 149
 pénétromètres 293
 pétrographie 56
 phénomènes atmosphériques 171
 phénomènes climatiques 171
 phénomènes liés aux conditions
 atmosphériques 172
 phénomènes météorologiques 171
 phénomènes naturels 64, 162
 photogramétrie 242
 poinçonnement 20
 ponts 28
 prospective 98

R

Rankine 142, 147
 remblais 191
 résistivité électrique 283
Rock Quality Designation (RQD) 290
 ruine 20

S

séismes 167
 semi-probabilité 111

silo à blé de Transcona (Winnipeg) 25
sismique 285
sites pollués 202
Skempton 302
sol et roche 76
sondage 247
sondages 244
sondages mécaniques 47, 288
sourciers 68
soutènement 188
Sparnacien 308
Standard Penetration Tes (SPT) 297
statique 151
système terrestre 154

T

tassement 20, 196

télédétection 282
tenue des parois 188
Terzaghi 198, 243, 312
Theis 270
théorie de Terzaghi 280
théories de Boussinesq 147
théories géotechniques 97
tomographie sismique 296
tour de Pise 21
tracés 184
tunnel sous la Manche 227

U

Urgonien de Provence 267

W

Westergaard 243

