

Introduction aux plastiques et composites en mécanique

par **Alain DESSARTHE**

Ingénieur Responsable du service Conception-industrialisation des polymères et composites du Centre technique des industries mécaniques (CETIM)

1. Généralités	B 5 170 - 2
1.1 Historique.....	— 2
1.2 Définitions.....	— 2
2. Propriétés	— 4
2.1 Caractéristiques mécaniques et thermiques.....	— 5
2.2 Vieillessement physique et chimique.....	— 10
2.3 Caractéristiques physiques.....	— 11
3. Techniques de fabrication	— 11
3.1 Moulage.....	— 11
3.2 Usinage.....	— 11
3.3 Assemblage.....	— 17
3.4 Finition.....	— 18
3.5 Recyclage.....	— 18
4. Démarche des calculs de matériaux et pièces	— 18
4.1 Cas des plastiques.....	— 18
4.2 Cas des composites.....	— 19
4.3 Cas des structures sandwich.....	— 20
5. Contrôles et essais	— 22
5.1 Essais physico-mécaniques.....	— 22
5.2 Analyses physico-chimiques.....	— 22
5.3 Contrôles non destructifs.....	— 23
5.4 Analyses simples en atelier de fabrication.....	— 24
6. Règles de conception. Exemples	— 26
6.1 Remarques spécifiques sur le cahier des charges fonctionnel.....	— 26
6.2 Critères de choix matériau/procédé.....	— 26
6.3 Règles géométriques.....	— 26
6.4 Exemples.....	— 28
Pour en savoir plus	Doc. B 5 170

Pour concevoir une pièce mécanique, on peut choisir parmi les matériaux traditionnels (métal, bois) mais aussi parmi les matériaux organiques de synthèse dont les caractéristiques sont chaque jour améliorées. Ces derniers trouvent de plus en plus d'applications mécaniques car ils présentent souvent des avantages très intéressants tels que la **légèreté**, la **tenue à la corrosion**, la **facilité de mise en œuvre** permettant d'intégrer plusieurs fonctions dans une pièce monobloc, l'**autolubrification**, l'**isolation**, la **tenue à la fatigue**, mais ils ont aussi parfois des comportements radicalement différents de ceux des métaux notamment sa **résistance au feu**, sa **dureté**, sa **souplesse**. Il faut donc penser plastique ou penser composite dès le début de l'étude d'un nouveau produit pour exploiter au mieux leurs caractéristiques et comparer avec une solution métallique.

Cet article résume les propriétés et méthodes de mise en œuvre des plastiques et composites, les principes de calcul dimensionnel, les techniques d'analyse et de contrôle ainsi que la démarche de conception illustrée par quelques exemples.

Pour plus de détails, le lecteur se reportera au traité complet *Plastiques et Composites consacré aux plastiques, à la plasturgie et aux composites*, ainsi qu'à l'article plus spécialisé sur la conception des produits industriels dans le traité *L'entreprise industrielle*.

Contrairement aux matériaux métalliques, il n'y a pas de normalisation assurant une valeur précise aux caractéristiques des polymères. De ce fait, il peut y avoir des différences d'un tableau à l'autre pour une même famille de polymères.

1. Généralités

1.1 Historique

Après avoir utilisé les matériaux naturels dans les temps préhistoriques (bois, pierre, peau, laine, etc.), après avoir extrait les métaux des minerais, après avoir créé des alliages métalliques, l'Homme a commencé à créer des matériaux de synthèse à partir de composants organiques. C'est ainsi que sont apparus les premiers polymères de synthèse (fin XIX^e siècle), les premières matières plastiques. Plus récemment encore (années quarante), l'idée est venue d'améliorer les caractéristiques mécaniques en y incorporant des fibres ce que l'on appelle depuis les années 60-70, les matériaux composites. Le tableau 1 récapitule quelques dates référence.

1.2 Définitions

Les plastiques et composites sont constitués de polymères, de fibres et de charges ou d'additifs. Les **plastiques** sont des polymères éventuellement chargés ; ils peuvent être renforcés avec des fibres courtes (un à quelques millimètres) ou des fibres longues (supérieures à un centimètre). Dans ce dernier cas, ils sont appelés **matériaux composites**. Constitués de nappes de fibres tissées ou non, ce sont des composites stratifiés.

1.2.1 Polymères

Un polymère est un enchaînement de motifs organiques identiques appelés **monomères**. Le résultat est une suite d'atomes de carbone reliés entre eux et combinés à d'autres éléments (hydrogène, azote, fluor, silicium, chlore, etc.).

On peut *construire* ainsi à partir d'atomes de carbone et d'hydrogène des chaînes stables de poids moléculaire (p) croissant depuis des *corps gazeux* comme le méthane CH_4 ($p = 16$), éthane, propane, butane C_4H_{10} , puis *liquides* comme le cétane $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ ($p = 192$), enfin *solides* à partir de la paraffine $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ ($p = 254$), puis les cires $\text{C}_{50}\text{H}_{102}$ ($p = 702$), ..., et le polyéthylène de bas poids moléculaire $\text{C}_{100}\text{H}_{202}$ ($p = 1\,402$), première *matière plastique* d'une densité légèrement supérieure à 0,9.

On trouve ensuite toute la gamme de polymères à haut poids moléculaire : polyéthylènes basse densité ($p = 10\,000$ à $50\,000$), les PVC ($p = 50\,000$ à $130\,000$), les polystyrènes ($p = 70\,000$ à $190\,000$), les polyéthylènes haute densité et les polypropylènes ($p = 100\,000$ à $4\,000\,000$), etc.

Chaque monomère est constitué d'atomes unis par des liaisons chimiques covalentes très fortes et confère au polymère certaines

Tableau 1 – Quelques dates référence (sous réserve de l'exactitude des dates indiquées, issues de diverses sources encyclopédiques)

Période	Événement
1830-65	Apparition du terme <i>polymère</i> défini par le chimiste scandinave Berzelius (1832). Nombreux travaux de laboratoires aboutissant à la synthèse de molécules (PVDC, polystyrène, vulcanisation des caoutchoucs). Premières fibres de verre pour usage décoratif (draperie, par exemple).
1869	Hyatt élabore la Celluloïd suite à un concours organisé par la reine d'Angleterre pour remplacer l'ivoire des boules de billard, jusqu'alors prélevé sur les éléphants.
1870-1900	Synthèse en laboratoire du PVC, de l'acétate de cellulose.
1907-17	Apparition de la bakélite et de la cellophane.
1927-30	Industrialisation des PMMA, polystyrènes et PVC.
1933	Les sociétés Corning et Saint-Gobain démarrent une production industrielle de fibres de verre.
1937-38	Apparition du polyéthylène basse densité (ICI) et du polyuréthane (Bayer).
1940	Premières pièces en résine renforcée de fibres de verre pour l'aéronautique et l'isolation électrique.
1941-50	Polyamide (<i>Nylon</i> , Dupont de Nemours), silicone, polyester, PTFE (<i>Téflon</i> , Dupont de Nemours), époxyde (<i>Araldite</i> , Ciba) naissent.
1951-59	Acétal, polyéthylène haute densité, polypropylène et polycarbonate sont disponibles.
1960-69	Développements des fibres de carbone (Courtaulds), des procédés de moulage de matériaux composites.
depuis 1970	Fibres aramides, puis polyéthylène, thermoplastiques renforcées de fibres longues, PEEK, polymères à cristaux liquides, polyamide 4-6, alliages de plastiques, etc.

Pour la signification des sigles, se reporter au tableau 2.

propriétés : la présence de liaisons entre atomes d'électronégativités opposées engendre, par exemple, l'apparition de charges électriques agissant sur les propriétés électriques, la solubilité, les propriétés adhésives, le frottement. Certains sites réactifs (doubles liaisons) peuvent permettre des réactions ultérieures de polymérisation.

Les propriétés des polymères sont conditionnées par le comportement individuel de chaque macromolécule, ou, en d'autres termes,

par le mode d'assemblage des motifs monomères, mais aussi par la longueur et la rigidité des chaînes moléculaires, par les interactions possibles entre macromolécules voisines. De plus, les arrangements moléculaires peuvent évoluer en fonction de la température. Chaque réarrangement est caractérisé par une température de transition de phase dont la plus importante est la **température de transition vitreuse** qui caractérise souvent un changement important des caractéristiques notamment mécaniques.

Les macromolécules sont obtenues par **assemblage répétitif de motifs monomères** associés, selon les conditions, en structures linéaires, ramifiées ou réticulées.

En structure linéaire, on distingue les *homopolymères* dans lesquels les motifs monomères de base sont identiques, distribués régulièrement et agencés linéairement (par exemple, polyéthylène, polypropylène, polystyrène, PVC, polyamide, PTFE) et les *copolymères* préparés par association de deux ou plusieurs types de monomères, chimiquement différents, diversement distribués dans la molécule. Les copolymères *statistiques* ont des motifs monomères A et B distribués au hasard à l'intérieur de la chaîne du polymère suivant le schéma B — A — A — A — B — B — A. Les copolymères *alternés* ont des motifs monomères A et B alternés régulièrement dans la chaîne moléculaire A — B — A — B. Les copolymères *séquencés* (ou copolymères bloc) sont constitués d'enchaînements de segments de longueur variable, ayant un même type de monomère A — A — A — A — B — B — B.

Il en est de même dans les **structures ramifiées**, c'est-à-dire comportant des chaînes ramifiées de longueur et disposition variables. Dans ce cas, la molécule est plus rigide et moins mobile. La chaîne ramifiée peut être constituée de motif d'un autre monomère que la chaîne de base (copolymère greffé).

Les **structures réticulées** sont tridimensionnelles. Elles sont plus rigides et résistent mieux au fluage.

On sépare souvent les polymères en deux familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les *thermoplastiques* ont plutôt une structure linéaire ou ramifiée. Concrètement, ils ont un point de fusion donné et leur moulage est obtenu par changement d'état solide → liquide ou pâteux (mise en forme) → solide (refroidissement). Les *thermodurcissables* ont une structure réticulée, pas de point de fusion et leur moulage se fait par réaction chimique d'un mélange d'ingrédients dans un moule. Après durcissement, il n'y a pas de re-conformation possible.

La classification en *thermodurcissable* et *thermoplastique* est parfois un peu arbitraire, car certains polymères thermoplastiques peuvent, dans certains cas, créer une structure thermodurcissable (par exemple, réticulation du polyéthylène sous l'action de radiations, polystyrène réticulé). De plus, certaines familles comme les polyuréthanes peuvent être soit thermoplastiques (élastomère), soit thermodurcissables (résine de coulée, mousse rigide).

■ Thermodurcissables

Dans cette famille, les structures moléculaires sont beaucoup plus complexes et difficilement représentables par un croquis plan. Elles constituent un réseau tridimensionnel de motifs de base. On y trouve **surtout les polyesters, époxydes, phénoliques, polyimides et aminoplastes**. Leur mise en œuvre résulte d'une réaction chimique entre une résine de base et son catalyseur ou durcisseur, accompagnés de différents ingrédients destinés à apporter une particularité à la réaction chimique (accélérateur, inhibiteur) et à la matière (charges diverses). Après durcissement, on ne peut qu'usiner le matériau ; il n'y a pas de fusion possible.

■ Thermoplastiques

Les **amorphes** n'ont pas d'ordre moléculaire apparent (structure comparable à un liquide), bien qu'il existe des amorphes orientés et non orientés. Ils n'ont pas de température de fusion précise, mais plutôt une phase de ramollissement. La plupart sont généralement caractérisés par un relâchement faible retrait, une stabilité dimensionnelle, une bonne tenue au choc, une assez bonne résistance au fluage et sont difficiles à étirer. Ce sont principalement les PS, SAN, ABS, PMMA, PC, PPO, PSU, PPS, PVC.

Les cristallins ont une structure constituée de cristallites ordonnées et reliées dans une matrice amorphe. Ils ont une température de fusion précise. La plupart sont généralement caractérisés par une bonne tenue chimique, une bonne tenue à la fatigue dynamique, un bon écoulement et un faible coefficient de frottement. Ce sont principalement les PE, PP, PET, PBT, PA, POM, PTFE. Un certain enchevêtrement des molécules étant inévitable, la structure comporte dans la quasi totalité des cas, des zones cristallines dispersées dans une matrice amorphe. On définit alors un *taux de cristallinité* qui caractérise l'importance de la structure cristalline dans l'ensemble de la matière et dépend des conditions de moulage mais aussi de la tendance du matériau à être cristallin. En effet, selon l'arrangement de la macromolécule, il y a une facilité plus ou moins grande à pouvoir cristalliser :

- les *polymères tactiques* ont une structure stéréo régulière favorisant le développement de la cristallinité ;

- les *polymères atactiques* ont une distribution irrégulière des motifs monomères autour de la chaîne carbonée qui interdit tout ordre caractéristique des réseaux cristallins (par exemple, polypropylène atactique dont les groupes méthyle CH₃ sont statistiquement disposés de part et d'autre de la chaîne principale, d'aspect caoutchouteux, avec une faible température de fusion et qui ne peut cristalliser) ;

- les *polymères isotactiques* ont les chaînes latérales orientées d'un seul côté de la molécule rendant possible une cristallisation ;

- les *polymères syndiotactiques*, moins fréquents, ont une structure où les chaînes latérales alternent régulièrement de part et d'autre de la molécule, ce qui peut également favoriser la cristallisation.

Ainsi, la régularité de structure nécessaire à la cristallisation est en général obtenue pour un homopolymère linéaire, un copolymère alterné, séquencé, ou greffé à longues chaînes. Par contre, la présence de courtes chaînes latérales ou une copolymérisation statistique entraînent un abaissement de la cristallinité.

Le tableau 2 donne la liste des principales abréviations employées désignant les polymères, qu'ils soient thermodurcissables ou thermoplastiques.

1.2.2 Fibres

Les fibres sont les éléments qui apportent généralement les propriétés mécaniques intéressantes. Les plus employées sont les **fibres de verre** car leur coût est relativement bas (10 à 15 F/kg en mèche sur bobine) contrairement aux **fibres de carbone, d'aramide (Kevlar de Dupont de Nemours ou Twaron de Akzo) ou de polyéthylène**, dont les prix dépassent généralement 200 F/kg. À partir du filament de base issu de la filière, les fibres sont disponibles sous de nombreuses formes :

- *en mèche continue* (ou *roving*) caractérisée par une masse linéaire en tex (en grammes pour 1 000 mètres linéaires) ou un nombre de filaments unitaires (3 000, 6 000), ou en fibres coupées de différentes longueurs (≤ 10 mm généralement) ;

- *en mat ou non tissé* : nappe de fibres coupées ou continues, disposées aléatoirement, caractérisée par une masse surfacique en g/m² et disponible en rouleaux ;

- *en tissu* : nappe tissée composée d'une chaîne (sens de la bande) et d'une trame (sens parcouru par la navette du métier à tisser). Selon l'agencement des croisements de fils, on définit une armure du tissu : toile (tous les fils se croisent alternativement), satin (le fil de la trame croise un fil sur 4 ou sur 8 de la chaîne), sergé, tissage à 45°, etc.

Il existe d'autres ensembles multidirectionnels comme la *tresse* (tissage cylindrique avec des entrecroisements réguliers de fils), le *tissu conique*, les *tissus 3D* (3 directions de fils) et d'autres encore, issus de l'imagination des tisseurs et des possibilités de leur machine.

Tableau 2 – Principales abréviations désignant les polymères utilisés couramment (énumération non exhaustive définie, en partie, par la norme ISO 1043-1)

ABS	Acrylonitrile-butadiène-styrène
CA	Acétate de cellulose
CAB	Acétylbutyrate de cellulose
EP	Époxydes
ETFE	Éthylène-trifluoroéthylène
Eval	Éthylène/alcool vinylique
FEP	Perfluoroalkoxy
IO	Ionomères
MF	Mélatamine-formaldéhyde
PA 6, 66, etc.	Polyamide 6, 6.6, 6.10, 11, 12, ...
PAI	Polyamide-imide
PBT	Polybutylène téréphtalate
PC	Polycarbonate
PCTFE	Polychlorotrifluoroéthylène
PEbd ou hd	Polyéthylène basse densité ou haute densité
PEI	Polyétherimide
PAEK, PEEK	Polyaryléthercétone (P = poly, E = éther, K = cétone)
PES	Polyéthersulfone
PET	Polyéthylène téréphtalate
PF	Phénol-formaldéhyde
PI	Polyimide
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
PMP	Polyméthyl-pentène
POM	Polyoxyméthylène (acétal)
PP	Polypropylène
PPO (et PPE)	Oxyde de polyphénylène (et Polyphényléther)
PPS	Polysulfure de phénylène
PS	Polystyrène
PSU	Polysulfone
PTFE	Polytétrafluoréthylène
PU	Polyuréthane
PVAC	Acétate de polyvinyle
PVAL	Alcool polyvinylique
PVC	Polychlorure de vinyle
PVCC	Polychlorure de vinyle surchloré
PVDC	Polychlorure de vinylidène
PVDF	Polyfluorure de vinylidène
SAN	Styrène-acrylonitrile
SB	Polystyrène choc (styrène-butadiène)
SI	Silicone
SMMA	Styrène-méthylmétaacrylate
UF	Urée-formaldéhyde
UP	Polyester insaturé

1.2.3 Charges et additifs

Divers ingrédients peuvent être introduits dans le polymère, par le producteur ou par le transformateur, **pour améliorer les caractéristiques des matériaux ou leur mise en œuvre**. On distingue les **charges**, en assez grandes quantités (plus de 10 %), pulvérulentes ou fibreuses, et les **additifs** introduits en petites quantités (moins de 10 %) sous forme de poudre fine, pâte ou liquide.

On peut répertorier les charges et additifs en fonction de leur rôle principal sans oublier que généralement ils ont une influence plus ou moins importante sur plusieurs caractéristiques du polymère (par exemple, le noir de carbone est à la fois un protecteur anti UV, un additif anti-statique et un colorant en noir) :

— **charge renforçante non fibreuse** : il existe des charges non fibreuses qui apportent un renfort mécanique, comme les micro-billes de verre ou les écailles de mica ;

— **charge de remplissage** : la plupart des charges minérales (carbonate de calcium, silicates divers sous la forme de talc ou de kaolin, etc.) coûtent moins cher que la résine ou le plastique. Elles sont alors incorporées pour faire du volume à bas prix ;

— **plastifiant** : c'est un composé organique dont le rôle est d'améliorer la mobilité des chaînes moléculaires, d'abaisser la viscosité, lors du moulage, ce qui peut avoir pour effet ultérieur d'augmenter la tenue au choc et l'allongement à la rupture de la pièce fabriquée ;

— **additif anti-retrait** : essentiellement utilisé pour les résines polyester dont le retrait important à la polymérisation peut créer des fissures ou contraintes internes, sinon des défauts d'aspect de surface, c'est un produit souple, poudre de polyéthylène par exemple, où la déformation de chaque grain compense le retrait de la résine ;

— **lubrifiant et agent de démoulage** : ce sont des stéarates et cires diverses, sous forme de lubrifiant interne incorporé à la matière, dont le rôle est d'améliorer la malléabilité de celle-ci au moulage (un peu comme les plastifiants) ou de lubrifiant externe qui migre à la surface pour éviter que la matière ne colle sur le moule. Les agents de démoulage sont des produits similaires que l'on applique directement sur la surface du moule ;

— **stabilisant thermique** : son rôle est de prévenir les dégradations susceptibles d'apparaître à la suite des traitements thermiques subis par les matériaux au cours de leur mise en œuvre. Ils participent également au maintien de leur couleur. Ce sont souvent des sels métalliques ;

— **antioxydant et anti-UV** : ce sont des composés organiques ou organo-métalliques qui améliorent la résistance à l'oxydation et au rayonnement solaire ;

— **ignifugeant** : sous forme de charge (hydrate d'alumine, borate de zinc, etc.) ou sous forme d'additif (ester phosphorique, paraffine chlorée, etc.), sa fonction est d'améliorer la résistance du polymère à la combustion. Selon leur nature, l'action consiste à absorber l'énergie de combustion par une réaction de dégradation endothermique, ou à créer des produits de dégradation inhibant la combustion (eau, gaz carbonique), voire à créer une couche de matière difficilement inflammable en surface (carbonisation) ;

— **charge conductrice et additif anti-statique** : leur rôle est de véhiculer les charges électrostatiques qui se créent parfois à la surface des plastiques, notamment les styréniques. Ce sont des composés organiques ou des poudres métalliques ;

— **colorant et pigment** : il existe toute une palette de composés minéraux ou organiques, en poudre ou en pâte plus ou moins visqueuse, que l'on incorpore en petite quantité dans le polymère pour lui donner une couleur unie ou un effet coloré spécial (phosphorescent, nacré, marbré, etc.). Ils influent aussi sur la résistance des plastiques aux UV ;

— **bactéricide et fongicide** : ces additifs détruisent les moisissures et autres micro-organismes susceptibles de se développer à la surface de certains polymères comme les PVC souples et acétates de polyvinyle ;

— **agent gonflant** : son rôle consiste à créer des alvéoles lors de la mise en œuvre du polymère de manière à obtenir une mousse souple ou rigide. Il est incorporé à la matière et se dégrade en créant un gaz à partir d'une certaine température ;

— **additif biodégradable** : les préoccupations écologiques et l'accroissement important de l'emploi des plastiques développent une nouvelle catégorie d'additif dont le rôle est de rendre biodégradable le polymère en fin de vie. Son action consiste le plus souvent à fragmenter la matière par rupture de chaîne moléculaire.

2. Propriétés

Ce paragraphe résume les caractéristiques les plus importantes nécessaires à la conception d'une pièce mécanique (cf. article *Conception d'un objet* [AM 3 810] dans le traité Plastiques et Composites).

Nota : se reporter également aux différents articles spécialisés concernant les propriétés générales dans le traité Plastiques et Composites.

2.1 Caractéristiques mécaniques et thermiques

Le tableau 3 regroupe les principales caractéristiques mécaniques et thermiques de polymères renforcés couramment employés ; ces valeurs sont des *ordres de grandeur indicatifs*. Elles peuvent être

utilisées pour du prédimensionnement mais doivent être vérifiées expérimentalement avec la matière réellement choisie pour un calcul définitif. Certaines propriétés dépendent de l'orientation des fibres.

Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques et thermiques utilisables pour le prédimensionnement d'une pièce en plastique ou composite (ordres de grandeur indicatifs)

Matériaux	Mise en œuvre (§ 3)	Densité	Taux de fibres (% en masse)	Flexion		Traction		Compression	Dureté Rockwell	Conductivité thermique (W/m · °C)	Capacité thermique massique (kJ/kg · °C)	Coefficient de dilatation thermique (µm/m · °C)	TFC (1) (°C)	TUC (1) (°C)
				Limite (MPa)	Module (GPa)	Limite (MPa)	Module (GPa)	(MPa)						
THERMODURCISSABLES RENFORCÉS														
Polyester - verre	SMC-BMC	1,7-2,1	15-30	70-210	10-14	25-140	11-17	100-210	R 50 à 112	0,19-0,24	1,2-1,5	14-22	200-260	150-200
	RTM	1,5-1,7	25-50	70-275	9-12,5	170-210	6-14	100-210	R 40 à 105	0,19-0,26	1,2-1,4	18-32	180-205	70-200
	Stratification	1,4-1,6	30-50	110-195	7-8	60-125	5-12	100-170	R 40 à 105	0,17-0,23	1,3-1,4	22-36	180-205	70-180
Époxyde - verre	Enroulement	1,7-2,2	30-80	700-1 900	35-48	550-1 750	28-62	310-480	M 98 à 120	0,28-0,33	0,96-1	3,6-11	180-205	260
Polyester - verre	Pultrusion	1,6-2	40-80	700-1 250	28-40	410-1 250	28-41	210-480	R 80 à 112	0,28-0,33	0,92-1	5,4-14	160-190	70-260
Phénolique - verre	Compression	1,7-1,9	5-25	125-165	21	50-120	18-20	100-240	M 90 à 99	0,16-0,30	0,84-1,25	8-16	200-260	160-180
THERMOPLASTIQUES RENFORCÉS														
Acétal	Injection	1,6-1,7	20-40	100-195	5,5-9	60-125	5,5-10	80-120	M 78 à 94	0,41	1,46	34-63	155-170	85-105
Polyamide		1,5-1,7	6-60	50-350	1,5-18	90-230	1,4-14	90-170	R 110 à 120	0,35	1,25-1,46	20-38	150-260	150-205
Polycarbonate		1,2-1,5	20-40	120-210	5-10	80-170	5-12	100-170	M 75 à 100	0,20	1,25	22-32	140-150	135
Polyéthylène		1,1-1,3	10-40	50-85	1,5-4,5	45-80	3-6	30-55	M 60 à 65	0,40		30-48	65-95	150
Polypropylène		1,1-25	20-40	50-80	2,5-5,5	35-70	3-6	40-55	R 95 à 115	0,15		29-43	110-150	150
Polystyrène		1,2-1,3	20-35	70-120	5,5-8,5	70-100	5,8-8	90-130	M 70 à 95	0,16	0,96-1,46	30-40	90-105	80-90
Polysulfone		1,4-1,6	20-40	145-190	5,5-10	90-140	10	145-180	M 85 à 92	0,26		22-30	170-180	170-200
ABS		1,2-1,4	20-40	160-180	6,5-10	80-110	4-7	80-150	M 75 à 102	0,16		29-36	100-115	90-110
PVC		1,5-1,6	15-35	140-170	6-11	100-125	7-12	90-120	M 80 à 88	0,16		22	65-75	60
PPO		1,2-1,4	20-40	120-215	5,5-10	100-150	6,5-10	125-140	M 95			18-36	105-155	115-130
SAN		1,5-1,6	20-40	100-145	5-12,5	90-125	6-13	80-160	M 77 à 103	0,16		29-38	100-110	90-105
Polyester saturé	1,3-1,4	20-35	130-200	6-10	100-130	9-11	110-125	R 118 à M 70	0,25	1,80	43-60	190-240	135-190	
THERMOPLASTIQUES NON RENFORCÉS														
Acétal	Injection	1,4	0	90-100	3	55-70	2,8-3,4	34	M 78 à 94	0,31	1,46	81	110-125	85-105
PMMA		1,18	0	60-70	3,3	60-70	3,2	-	M 95	0,19		70	105	85
Polyamide		1,1-1,2	0	35-125	1,5-3	60	1,4-3,4	50-70	R 108 à 118	0,25	1,67	100-113	50-65	120-150
Polycarbonate		1,2	0	90-100	2	60-75	2,4	85	M 70	0,20	1,25	70	125-140	135
Polypropylène		0,9	0	35-55	0,5-2	20-35	0,8	25-55	R 50 à 110	0,15		68	50-60	90-115
Polystyrène		1,05	0	20-70	0,5-3,5	20-35	1,4-2,8	25-62	M 12 à 45	0,16		40-100	80-95	65-80
Polysulfone		1,25	0	5-35	3	70	2,5	100	M 69 à R 12	0,26		56	175	150-175
ABS		1,05	0	50-60	2-3	45	1,9-2,8	50-190	R 113	0,16		74-94	100-120	95-110
PVC rigide		1,4	0	90-110	3	40-50	2,8	-	M 80	0,16		-	70-75	60
PPO		1,05	0	100-110	3	70	2,6	100	M 75			54	190	100
SAN		1,08	0	65-120	3,5	70-80	3,4	100-110	M 80	0,16		65	90-105	80

Valeurs à température ambiante

(1) TFC = température de fléchissement sous charge et TUC = température d'utilisation continue, en ambiance sèche.

2.1.1 Comportement thermomécanique (traction, compression, cisaillement, choc)

Alors que les métaux courants présentent à température ambiante des comportements en traction caractérisés par des déformations purement élastiques, les polymères, en particulier les thermoplastiques, subissent des déformations viscoélastiques dépendant des vitesses de sollicitations et des conditions imposées (température, humidité).

■ Traction

Dans le diagramme contrainte/allongement (figure 1), les courbes caractéristiques d'une déformation en traction des thermoplastiques peuvent présenter trois aspects selon les valeurs des paramètres, température, humidité et vitesse de déformation.

Un polymère peut suivre une courbe I pour un essai de traction à froid (-30 °C par exemple), une courbe II à l'ambiante et III à chaud (+80 °C). Au-delà d'une certaine limite de contrainte où les plastiques ductiles ont un comportement viscoélastique, les courbes contrainte/allongement présentent un point d'inflexion ou une inversion du gradient d'évolution des contraintes. Cette limite appelée *seuil d'écoulement* caractérise la phase initiale d'un phénomène d'écoulement à froid. Un seuil conventionnel peut être défini pour les matières ne possédant pas de seuil naturel.

Lorsque les déformations atteignent une valeur suffisante pour que cesse localement toute liaison intermoléculaire, une rupture apparaît et marque la limite supérieure de la courbe contrainte/allongement. En fonction de la structure macromoléculaire du matériau, la rupture est de type fragile (thermodurcissables et matériaux vitreux), ou ductile en particulier pour les matériaux cristallins au-dessus de la température de transition vitreuse (polyamide, polyoléfine, etc.). L'action de la température se caractérise pour les thermoplastiques par un abaissement général des contraintes limites de rupture (tableau 4). L'effet d'une immersion prolongée dans l'eau est similaire pour les matériaux sensibles à l'hydrolyse (polyamides en particulier).

Tableau 4 – Exemples d'évolution de la contrainte de rupture en traction en fonction de la température (valeurs indicatives moyennes)

Thermoplastiques non renforcés	Contraintes de rupture (MPa)		
	20 °C	80 °C	120 °C
Acétal.....	72	48	28
PMMA.....	72	27	-
Polyamide 66.....	70	65	56
PPO.....	67	50	-
Polysulfone.....	66	50	43
Polycarbonate.....	64	48	41
Polystyrène.....	60	25	-
PVC rigide.....	58	7	-
ABS.....	50	24	-
Polypropylène.....	37	15	7
PTFE.....	21	12	8

À l'image de tout autre matériau, le module d'un polymère a la dimension d'un rapport contrainte/déformation relative σ/ϵ . On peut définir (figure 2) :

— un *module d'élasticité* ou *module tangent* ; si la matière possède un domaine de déformation purement élastique, il est représenté par le rapport σ/ϵ dans la limite où les déformations sont strictement réversibles ;

— un *module apparent* ou *module sécant* ; quand la déformation ne présente pas de phase purement élastique, le rapport entre contrainte et allongement en un point conventionnel B de la courbe

de traction définit le module apparent. La position de ce point se réfère à une déformation conventionnelle de 1,5 ou 100 % : on parle alors de module sécant à 1,5 ou à 100 % d'allongement.

La rigidité d'un polymère dépend de la flexibilité des chaînes moléculaires, conditionnée par les valeurs des températures de transition. Plusieurs états pourront être observés (figure 3) :

- *état vitreux* : le module est élevé, le polymère est rigide et dur, souvent fragile ;
- *état caoutchoutique* : le module est peu élevé et demeure sensiblement constant ;
- *état visqueux* : disparition quasi complète de la composante élastique.

Le tableau 5 montre l'évolution du module d'élasticité de plusieurs thermoplastiques en fonction de la température. L'humidité peut également avoir une influence sur le module : le polyamide 6 non chargé voit son module passer de 3 000 MPa s'il est sec, à moins de 500 MPa s'il est saturé d'humidité.

Tableau 5 – Évolution du module d'élasticité en traction en fonction de la température (valeurs moyennes)

Thermoplastiques	Module d'élasticité (MPa)		
	20 °C	80 °C	120 °C
Polyamide 66 – 30 % verre.....	9 500	7 600	5 000
PPO – 30 % verre.....	9 500	9 200	8 500
Acétal – 30 % verre.....	7 800	4 500	3 500
Acétal.....	3 000	1 540	910
Polysulfone.....	2 590	2 450	2 240
PPO.....	2 380	2 310	1 960
Polycarbonate.....	2 380	2 240	1 960
Polypropylène.....	1 300	400	-

■ Autres caractéristiques : compression, flexion et torsion

Morism le cas du flambage propre aux structures élancées, les effets de **compression** se traduisent le plus souvent par des déformations de type *en tonneau*, sauf pour les composites à fibres longues où le comportement est plus rigide avec une rupture brutale, quasiment sans écrasement.

La **flexion** est la forme de sollicitation sans doute la plus fréquemment rencontrée en utilisation classique. Dans une paroi soumise à une flexion, en fait, une demi-épaisseur est sollicitée en traction et l'autre demi-épaisseur en compression.

De manière similaire aux modules de traction et flexion, les modules de **cisaillement** des polymères accusent une brutale variation au voisinage de la température de transition vitreuse.

■ Résilience, choc

Quasiment tous les essais de résilience normalisés conduisent à des valeurs exclusivement comparatives pour des conditions bien précises (traction choc, choc Charpy, choc Izod, chute de masse, etc.). *Il est donc difficile de quantifier directement une tenue au choc sans préciser la nature du choc.* Dans le cadre des essais normalisés sur éprouvette entaillée, la forme de l'entaille influe aussi très fortement sur les résultats obtenus.

Pour un même type de polymère, l'amélioration de la résilience est favorisée par une élévation du poids moléculaire : cela justifie l'existence de procédés de déformation à froid utilisés pour la mise en œuvre de certains plastiques tel le polyéthylène à très haut poids moléculaire. Contrairement à une opinion assez répandue, la tenue aux chocs des plastiques n'est pas systématiquement améliorée par une augmentation de l'épaisseur. La rétention d'eau, relativement importante pour certains polyamides, entraîne un abaissement général des caractéristiques mécaniques à l'exception

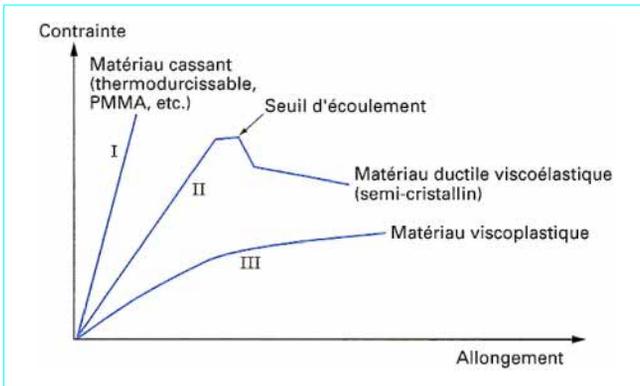


Figure 1 – Courbes de traction types

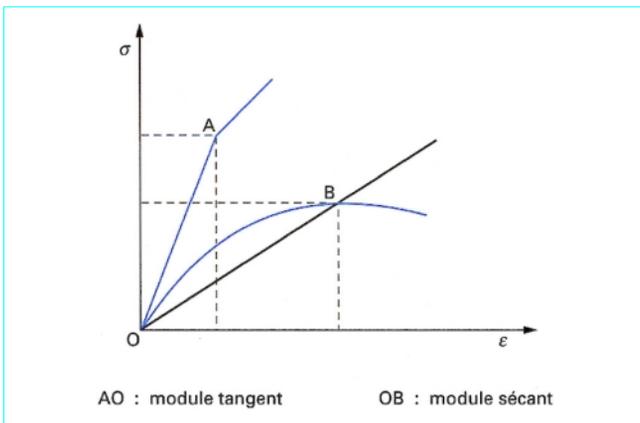


Figure 2 – Module tangent ou sécant selon le comportement du matériau

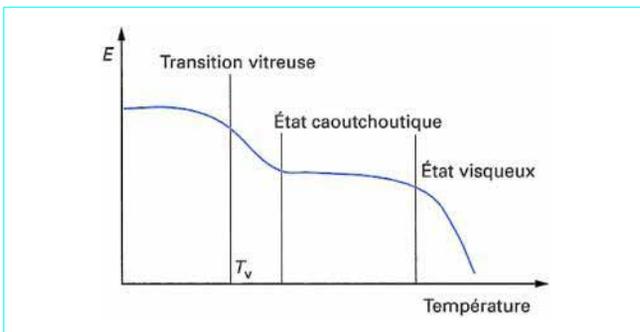


Figure 3 – Évolution du module E en fonction de la température (cas type d'un polymère amorphe)

de la résistance au choc largement améliorée par l'effet plastifiant ainsi introduit. Les charges ou phases caoutchoutiques (par exemple, butadiène) améliorent la résilience (par exemple, ABS par rapport au polystyrène), tandis que les charges fragiles (fibres de verre) ont un effet inverse.

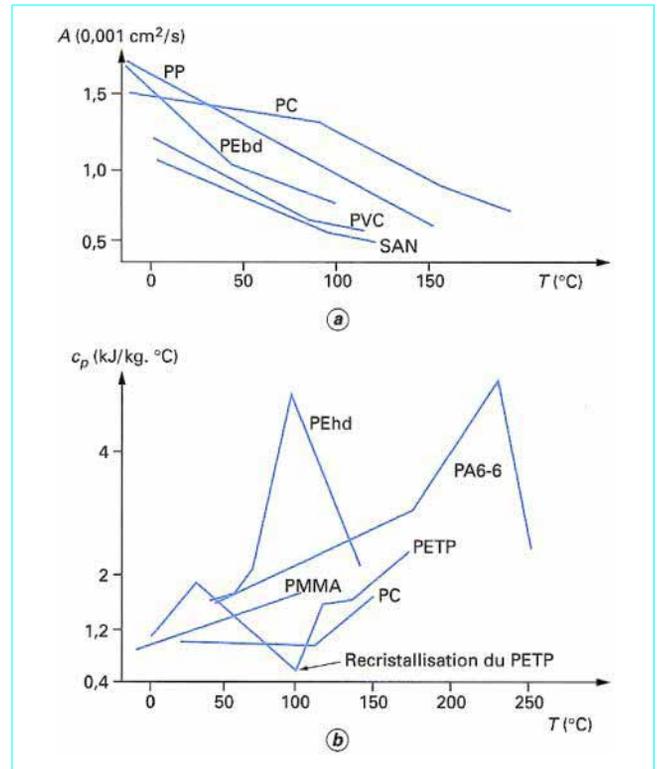


Figure 4 – Diffusivité thermique et capacité thermique massique de thermoplastiques en fonction de la température

2.1.2 Caractéristiques thermiques

■ Conductivité thermique

Les polymères sont plutôt isolants thermiques avec des valeurs de conductivité thermique intrinsèque situées entre 0,1 et 0,5 W/(m · °C) (tableau 3). On peut augmenter ces valeurs en ajoutant des charges conductrices (poudres métalliques) ou les diminuer en constituant des structures alvéolaires (plastiques allégés ou mousses plastiques). Pour une même famille de polymères, la conduction thermique est influencée par la densité globale de la mousse plastique (tableau 6) et par le gaz contenu dans les alvéoles.

■ Diffusivité thermique

Dans des conditions thermiques transitoires, il est nécessaire de considérer la quantité de chaleur que le matériau peut emmagasiner sous forme d'énergie interne. La diffusivité thermique A , qui permet de caractériser ces conditions, est liée à la conductivité thermique par la relation :

$$A = \lambda / \rho c_p$$

avec ρ masse volumique,

c_p capacité thermique massique à pression constante.

La diffusivité thermique présente un intérêt pour l'étude des problèmes de transfert de chaleur en régime transitoire et l'analyse du cycle de moulage (échange thermique avec le moule). La diffusivité thermique des thermoplastiques amorphes et cristallins décroît fortement lorsque la température s'élève (figure 4a). Pour les thermodurcissables, la diffusivité s'abaisse lentement lorsque la température croît.

Tableau 6 – Caractéristiques thermiques de quelques thermoplastiques alvéolaires

Mousse	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m · °C)	Coefficient de dilatation thermique (µm/m · °C)	Température maximale d'utilisation (°C)
Polystyrène (moulé).....	16 à 80	0,036 à 0,033	54-72	70-80
Polyuréthane rigide.....	20 à 400	0,018 à 0,062	36-140	120
Polyuréthane souple.....	16-34	0,03		125-135
Phénolique.....	32 à 160	0,025 à 0,04	9	150
PVC souple.....	60-180	0,04		50
PVC rigide.....	32-60		72-108	70-80
Urée-formol.....	13-20	0,035		50
Méthacrylimide (<i>Rohacell</i>).....	70	0,03	35	

■ **Dilatation thermique**

Les polymères ont un coefficient de dilatation linéaire supérieur à celui de la plupart des métaux, compris généralement entre 30 (polymères avec taux de fibres élevé) à 200 µm/m · °C (certains polyfluorés non chargés). La dilatation thermique peut être différente selon les directions considérées dans un plastique renforcé ou un matériau composite en fonction de l'orientation des fibres. Certains composites à base de fibres de carbone peuvent avoir un coefficient négatif dans le sens des fibres, - 2 µm/m · °C et de l'ordre de 30 µm/m · °C dans le sens perpendiculaire.

■ **Capacité thermique massique**

La plupart des polymères ont une capacité thermique massique comprise entre 0,8 et 3 kJ/kg · °C (figure 4b et tableau 3). Ce paramètre *c_p* permet le calcul des moyens de chauffage des outillages lors de la mise en œuvre.

■ **Température maximale d'utilisation**

Il existe plusieurs critères pour définir cette température comme, par exemple, une baisse de 10 % de tenue mécanique, une variation de masse, etc. (tableau 7). La présence de renforts fibreux augmente généralement la température maximale d'utilisation, de 10 à 20 °C.

Tableau 7 – Température indicative moyenne de résistance à la chaleur continue en ambiance sèche

Température (°C)	Polymères non chargés
280 à 315	Certains polyimides (<i>Kapton</i> , PMR 15)
240 à 260	PTFE, polycétone
230 à 240	Polyimide bismaléimide
200 à 220	Polyéthersulfone, PPS, polyamideimide
180 à 200	Polyétherimide
160 à 180	Polysulfone, polyphthalamide
140 à 160	Polyamide 11 et 6-6, polyarylamide
120 à 130	Polycarbonate, phénolique, polyester PET, polypropylène
100 à 120	ABS, PPO, acétal, polyéthylène haute densité
80 à 100	SAN, mélamine, cellulosique, polystyrène
< 80	PMMA, PVC rigide, polyéthylène basse densité

■ **Comportement au feu**

Les polymères, de nature organique, sont tous, plus ou moins selon la nature de leur molécule, sensibles à une réaction de

combustion en présence de l'oxygène de l'air. Il existe plusieurs méthodes permettant de classer les polymères en fonction de leur comportement au feu (tableau 8) :

— le *classement M*, de M1 *quasiment incombustible* à M5 *très combustible*, établi en fonction de la réaction d'une éprouvette plane exposée au rayonnement d'une source de chaleur constante (norme NF P 92-501), à partir de quatre indices : inflammabilité, développement des flammes, longueur des flammes et combustibilité. Ce classement est parfois complété d'un classement F, de F0, pas de fumées, à F5, fumées denses et toxiques ;

— la *norme UL94**, qui consiste à analyser le comportement d'un barreau, horizontal ou vertical, soumis à l'action d'une flamme de brûleur à gaz. Il en résulte un classement HB, V2, V1 et V0 dans l'ordre croissant de la résistance au feu ;

— l'*indice d'oxygène*, qui est le taux minimal volumique d'oxygène (en %) d'un mélange oxygène/azote à 23 °C permettant d'entretenir la combustion (NF T 51-071).

Nota : * UL : Underwriters Laboratories

2.1.3 Propriétés de surface

■ **Dureté**

Différents essais sont employés pour mesurer la dureté, définie comme une résistance à la pénétration, ce qui n'est pas nécessairement une mesure de la résistance à la rayure. Il n'existe aucune relation simple entre la dureté mesurée et les autres caractéristiques mécaniques des polymères. Les principales méthodes (figure 5) sont :

— *méthode Brinell* : on applique sur la surface de la matière une bille en acier de diamètre défini sous une charge spécifiée. Le diamètre de l'empreinte est mesuré au microscope. La mesure est le rapport charge/surface de l'empreinte. Cette méthode est applicable à une grande gamme de dureté (ISO 2039) ;

— *méthode Rockwell* : un cône en diamant est appliqué sur la surface sous une charge de 10 daN, puis sous une charge plus élevée (Rockwell R = 60 daN ; Rockwell M = 100 daN). La mesure est le résultat de la différence de pénétration (ASTM D 785) ;

— *méthode Shore* : mesure directe de la pénétration d'un poinçon de diamètre défini pressé par un ressort standardisé, dont la force est différente selon qu'il s'agit de plastiques souples et caoutchouc (Shore A) ou de plastiques durs (Shore D) ; elle fait l'objet de la norme NF T 51-109 ;

— *méthode Barcol* : surtout pour les résines et stratifiés, la méthode est basée sur un principe identique aux méthodes Shore et fait l'objet de la norme NF P 38-501.

Tableau 8 – Comportement au feu des polymères chargés ou non

	Classement M (1)	Classement UL94 (1)	Indice d'oxygène (%)
ABS.....	jusqu'à M2	jusqu'à V0	21
Acétal POM.....			15
Acétate de cellulose.....	jusqu'à M3	jusqu'à V0	19
Époxyde.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	19 à 45
PEEK.....	V0	V0	35
Phénolique.....	M1	M1	
PMMA.....	jusqu'à M2		17-20
Polyamide 4-6.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	24
Polyamide 6.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	25
Polyamide 6-6.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	23
Polybenzimidazole.....	M1	V0	58
Polycarbonate.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	26 à 31
Polyester insaturé.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	21
Polyester saturé PET.....			21
Polyétherimide.....	M1	jusqu'à V0	47
Polyéthylène.....	jusqu'à M3	jusqu'à V2	18
Polypropylène.....		jusqu'à V2	17
Polystyrène.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	18 à 28
Polysulfone.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	30
Polyuréthane.....	jusqu'à M2		
Polyuréthane-isocyanurate.....	jusqu'à M1		
PPO.....		jusqu'à V0	30
PTFE.....	M1	jusqu'à V0	95
PVC rigide.....	M1-M2	jusqu'à V0	42
PVC souple.....	jusqu'à M2		
PVDC.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	60
PVDF.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	44
Silicone.....	M1-M2	jusqu'à V0	
Urée-formol.....	jusqu'à M1	jusqu'à V0	

(1) Le meilleur classement au feu (limites indiquées) correspond aux polymères chargés ignifuges.

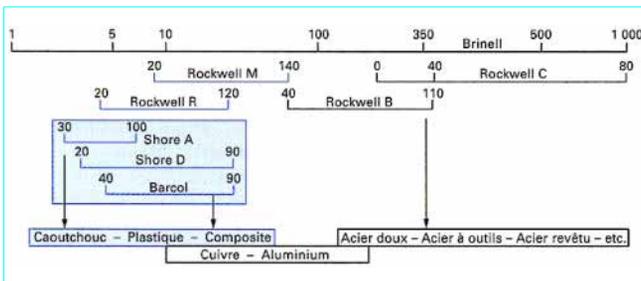


Figure 5 – Comparaison approximative empirique de différentes échelles de dureté

En France, les principales méthodes utilisées pour les plastiques et composites sont les méthodes Shore et Barcol.

■ Frottement

Le comportement au frottement d'un polymère dépend de la nature de la matière en contact, de l'effort d'application, de la vitesse au contact et de l'environnement (température, humidité, lubrifiant, etc.).

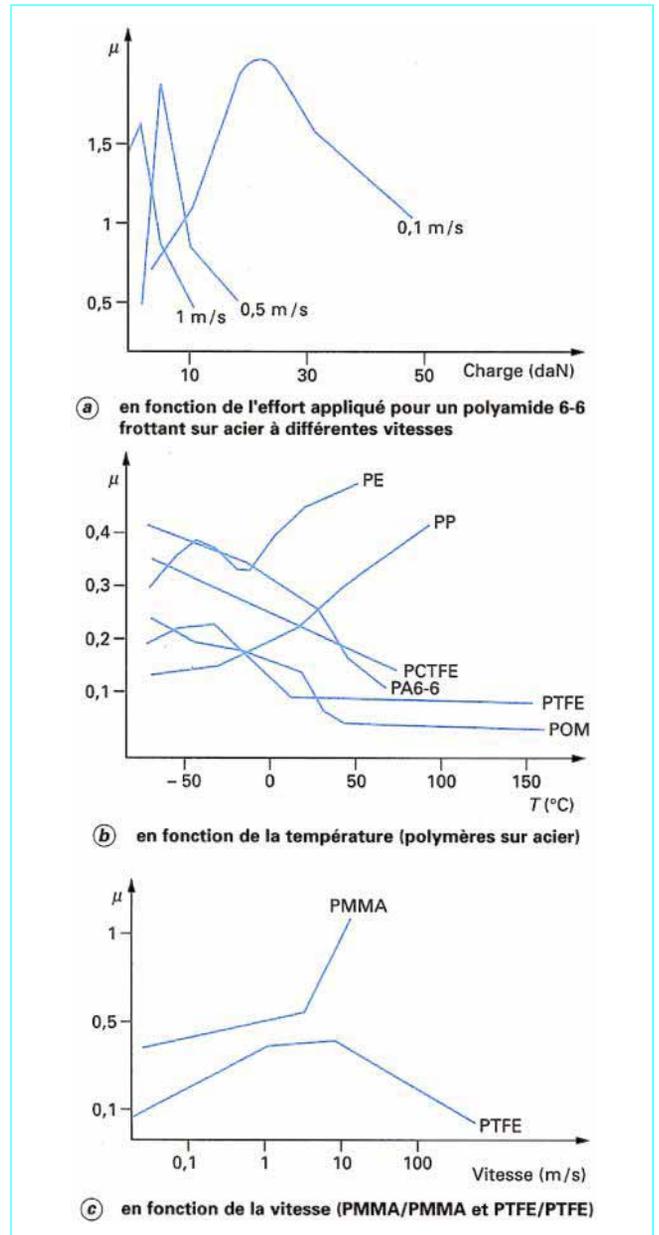


Figure 6 – Variation du coefficient de frottement μ pour différents polymères en fonction de l'effort appliqué, de la température ou de la vitesse

La figure 6 montre la variation du coefficient de frottement pour divers polymères en fonction de l'effort appliqué, de la température ou de la vitesse.

■ Usure

On distingue l'usure :

— *par abrasion* qui résulte de la présence sur l'élément frottant le plus dur, d'aspérités qui agissent directement ou indirectement après formation de débris. La dureté des polymères ne constitue pas le paramètre caractéristique permettant d'estimer la résistance à ce type d'usure ;

— *par fatigue* consécutive à l'application cyclique de sur-contraintes locales ;
 — *par adhésion* qui apparaît principalement sur des surfaces lisses.

Les théories les plus simples indiquent une proportionnalité entre taux d'usure et charge appliquée si la température au niveau de la surface frottante n'atteint pas la température de ramollissement du matériau. Pour une élévation croissante de la température, on remarque que le taux d'usure passe par un minimum avant de s'élever brutalement au voisinage de la température de ramollissement. L'apparition d'un maximum d'usure à basse vitesse est caractéristique du comportement viscoélastique des déformations, d'une manière similaire à ce qui est observé pour le coefficient de frottement.

De nombreuses charges introduites dans le matériau pour en améliorer les caractéristiques mécaniques (verre, carbone) ou les qualités frottantes (MoS₂, graphite, silicone, PTFE) peuvent à l'usage se révéler abrasives pour le matériau au contact. Pour une géométrie déterminée de l'ensemble frottant, on peut choisir un matériau en fonction d'un facteur d'usure défini comme la limite d'utilisation liée à une pression moyenne d'application p et à une vitesse de contact v , appelé quelquefois *pv limite*.

2.2 Vieillessement physique et chimique

2.2.1 Phénomènes de dégradation physicomécanique (fluage, fatigue)

■ Fluage, relaxation

Les possibilités de glissements moléculaires relatifs sous l'action de sollicitations mécaniques ont pour conséquence de limiter les contraintes et déformations admissibles lorsque les sollicitations sont permanentes.

Le *fluage* correspond à l'évolution croissante dans le temps t des déformations ε sous l'effet de contraintes σ appliquées constantes : $\varepsilon = f_1(t)$ à σ constante.

La *relaxation* traduit l'évolution décroissante des contraintes σ en fonction du temps si des déformations ε constantes sont imposées : $\sigma = f_2(t)$ à ε constante.

La sensibilité à ces deux phénomènes est caractéristique de liaisons intermoléculaires de faible énergie (thermoplastiques). De fortes énergies de liaison (réticulation) conduisent à des polymères moins sensibles au fluage et à la relaxation (thermoplastiques partiellement réticulés, thermodurcissables). Les matériaux composites à fibres longues y sont quasiment insensibles. L'existence de trois variables introduit donc une triple possibilité de représentation plane, soit à ε constante, soit à σ constante, soit à t constant. La recouvrance de fluage représente la reprise sur la déformation en fonction du temps après suppression de la contrainte. Elle est effective lorsque le seuil d'écoulement (s'il existe) n'a pas été dépassé. Le module apparent de fluage ou de relaxation correspond au rapport contrainte/déformation défini à un instant spécifié de l'essai de fluage ou de relaxation (par exemple, module d'élasticité après 1 000 h sous contrainte de 20 MPa). En raison de la non linéarité et de la viscoélasticité, le module apparent est fonction de la contrainte appliquée qui doit ainsi référencer l'essai de fluage. Le dimensionnement d'une pièce plastique doit être fait en fonction de ces critères fluage ou relaxation.

■ Fatigue

Les comportements sont différents selon la famille de polymères.

- *Thermoplastiques* : contrairement à certains métaux, ils ont un pouvoir amortissant considérable en raison de leurs caractères viscoélastiques. Cela entraîne un échauffement interne de la matière préjudiciable au maintien des caractéristiques mécaniques. Pour cette raison, le comportement en fatigue dépend du bilan thermique

du mécanisme, de l'échantillon testé et essentiellement de la fréquence de l'essai. Certains plastiques présentent des courbes de Whöler sans limite d'endurance.

- *Thermodurcissables* : en raison d'un comportement élastique marqué introduit par la structure tridimensionnelle, ils ont un comportement voisin de celui des métaux pour ce qui concerne l'apparition des fissures et leur propagation. Ils ont d'ailleurs une sensibilité marquée à l'entaille.

- *Matériaux composites* : ils présentent une sensibilité à l'entaille beaucoup moins grande que les métaux, notamment les alliages d'aluminium. Les stratifiés à base de fibres de verre s'endommagent davantage que ceux à base de fibres de carbone : les composites à base de fibres de verre perdent de l'ordre de 10 % de leur résistance statique par décade de cycle, contre 2 à 3 % pour des stratifiés à base de fibres de carbone (l'explication en serait l'évacuation de la chaleur créée par les vibrations grâce à la conductivité thermique du carbone, ainsi la résine et les interfaces résine-fibres s'endommagent moins vite).

2.2.2 Résistance aux UV et aux intempéries

Le vieillissement des polymères se traduit par des changements de coloration, d'aspect de surface ainsi que par des variations des propriétés mécaniques et électriques. Les causes de vieillissement sont multiples mais en rapport direct avec la nature chimique et la structure des matériaux :

- *le rayonnement solaire*, surtout les UV de plus de 0,3 μm : il provoque la rupture des liaisons chimiques des molécules (C=O, C=C, C—H, O—H) et peut amorcer des réactions d'oxydation ;

- *l'oxygène de l'air et l'ozone* : l'attaque est normalement lente, mais accélérée en présence d'UV ou par élévation de température ;

- *l'élévation de température* : il peut se produire une volatilisation des plastifiants, une décomposition chimique des charges, colorants et plastifiants, une accélération des réactions amorcées par les UV ;

- *l'abaissement de température* : il peut entraîner des fissurations en surface ;

- *l'eau (humidité ou pluie)* : elle hydrolyse les groupements de certains polymères (polyester, polyamide, cellulosique) et affaiblit les liaisons entre les constituants des résines chargées ou renforcées. La pluie élimine par lavage les stabilisants solubles (absorbants UV, antioxydants) qui formaient une couche de protection à la surface des matériaux ;

- l'évolution au cours du temps de la structure moléculaire.

Ces facteurs sont interdépendants et ont des effets différents selon la nature de la matière et les conditions d'utilisation. La résistance aux intempéries peut être nettement améliorée par l'addition de divers agents comme les anti-UV, antioxydants, désactivants spécifiques et certains pigments. La nature intrinsèque des acryliques, fluorés et mélamines est généralement très résistante aux intempéries.

2.2.3 Tenue chimique

Le contact des polymères avec un produit chimique peut se traduire par différentes actions :

- *absorption puis plastification du polymère* qui se traduit par une baisse des propriétés mécaniques et une augmentation de la résistance au choc. Le phénomène est réversible, le matériau retrouvant ses propriétés initiales lorsqu'il revient au même état de siccité ;

- *extraction de constituants du polymère par le fluide* ;

- *absorption suivie d'une dégradation chimique* par hydrolyse, oxydation, durcissement, ruptures de chaînes ou de liaisons entraînant des pertes de propriétés irréversibles.

L'absorption des agents chimiques est influencée par :

- la nature du polymère et sa structure : la résistance chimique augmente avec la masse moléculaire ou le taux de réticulation (thermodurcissable) ;
- le type de fluide et sa concentration ;
- la température : un polyamide peut absorber 4 fois plus d'eau à 50 °C qu'à 20 °C ;
- la nature des additifs présents dans le polymère ;
- l'état de la matière moulée (la résistance chimique des cristallins est supérieure à celle des amorphes, notamment sensibles à la fissuration sous contrainte ou *stress cracking*).

Les polyesters, polyamides, polyuréthanes et dérivés cellulose sont sensibles à l'eau. Les polyesters, polycarbonates et polyimides peuvent être sensibles à l'hydrolyse alcaline. Les polyamides et acétals sont sensibles à l'hydrolyse acide. Les polyéthylènes, polypropylènes et polyfluorés (*Téflon*) sont les polymères les plus inertes chimiquement.

2.3 Caractéristiques physiques

2.3.1 Propriétés électriques

Les polymères standards sont intrinsèquement d'**excellents isolants électriques**. Les propriétés diélectriques résultent de la présence de liaisons polaires dans les molécules. Sous l'effet d'un champ électrique alternatif, les groupes polaires tendent à s'orienter dans la direction du champ avec vibrations aux mêmes fréquences de sorte que toute orientation rapide propre à une grande flexibilité moléculaire conduit à des constantes diélectriques élevées. Lorsque la flexibilité est moyenne, les possibilités d'orientation sont limitées, une partie de l'énergie, croissante en fonction de la rigidité, se dissipe en chaleur (pertes diélectriques) : la constante diélectrique est faible. À basse fréquence, l'orientation est facilement réalisée d'où une constante diélectrique élevée, contrairement à ce qui se passe à haute fréquence. On observe en général une amélioration de la constante diélectrique avec la température. Le réseau cristallin diminue la mobilité des groupes polaires et donc la constante diélectrique dont les valeurs peuvent cependant demeurer élevées en raison de la présence d'une matrice amorphe. L'addition de plastifiants ou l'absorption d'humidité facilite la mobilité moléculaire et améliore à haute fréquence la constante diélectrique. La présence de charges conductrices ou de fibres de carbone modifie nettement les caractéristiques électriques des polymères. Des développements sont en cours pour mettre au point des polymères conducteurs (polyacétylène, polyparaphénylène, polypyrrole, polyaniline, etc.). Cependant, un dopage est nécessaire pour les rendre effectivement conducteurs de manière durable.

Le caractère isolant des plastiques peut créer des problèmes électromagnétiques par accumulation de charges électrostatiques par exemple en électronique ou en informatique. Il existe plusieurs possibilités de remédier à ce défaut selon le niveau de blindage souhaité :

- incorporation de charges conductrices (poudres métalliques, noirs de carbone) ;
- application d'une peinture conductrice (peintures à l'argent, assez chères) ;
- l'intégration d'une feuille ou d'un tissu métallique ;
- la métallisation, etc.

2.3.2 Propriétés optiques

Les plastiques susceptibles d'être transparents sont généralement ceux qui ont une structure amorphe : certains cellulose, polystyrènes, PVC, polyéthylènes basse densité, polyméthylpentènes, SAN, PMMA, polycarbonates, polysulfones, polyamides amorphes (*Trogamid* de Hüls), PBT, PET, ionomère, etc. Les meilleures qualités

de transparence sont généralement obtenues avec le PMMA (verre acrylique), polycarbonates (vitrage résistant au choc) et les ionomères (flaconnage de parfum).

Certaines références de polyesters thermodurcissables peuvent être transparentes : en choisissant parmi les polyesters au méthacrylate de méthyle, plutôt qu'au styrène, et en ajustant les indices de réfraction, un stratifié polyester-fibres de verre peut avoir une certaine transparence.

Les caractéristiques peuvent dépendre de l'épaisseur (variation de l'indice de réfraction du PMMA en fonction de l'épaisseur).

Certains polymères sous forme de film transparent sont utilisés en complément du verre pour améliorer la tenue au choc (verre feuilleté de pare-brise automobile).

Il existe des plastiques à propriété optique particulière, dont l'indice de réfraction ou la coloration change en présence d'un champ électrique, par modification de l'intensité lumineuse (par exemple, verre de lunette protecteur du soleil), par changement de température ou par application d'une sollicitation mécanique.

3. Techniques de fabrication

La principale méthode utilisée pour les polymères est le moulage, c'est-à-dire le remplissage d'un volume (moule fermé) ou la dépose sur une surface (moule ouvert) avec une matière à l'état plus ou moins visqueux qui durcit en place, par refroidissement (thermoplastique) ou par réaction chimique (thermodurcissable). La matière mise en œuvre dans ces conditions est celle que l'on peut acheter dans le commerce, qui a déjà fait l'objet d'une transformation, synthèse chimique, à partir de divers ingrédients de départ.

On peut aussi pratiquer l'usinage comme pour les métaux en prenant soin de régler les paramètres spécifiquement pour chaque nature de famille de plastiques, *mais c'est une opération à éviter au maximum* ; pour les grandes séries, il est toujours plus économique d'obtenir la pièce finie directement par moulage.

Le terme *moulage* regroupe de nombreuses technologies et variantes qu'il est difficile de classer suivant des critères limitatifs. Dans ce texte, les techniques ont été classées par nature de matériaux : thermoplastiques ou/et thermodurcissables, incluant ceux chargés et renforcés de fibres courtes et matériaux composites (§ 1.2), sans que ce classement soit exclusif.

Dans chaque paragraphe, un classement est fait suivant la série de fabrication (petite série inférieure à 1 000 pièces, moyenne série entre 1 000 et 5 000 pièces et grande série au-delà), critère subjectif établi en fonction des applications les plus courantes.

3.1 Moulage

Se reporter aux articles spécialisés, rubrique Procédés de mise en œuvre dans le traité Plastiques et Composites.

Le tableau 9 regroupe, suivant la série de fabrication, les différents procédés de moulage des plastiques et des composites, en donnant pour chacun le schéma de principe du procédé.

3.2 Usinage

■ Cas des plastiques

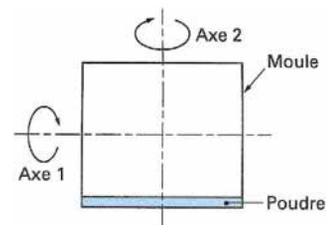
L'usinage conventionnel dit parfois *par enlèvement* de copeaux, doit être fait en tenant compte des problèmes suivants pour les matières plastiques :

Tableau 9 – Différents procédés de moulage des plastiques et des composites

PLASTIQUES – Petites et moyennes séries

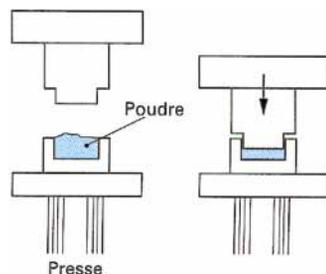
● **Rotomoulage** : la matière thermoplastique en poudre est placée dans un moule fermé que l'on chauffe, en rotation autour de deux axes perpendiculaires. Elle se répartit uniformément sur la surface du moule sous l'effet de la rotation et durcit ensuite par refroidissement du moule.

Matériau : thermoplastiques



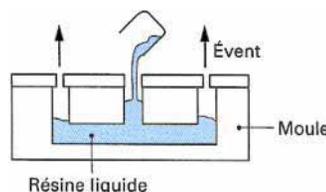
● **Frittage** : une forme est obtenue par compression d'une poudre portée à une température supérieure à celle correspondant au point de fusion pâteuse. Une auto-diffusion grain à grain permet d'homogénéiser la poudre. La forme ainsi obtenue peut être reconformée par forgeage à chaud ou usinée.

Matériau : thermoplastiques



● **Coulée** : une résine liquide (polyester ou époxyde) est coulée dans un moule. Un catalyseur, la chaleur (ou les deux à la fois) provoquent le durcissement de la résine.

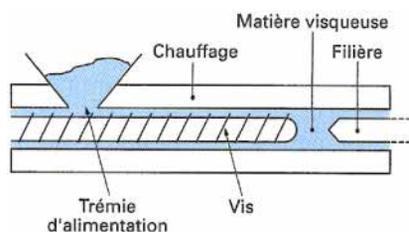
Matériau : thermodurcissables et certains acryliques (PMMA)



PLASTIQUES – Grandes séries

● **Extrusion** : la matière en granulés est introduite dans une trémie d'alimentation, puis transportée par l'intermédiaire d'une vis sans fin dans un cylindre chauffant et poussée à travers une filière qui lui donne sa forme finale (profilés, films et plaques, revêtement de fils et câbles, tuyaux, etc.). On peut extruder plusieurs matières en séquence pour aboutir à un profilé multicouche (co-extrusion).

Matériau : thermoplastiques et thermodurcissables



● **Extrusion – gonflage** : extrusion d'un film par une filière annulaire, et soufflage d'air sortant du centre de la filière. Le film est ainsi étiré jusqu'à obtention de l'épaisseur désirée. La gaine formée peut être fendue longitudinalement pour la production de feuilles.

Matériau : thermoplastiques

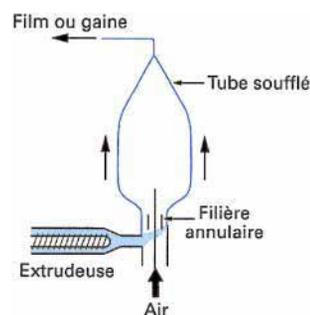
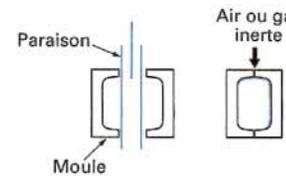


Tableau 9 – Différents procédés de moulage des plastiques et des composites (suite)

● **Extrusion – soufflage** : une extrudeuse produit un tube (ou *paraison*) sur lequel vient se refermer un moule. De l'air (ou un gaz inerte) est injecté dans la paraison qui prend la forme du moule.

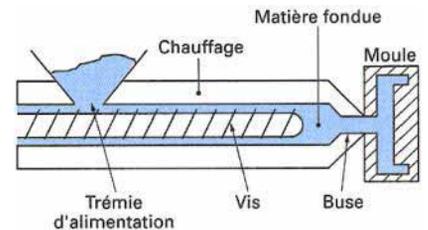
Variante injection-soufflage : une préforme injectée sur une presse à injection classique est transférée dans un moule où elle prend sa forme définitive par soufflage.

Matériau : thermoplastiques



● **Injection** : la matière en granules est plastifiée dans un cylindre, véhiculée à l'aide d'une vis puis injectée sous haute pression par un mouvement de translation de la vis dans un moule fermé et relativement froid où elle se solidifie. La pièce est éjectée après ouverture du moule. Ce procédé est utilisé pour les thermoplastiques, ceux renforcés de fibres courtes, allégés et certains thermodurcissables.

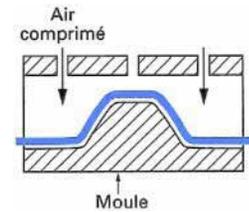
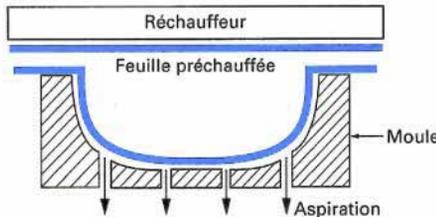
Matériau : thermoplastiques et thermodurcissables



● **Thermoformage (sous vide ou pression)** : une feuille préchauffée jusqu'à son ramollissement est fixée sur un moule et un vide est créé entre la feuille et le moule. La dépression permet à la feuille de prendre la forme du moule.

Variante sous pression : la feuille est plaquée contre la paroi d'un moule fermé par une pression d'air. Le formage peut être fait à l'aide d'un poinçon mécanique ou par une combinaison séquentielle ou non, des effets « dépression, pression, poinçon ».

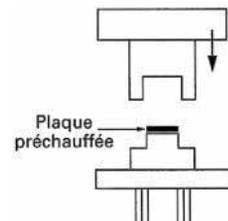
Matériau : thermoplastiques



● **Estampage** : découpage d'une préforme en plaque, puis chauffage de celle-ci jusqu'au ramollissement et mise en forme entre deux matrices.

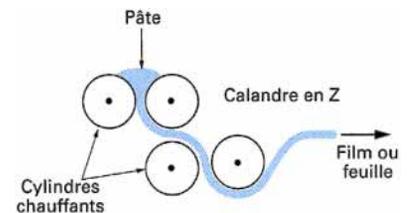
La variante TRE (Thermoplastique Renforcé Estampable) est renforcée de nappes de fibres de verre longues, tissées ou non.

Matériau : thermoplastiques



● **Calandrage** : fabrication de feuille (ou film) par passage de la matière (pâte) entre les cylindres chauffés d'une calandre, jusqu'à obtention de l'épaisseur désirée. Le procédé permet également l'enduction ou le doublage de supports (complexes laminés plastiques, tissus enduits, etc.).

Matériau : thermoplastiques et thermodurcissables



● **Compression** : une résine partiellement polymérisée (poudre ou pastille) est placée dans la cavité d'un moule ouvert et chauffé. Après fermeture, une pression élevée est appliquée. La chaleur complète la polymérisation.

Matériau : thermodurcissables

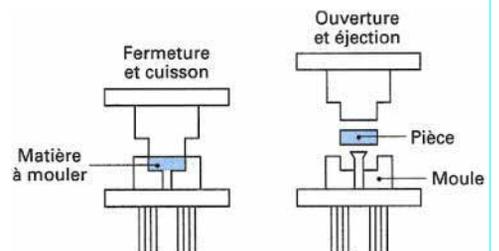
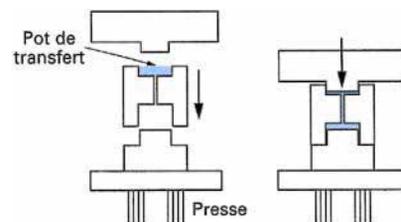


Tableau 9 – Différents procédés de moulage des plastiques et des composites (suite)

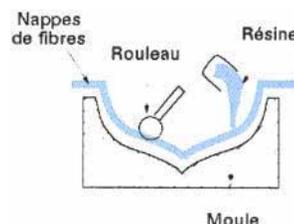
● **Transfert** : la matière (poudre ou pastille) est préchauffée dans une chambre de transfert située à l'extérieur du moule jusqu'à plastification. Elle est ensuite forcée sous pression à travers une buse dans un moule fermé où elle se polymérise.

Matériau : thermodurcissables



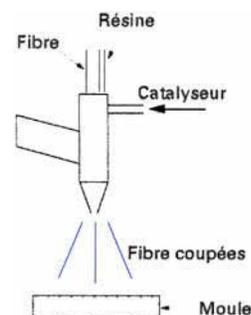
COMPOSITES – Petites séries

● **Moulage au contact** : une couche de surface (*gel-coat* renforcé ou non d'une nappe de fibres) est placée sur un moule enduit d'un agent de démoulage. Des couches de renforts (mat, tissu) sont disposées successivement sur le moule ; chaque couche est imprégnée de résine catalysée jusqu'à obtention de l'épaisseur désirée.



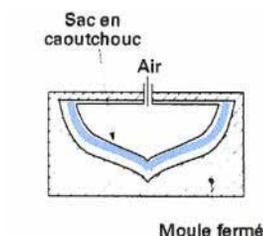
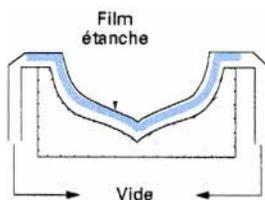
● **Projection simultanée** : projection simultanée sur un moule de fibres coupées et de résine catalysée à l'aide d'un pistolet.

Variante : projection de résine sur des empilements de tissus ou mats. Combinaison avec le procédé au contact : alternance de nappes de fibres imprégnées moulées au contact et projetées.



● **Moulage au sac (sous vide ou pression)** : le renfort et la résine sont appliqués sur un moule. Une feuille étanche est étendue sur le moulage et un vide est créé entre la feuille et le moule, favorisant ainsi l'imprégnation.

Variante sous pression : une pression est appliquée sur le moulage. La combinaison vide et pression est également possible.



● **Moulage par drapage** : dépose sur un moule de nappes de fibres préimprégnées recouvertes de nappes de moulage diverses (tissu à délaminer, tissu de drainage d'air, film étanche, etc.), puis polymérisation contrôlée en autoclave (technique *aéronautique*).

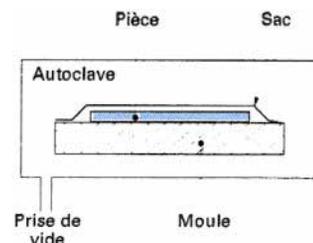
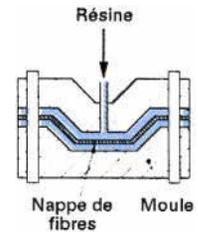


Tableau 9 – Différents procédés de moulage des plastiques et des composites (suite)

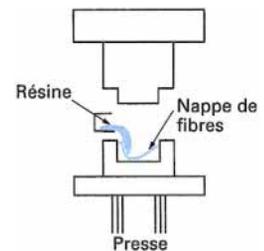
COMPOSITES – Moyennes séries

● **Moulage par injection de résine RTM (Resin Transfer Molding)** : une nappe de fibres (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression (< 10 bar). La résine peut être introduite dans le moule par aspiration à l'aide du vide (combinaison pression et vide possible).

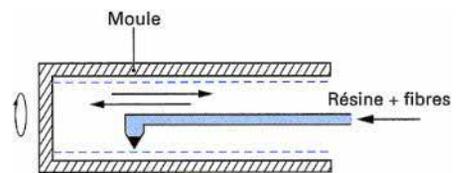


● **Moulage à la presse voie humide** : le renfort est placé dans un moule et la résine catalysée versée sur le renfort. L'ensemble est mis sous presse. Le durcissement de la résine est provoqué par la chaleur et la pression.

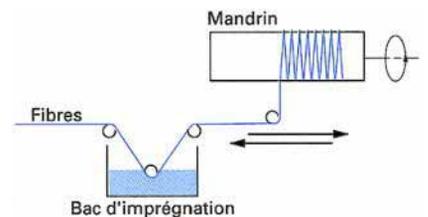
Variante : moulage à la préforme. Un mat de fibres est préalablement mis en forme et placé dans le moule (les fibres sont maintenues par un liant).



● **Centrifugation** : le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse.



● **Enroulement filamentaire** : une nappe de fibres (ruban ou mèche) est imprégnée de résine et enroulée sous tension sur un mandrin tournant. L'ensemble est ensuite mis en étuve pour polymérisation de la résine (variante thermoplastique à partir d'un ruban préchauffé qui se refroidit à la dépose).



COMPOSITES – Grandes séries

● **Moulage à la presse voie sèche SMC (Sheet Moulding Compound)** : moulage sous presse à chaud, de préimprégné SMC (*Sheet Moulding Compound*) en nappes prédécoupées, constitué de renfort (par exemple, 20-30 % de mat de verre) imprégné par une résine chargée, catalysée et inhibée (l'inhibiteur est détruit par la chaleur du moule).

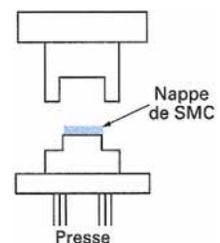


Tableau 9 – Différents procédés de moulage des plastiques et des composites (suite)

● **Moulage à la presse voie sèche BMC** : moulage sous presse à chaud, de préimprégné BMC (*Bulk Moulding Compound*) en vrac, constitué de renfort (fibres de verre coupées) imprégné par une résine chargée, catalysée et inhibée (l'inhibiteur est détruit par la chaleur du moule). Ce type de demi-produit peut également être mis en œuvre par injection haute pression.

● **Moulage par injection et réaction RIM** (*Reaction Injection Moulding*) : des composants réactifs sont injectés dans le moule par l'intermédiaire d'une tête de mélange (application polyuréthane mais possible aussi avec d'autres matières, polyamide au caprolactame notamment).

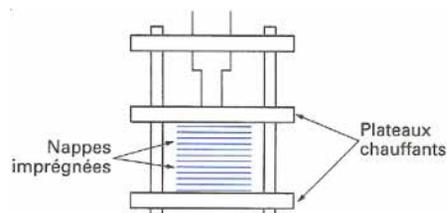
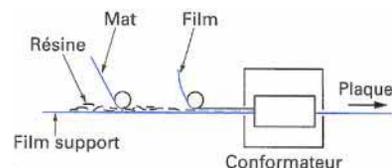
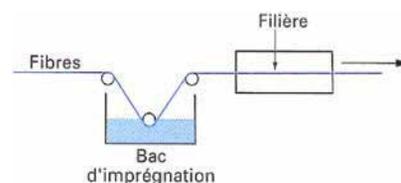
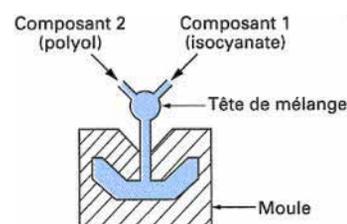
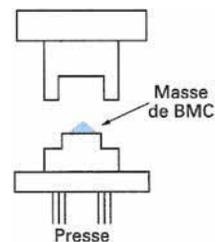
Variante RRIM (*Reinforced RIM*) : un composant est renforcé de fibres courtes.

Variante SRIM (*Structural RIM*) : une nappe de fibres (mat ou tissu) a préalablement été déposée dans le moule.

● **Pultrusion** : des tissus ou des mèches de fibres sont imprégnés de résine puis tirés à travers une filière chauffée où la résine polymérise.

● **Stratification en continu** : une nappe de fibres (tissu, mat) est imprégnée de résine et pressée entre deux séries de rouleaux dont la géométrie peut conduire à des formes non planes (plaques ondulées).

● **Pressage entre plateaux chauffants de stratifiés industriels** : des feuilles (mat ou tissu de verre, lamelles de bois, papier bakélisé, etc.) imprégnées de résine sont empilées entre les plateaux chauffants d'une presse. La chaleur et la pression provoquent le durcissement de la résine (phénolique, mélamine, époxyde, etc.).



— **souplesse** : les plastiques sont beaucoup plus souples que les aciers, ce dont il faut tenir compte au serrage sur la machine et lors de l'attaque par l'outil qui doit couper et non pas repousser la matière ;

— **tenue thermique** : il ne faut pas que l'échauffement dû à l'usinage élève la température du matériau de telle sorte qu'il commence à se ramollir (60-70 °C pour le polystyrène et le polyéthylène par exemple) ;

— **tolérance** : il est difficile, donc coûteux, de prévoir des tolérances serrées d'usinage. Les plastiques sont isolants thermiques et ont un coefficient de dilatation thermique souvent élevé, deux

paramètres qui vont dans le sens d'une déformation importante à l'usinage et imposent de mesurer les cotes après retour à la température ambiante.

Le caractère isolant des plastiques crée parfois des charges électrostatiques qui attirent les copeaux sur la surface de la pièce, ce qui crée parfois des bourrages (l'usinage des polyéthylènes et des polyamides non chargés crée un copeau unique qui ne se fragmente pas et risque de s'enrouler autour de l'outil). Un jet d'air comprimé permet de repousser les copeaux et de refroidir la pièce en même temps.

Il est conseillé de faire des essais préliminaires à partir des recommandations générales suivantes : outil très bien affûté, avance faible et vitesse de coupe rapide.

■ Cas des composites et structures sandwichs

La difficulté est d'avoir à usiner en même temps des matériaux très différents : polymère, fibre, mousse, nid d'abeille, etc. Les outils à tranchant en carbure, voire des outils diamantés, sont nécessaires avec des vitesses de coupe très rapides. Pour ces matériaux, le laser et le jet d'eau haute pression se sont développés mais ne sont utilisables, dans l'état actuel de la technologie, que pour la découpe et le perçage traversant. L'usinage de stratifiés à base de fibre d'aramide (*Kevlar* de Dupont de Nemours) pose des problèmes très difficiles nécessitant des outils spéciaux : il est conseillé avec ce matériau de concevoir la pièce en prévoyant un usinage minimal voire sans usinage si possible.

3.3 Assemblage

■ Boulonnage, vissage ou rivetage

Ces technologies sont démontables, *sécurisantes*, d'une mise en œuvre relativement simple, mais il y a nécessité d'un perçage d'où des concentrations de contraintes au bord du trou, et il ne faut pas oublier la faible tenue mécanique des filetages et taraudages dans les matières plastiques et composites (faible tenue au cisaillement), bien qu'il existe une gamme de vis plastique (nylon en particulier) qui peut répondre à de nombreuses applications. C'est pourquoi on met en place bien souvent des inserts métalliques filetés ou taraudés dans les matériaux.

■ Collage

Le principal inconvénient de cette technique est l'absence actuelle de moyens de contrôle non destructifs permettant de s'assurer d'une durée de vie adéquate et une connaissance encore insuffisante des phénomènes d'adhésion.

Les avantages sont : *légèreté, étanchéité, tenue à la fatigue, isolations électrique et thermique, esthétique, amortissement des vibrations, possibilité de positionnement au moment de l'assemblage*. Un bon choix d'adhésif compatible (la plupart des colles sont des polymères : époxyde, acrylique, polyuréthane, silicone, etc.) et une mise en œuvre réalisée dans les règles de l'art (traitement de surface,

application et durcissement de l'adhésif) sont les conditions impératives d'un bon collage.

■ Soudage des plastiques

Les polymères thermoplastiques peuvent être soudés contrairement aux thermodurcissables qui n'ont pas de point de fusion. Les différentes techniques de soudage sont données dans le tableau 10.

Le choix doit être fait en fonction de critères esthétiques (cordon de soudure), d'étanchéité (soudage au miroir), de rapidité (le soudage par ultrasons est le plus rapide), de la nature du polymère (les soudages des plastiques cristallins à l'air chaud sont difficiles à réaliser car ils ont un point de fusion très précis avec changement d'état brutal solide – liquide très fluide contrairement aux amorphes qui ont une plage de ramolissement assez large), etc.

Contrairement aux autres types d'assemblage, cette technique ne permet l'assemblage que de thermoplastiques entre eux et le plus souvent de même nature.

■ Encliquetage, emmanchement

La souplesse d'une grande partie des polymères fait qu'on utilise fréquemment ces principes :

— *encliquetage* : une forme solidaire de la pièce (ergot, cliquet, etc.) est légèrement déformée pour être introduite dans un logement prévu dans l'autre pièce de manière à assurer une liaison par blocage mécanique (rapide à mettre en œuvre, peut être démontable ou non selon la géométrie) ;

— *emmanchement* : un effort de pression est assuré entre deux éléments pour transmettre un effort mécanique (axe de diamètre d_1 dans un alésage de diamètre d_2 avec $d_1 > d_2$). On maintient une contrainte à l'interface, donc la force de liaison diminue avec le temps (fluage des plastiques).

L'encliquetage doit être conçu de manière à ce qu'il n'y ait pas de contraintes mécaniques dans les pièces si elles ne sont pas sollicitées : il n'y a des efforts que si l'on cherche à les désassembler. Le dimensionnement est prévu pour qu'il n'y ait pas de rupture lors de la mise en place de l'assemblage (déformation de l'ergot, par exemple). Alors que pour l'emmanchement, la liaison est due à des efforts de contact entre les deux pièces et son dimensionnement doit prendre en compte le fluage du plastique : au stockage, le matériau peut évoluer à cause de ces sollicitations constantes.

Tableau 10 – Principales techniques de soudage des plastiques

Technique	Principe	Utilisation
Soudage au gaz chaud	Jet de gaz chaud et baguette d'apport pour souder deux éléments de même nature.	Procédé comparable au soudage au chalumeau pour des tôles métalliques, pour de grandes pièces (plusieurs minutes).
Soudage par friction	Frottement (rotation ou vibration) créant l'échauffement nécessaire.	Procédé rapide (durée type : 10 s), mais nécessité de translation de 1 à 2 mm entre les deux éléments à souder.
Soudage au miroir (élément chauffant)	Élément chauffant mis à l'interface puis retiré avant mise en contact.	Procédé rapide (quelques secondes), mais ne convient pas au plastique qui <i>file</i> en fondant.
Soudage par ultrasons	Onde ultrasonore créant un échauffement moléculaire à l'interface.	Procédé très rapide (1 s) mais limité en longueur de soudure par le générateur et nécessitant un plastique suffisamment rigide pour transmettre l'onde vibrante jusqu'à l'interface.
Soudage haute fréquence	Décharge de condensateur créant l'énergie nécessaire au soudage.	Procédé très rapide (quelques secondes) pour les épaisseurs minces (films et feuilles).
Soudage électromagnétique	Champ inductif appliqué à l'interface dans lequel a été mis un élément ferromagnétique.	Pour des soudages de petites longueurs sur des pièces positionnées immobiles (en quelques secondes), mais les particules ou éléments ferromagnétiques restent dans le produit.

3.4 Finition

■ Revêtement organique (peinture) et métallisation

Pour un effet esthétique (couleur, brillance), une protection (anti-UV, anti-corrosion), une homogénéisation d'aspect entre plusieurs éléments d'un ensemble (des pièces moulées avec la même nature de plastique pigmenté dans la masse peuvent avoir des couleurs légèrement différentes selon leur géométrie, ce qui peut nécessiter, en cas de recherche esthétique poussée, de peindre l'ensemble assemblé), etc. On peut être amené à appliquer un revêtement organique. Le choix de la nature de peinture et sa mise en œuvre doivent être adaptés au support plastique (température de cuisson de peinture compatible, traitement de surface pour une bonne adhésion de la peinture, etc.). Cependant, il ne faut pas oublier que les plastiques peuvent se pigmenter dans la masse, que les composites peuvent être moulés avec un *gel-coat* (revêtement en résine pigmentée mise sur la surface du moule avant moulage), ce qui coûte généralement moins cher que de peindre *a posteriori* une pièce moulée.

De même, la métallisation de pièces plastiques peut résulter d'un besoin de blindage magnétique, d'une surface optique réfléchissante, d'un aspect esthétique, etc. Les procédés de métallisation sous vide sont de plus en plus souvent utilisés pour les pièces plastiques.

■ Marquage et décoration

Ce sont deux types de finalité qui peuvent faire appel aux mêmes techniques de mise en œuvre : il s'agit de faire en sorte qu'il y ait une marque, un repère, un décor sur une pièce finie, dans le but soit d'identifier la pièce (nature du matériau, date de fabrication, code à barres, etc.) pour en assurer la traçabilité, soit de lui donner une décoration spécifique. Le marquage peut être réalisé :

- au moulage : le marquage du moule est reproduit sur la pièce, en négatif (un marquage en creux dans le moule est en relief sur la pièce). Cas particulier de la dépose d'un insert (plaque signalétique, film décor) dans le moule de manière à ce qu'il soit visible par affleurement ou transparence sur la pièce (décor sur planche à voile en stratifié par exemple) ;
- sur machine-outil : gravure mécanique (usinage), par estampage, etc. ;
- par gravure thermique, par laser, gravure chimique, etc. ;
- par dépôt d'encre en sérigraphie, au pochoir, au tampon, flexographie, etc.

3.5 Recyclage

Si les plastiques et composites allègent les produits (économie d'énergie), autorisent des formes complexes par moulage avec des intégrations de fonctions, assurent l'isolation thermique et phonique, etc., cela crée par contre des déchets différents à éliminer. Les polymères sont recyclables avec un pouvoir énergétique favorable mais la difficulté provient surtout du tri nécessaire. Pour cela, le marquage des plastiques par des abréviations normalisées (PET au fond des bouteilles d'eau minérale ou PS au fond des gobelets de machines à café, par exemple) devient obligatoire.

Plusieurs possibilités de recyclage existent et sont étudiées de manière à en optimiser le coût, depuis la mise en décharge, le broyage et le recompoundage, ou l'incinération avec récupération d'énergie, la pyrolyse avec récupération de monomères ou la valorisation chimique aboutissant à d'autres monomères. Les thermoplastiques se prêtent bien à un recyclage par broyage et réincorporation dans de la matière vierge à raison de 10 à 30 % (taux de rebroyés) avec une très légère baisse de caractéristiques mécaniques du produit ainsi reconstitué : la matière est donc réellement réutilisée comme telle. Par contre, les déchets thermodurcissables

(polyester par exemple) ne peuvent qu'être broyés et réincorporés en petites quantités comme charge de remplissage dans la matière nouvelle, mais ces déchets sont, pour l'instant, plus chers que les poudres de carbonate de calcium qu'ils remplacent.

Dans le domaine automobile où le recyclage pose un problème de plus en plus important compte-tenu des quantités de matières, ce problème aura tendance à limiter les variétés de polymères choisis dans la conception d'un produit donné afin de prévoir une plus grande facilité de les récupérer après usage.

4. Démarche des calculs de matériaux et pièces

4.1 Cas des plastiques

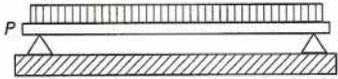
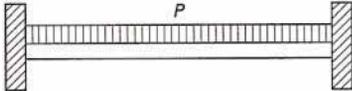
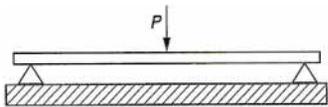
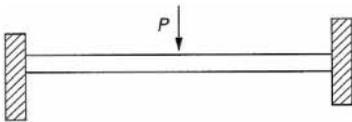
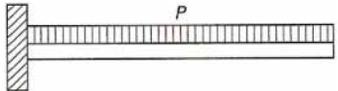
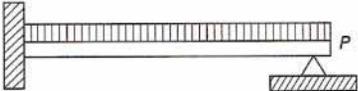
Les polymères renforcés de fibres courtes peuvent avoir des comportements anisotropiques dus aux orientations préférentielles des fibres lors de la mise en œuvre : c'est le cas de plastique injecté dont la fluidité à l'état fondu permet l'orientation des fibres selon le sens d'écoulement dans le moule. Il peut y avoir aussi une mauvaise répartition de fibres due à un cheminement complexe de la matière (passage par de petites épaisseurs par exemple). Il y a donc lieu de bien tenir compte de ces phénomènes car les propriétés mécaniques dépendent directement du taux et de l'orientation des fibres. De plus, les polymères, surtout thermoplastiques, et parmi ceux-ci, particulièrement les nuances qui ne sont pas renforcées ou chargées, sont sensibles au fluage (§ 2.2.1). Par exemple, une éprouvette soumise à un effort de traction constant s'allonge continuellement au cours du temps. Pour le dimensionnement, il ne faut donc pas prendre en compte le module d'élasticité que l'on mesure par un essai mécanique instantané (*module statique*) mais le module correspondant au niveau de contrainte et à la durée d'application d'effort prévus (*module de fluage*). Les documentations techniques des producteurs donnent souvent les caractéristiques de fluage de leurs matériaux, ce qui permet de choisir la valeur du module correspondant à l'application étudiée, sans oublier de tenir compte de la température de fonctionnement.

En tenant compte de ces remarques, on peut utiliser pour le prédimensionnement les formules classiques de résistances des matériaux (tableau 11). Ces formules sont directement applicables si la géométrie de la pièce est simple (tube, profilé, enveloppe simple sous pression interne, etc.). Mais, on peut aussi évaluer de manière approchée une contrainte locale dans une pièce plus complexe (paroi plane d'un carter complexe considérée comme une plaque encastrée, etc.).

Le moulage par injection est la technique la plus répandue avec l'extrusion. De ce fait, des **logiciels** sont apparus dans le commerce (cf. liste dans *Pour en savoir plus* [Doc. B 5 170], en fin d'article) pour simuler la mise en œuvre sans avoir à faire des essais préliminaires coûteux car nécessitant la fabrication d'outillage haute pression et température, et la disponibilité d'une machine de production. Ces logiciels de rhéologie fonctionnent à partir d'une modélisation géométrique de la pièce, définie à partir de surfaces ou volumes élémentaires juxtaposés. Cette même modélisation, opération assez longue, peut servir à un calcul par éléments finis de la pièce, ce qui fait que cette méthode de calcul est de plus en plus souvent utilisée, d'autant plus avec le développement de la micro-informatique et l'apparition d'ordinateurs à la fois plus petits et plus puissants.

La remarque préliminaire concernant le fluage du plastique auquel il faut ajouter le fait que ces matériaux sont d'une grande souplesse par rapport aux aciers ou alliages d'aluminium doit toujours être à l'esprit de l'opérateur qui fait une analyse par éléments finis de pièces plastiques (module de fluage, assez grandes déformations).

Tableau 11 – Principales formules classiques de RdM pour poutres

Chargement		K_1	K_2
<p>Simple appuis Charge répartie</p> 		5/384	1/8
<p>Encastrement Charge répartie</p> 		1/384	1/24
<p>Simple appuis Charge locale centrée</p> 		1/48	1/4
<p>Encastrement Charge locale centrée</p> 		1/192	1/8
<p>Un bord encasturé Charge répartie</p> 		1/8	1/2
<p>Un bord encasturé Charge locale (bord libre)</p> 		1/3	1
<p>Encastrement et Appui Charge répartie</p> 		1/187	9/128

P chargement total
 Flèche maximale : $f = K_1 PL^3/EI$
 Contrainte maximale : $\sigma_{max} = K_2 PL/I^0$
 avec E module d'élasticité du matériau, I moment d'inertie de la section transversale, L longueur de poutre et $I^0 = I/v$, v étant la demi-épaisseur de la poutre.

4.2 Cas des composites

Nota : se reporter à l'article *Structures en matériaux composites* [B 5 080] dans ce traité.

Les matériaux composites de type stratifié à fibres longues orientées anisotropes ont des propriétés mécaniques différentes selon l'orientation considérée. Cela peut constituer un avantage car on met la quantité de fibres, juste nécessaire, dans le sens de l'effort, mais il faut vérifier que dans le sens perpendiculaire, il y a bien le minimum

de tenue mécanique assurant la cohésion de l'ensemble. Le rapport des tenues mécaniques entre le sens longitudinal et le sens perpendiculaire aux fibres pour un stratifié constitué d'une nappe de fibres parallèles à une seule direction (stratifié unidirectionnel UD) peut dépasser 20. On peut, par exemple, avoir une résistance de 2 000 MPa dans le sens des fibres et de moins de 100 MPa dans le sens perpendiculaire.

Les formules préliminaires pour évaluer les caractéristiques approchées du matériau que l'on crée en associant des fibres et une résine sont les suivantes. Avec E_f , τ_f , σ_f , respectivement module,

taux volumique et résistance à la rupture de la fibre, et E_m , τ_m , σ_m pour la résine [indice m pour matrice] dans le cas d'un **stratifié UD** (fibres tendues, parallèles à une seule direction), la loi des mélanges donne les caractéristiques du matériau dans le sens des fibres :

$$E_{UD} = E_f \tau_f + E_m \tau_m$$

$$\sigma_{UD} = \sigma_f \tau_f + \sigma_m \tau_m$$

Avec les résines et les fibres habituellement utilisées, on peut considérer $E_{UD} \approx E_f \tau_f$ et $\sigma_{UD} \approx \sigma_f \tau_f$.

Pour un **stratifié tissé**, on peut considérer qu'il s'agit de deux nappes superposées de fibres unidirectionnelles orientées à 90° l'une par rapport à l'autre. Le matériau global a alors la moitié des caractéristiques obtenues par les formules ci-dessus : $E_{tissu} = E_{UD}/2$ et $\sigma_{tissu} = \sigma_{UD}/2$ dans le sens des fibres du tissu.

Dans le cas d'une **structure tubulaire**, par exemple un tube fabriqué par enroulement filamentaire de fibres faisant un angle α par rapport à l'axe du tube, on peut évaluer les modules et contraintes du matériau selon les deux directions axiale (0) et perpendiculaire (90) à l'axe avec les formules suivantes :

$$E_0 = E_f \tau_f \cos^4 \alpha + E_m \tau_m$$

$$E_{90} = E_f \tau_f \sin^4 \alpha + E_m \tau_m$$

$$\sigma_0 = \sigma_f \tau_f \cos^2 \alpha + \sigma_m \tau_m$$

$$\sigma_{90} = \sigma_f \tau_f \sin^2 \alpha + \sigma_m \tau_m$$

Dans ce cas, il ne faut pas négliger la contribution de la résine car, selon l'orientation des fibres, elle peut constituer seule la tenue mécanique. Par exemple, si les fibres sont enroulées avec un angle voisin de 90° (on juxtapose la mèche à celle déposée au tour précédent du mandrin), on a $\alpha = 90^\circ$, donc $\sin \alpha = 1$ et $\cos \alpha = 0$, d'où $E_0 = E_m \tau_m$ et $\sigma_0 = \sigma_m \tau_m$; par contre, pour la direction perpendiculaire à l'axe (sens radial), on peut ne retenir que la contribution de la fibre et prendre $E_{90} = E_f \tau_f$ et $\sigma_{90} = \sigma_f \tau_f$.

Il ne faut pas oublier que, dans ces formules, le *taux volumique* est à prendre en compte et non pas le *taux massique* que l'on a plus souvent l'habitude de connaître car il est plus facile à mesurer et c'est celui qui figure dans les documentations commerciales. Avec τ_f taux volumique de fibres, M_f et M_m taux massiques de fibres et de résine (généralement $M_f + M_m = 1$, sauf s'il y a aussi des charges), ρ_f et ρ_m masses volumiques de la fibre et de la résine :

$$\tau_f = \frac{M_f / \rho_f}{(M_f / \rho_f) + (M_m / \rho_m)}$$

À partir des valeurs de E et σ , on peut utiliser les formules de Résistance des Matériaux classiques pour faire du prédimensionnement.

Pour une approche plus précise, il existe des logiciels permettant de calculer sur micro-ordinateur les caractéristiques du matériau à partir de sa description (nature et taux de fibres, de résine, orientation des fibres, etc.). On peut aussi envisager une analyse par la méthode des éléments finis sur la base d'une géométrie précise de la pièce et d'une connaissance de l'intensité des efforts appliqués et de leurs conditions d'applications.

Devant le développement des matériaux composites *anisotropes*, des logiciels spécifiques de calcul par éléments finis ont été validés qui permettent d'introduire non plus un seul module d'élasticité par exemple pour décrire le matériau mais toute une matrice de rigidité tenant compte des caractéristiques dans les deux directions. Géné-

ralement, au lieu de décrire la pièce à partir de mailles élémentaires de seulement trois éléments, il est nécessaire d'introduire neuf éléments par maille pour tenir compte de cette anisotropie. Une liste de logiciels adaptés est proposée en fin d'article.

4.3 Cas des structures sandwich

Nota : se reporter à l'article *Structures en matériaux composites* [B 5 080] dans ce traité.

Les structures sandwich sont le plus souvent constituées de panneaux plans à âme en bois, plastique, métal, allégée, alvéolaire, et protégée de part et d'autre par des peaux composites ou feuillards métalliques d'épaisseurs non nécessairement égales. Le rôle de l'âme est de maintenir l'écartement entre les deux peaux (solllicitation en cisaillement et compression), ce qui donne la rigidité d'ensemble.

Un prédimensionnement peut être fait à partir de la définition de la raideur D en flexion, équivalente au produit EI d'une plaque simple, et donnée par la formule suivante :

$$D = (E_p b e_p^3 / 6) + (E_p b e_p h^2 / 2) + (E_a b e_a^3 / 12)$$

avec E_p , E_a modules d'élasticité, respectivement des peaux et de l'âme en flexion,

h distance entre plans médians des peaux ($h = e_a + e_p$),

e_p , e_a épaisseurs des peaux et d'âme,

b largeur du panneau.

Le terme central est prépondérant pour $h/e_p \geq 10$ et $E_p/E_a \geq 20$, ce qui est le cas pour les structures sandwichs habituellement utilisées. Par conséquent, on peut choisir la formule simplifiée suivante :

$$D = E_p b e_p h^2 / 2$$

Les contraintes en traction ou compression pour une structure soumise à un moment de flexion M sont :

dans les peaux : $\sigma = M E_p h / 2 D$

dans l'âme : $\sigma = M E_a e_a / 2 D$

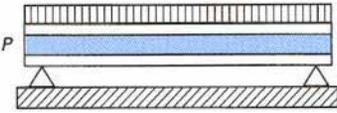
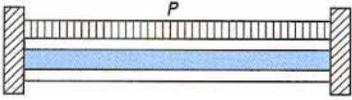
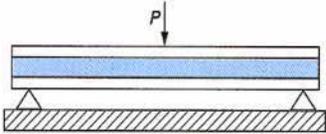
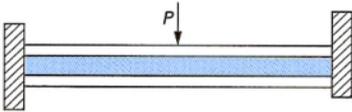
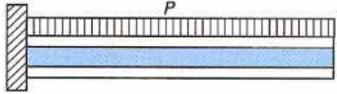
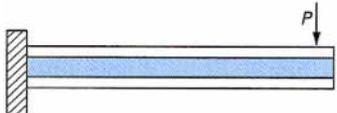
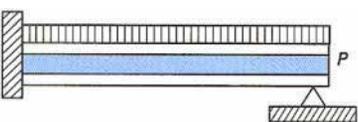
Il est préférable que la structure sandwich ait deux peaux d'épaisseur identique, mais pour deux peaux différentes, les formules ci-dessus sont utilisables en remplaçant e_p par une épaisseur équivalente moyenne.

On peut ensuite appliquer les formules de Résistance des Matériaux adaptées (tableau 12) pour le prédimensionnement d'une pièce.

Enfin, après avoir défini les épaisseurs sur des critères de déformation ou tenue mécanique classique, il faut également vérifier les comportements spécifiques locaux comme la *tenue au poinçonnement* (cas d'une charge très ponctuelle qui déforme la peau et écrase localement les alvéoles de l'âme), la *délamination des peaux* (cas d'un effort de cisaillement qui crée du flambement au niveau des peaux qui se décolent de l'âme par zones).

Un calcul de structure par éléments finis peut être envisagé en décrivant le matériau comme étant constitué de plusieurs couches de caractéristiques différentes, à partir de logiciels adaptés aux matériaux composites (cf. liste en fin d'article).

Tableau 12 – Principales formules de RdM pour structures sandwich

Chargement		T	M	K_f	K_s
Simples appuis Charge répartie		$P/2$	$PL/8$	$5/384$	$1/8$
Encastremets Charge répartie		$P/2$	$PL/12$	$1/384$	$1/8$
Simples appuis Charge locale centrée		$P/2$	$PL/4$	$4/192$	$1/4$
Encastremets Charge locale centrée		$P/2$	$PL/8$	$1/392$	$1/4$
Un bord encastré Charge répartie		P	$PL/2$	$1/8$	$1/2$
Un bord encastré Charge locale (bord libre)		P	PL	$1/3$	1
Encastrement et Appui Charge répartie		$5P/8$	$PL/8$	$1/185$	$1/14,2$

M moment de flexion maximal

P chargement total

T force de cisaillement maximale

Flèche maximale : $f = K_f PL^3/D + K_s PL/(e_a + 2e_p) G_a$

avec K_f, K_s constantes de flexion et de cisaillement, L longueur du panneau, D raideur en flexion, G_a module de cisaillement de l'âme, e_a et e_p épaisseurs de l'âme et des peaux.

5. Contrôles et essais

5.1 Essais physico-mécaniques

Les **essais normalisés** permettent de définir les caractéristiques mécaniques du matériau. On mesure sur éprouvettes les caractéristiques de rupture, d'élasticité, de dureté, etc. Ils permettent de comparer objectivement des matériaux entre eux pour faire un choix, de connaître les caractéristiques nécessaires au calcul mécanique, de contrôler des lots de matière, etc.

Le tableau **13** donne des exemples de normes ISO d'essais mécaniques pour éprouvettes en plastiques ou composites, mais l'équivalence totale entre les normes ISO et NF indiquées n'existe pas forcément.

D'autres essais caractérisent ou contrôlent la pièce et sont définis spécifiquement en fonction de l'utilisation de la pièce, comme par exemple, des essais en pression hydraulique pour des tubes ou réservoirs de stockage, des essais de flexion et choc pour des éléments de carrosserie automobile. Ils permettent de vérifier sur prototypes la tenue de la pièce dimensionnée par les calculs et peuvent être utilisés pour contrôler un lot de fabrication par prélèvement de pièce. Dans certains cas seulement, la procédure d'essais est normalisée, comme par exemple pour des tubes (tableau **14**).

5.2 Analyses physico-chimiques

Les **méthodes d'analyse** permettent de connaître la nature du matériau ou de ses constituants, d'analyser son comportement.

■ Méthodes spectroscopiques

Elles consistent à soumettre un échantillon de matière à une excitation électromagnétique (rayonnement) et à enregistrer le spectre des fréquences absorbées, émises ou réfléchies, selon la méthode employée. Dans un polymère, chaque liaison chimique peut vibrer selon certains modes se traduisant par un pic à une fréquence caractéristique en spectroscopie infrarouge. On peut ainsi déterminer la nature d'un polymère en fonction de la présence des liaisons qui le caractérisent (C—H, C—C, C=O, O—H, etc.). En pratique, on compare le spectre obtenu à une banque de données de spectres de polymères. On peut aussi détecter la présence d'additifs (en quantité supérieure à 1 %) si le spectre de l'additif ne se superpose pas à celui du polymère.

■ Méthodes thermiques

Elles consistent à analyser le comportement du matériau soumis à une variation de température.

- L'*analyse thermogravimétrique* (ATG) mesure l'évolution de la masse à température croissante. Une brusque variation à une température caractéristique informe de la présence d'un constituant qui se transforme en gaz, etc.

- L'*analyse calorimétrique* (DSC et ATD) : la DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) est la mesure de la variation d'enthalpie d'un échantillon placé dans un calorimètre et l'ATD (*Analyse Thermique Différentielle*) consiste à mesurer la différence de température entre l'échantillon et une référence introduite dans le même calorimètre. On obtient des courbes comportant des points caractéristiques (inflexion, maximum ou minimum) de la fusion, de la transition vitreuse, de la dégradation, de la polymérisation du polymère.

Tableau 13 – Exemples de normes ISO d'essais mécaniques pour éprouvettes en plastique et composite

ISO	NF	Titre abrégé
178	T 51-001	Détermination des caractéristiques de flexion des plastiques rigides.
179	T 51-035	Détermination de la résilience Charpy des plastiques rigides.
180	T 51-911	Détermination de la résilience Izod des plastiques rigides.
527	T 51-034	Détermination des caractéristiques en traction.
537	T 51-104	Essai au pendule de torsion.
604	T 51-101	Détermination des caractéristiques en compression.
844	T 56-101	Plastiques alvéolaires. Essai de compression des matériaux rigides.
899	T 51-103	Détermination du fluage en traction.
1209	T 56-102	Plastiques alvéolaires rigides. Essai de flexion.
1798	T 56-108	Matériaux alvéolaires souples. Résistance à la traction et allongement à la rupture.
1856	T 56-112	Matériaux polymères alvéolaires souples. Rémanence à la compression.
1926	T 56-103	Détermination des caractéristiques de traction des matériaux alvéolaires rigides.
3268	T 57-101	Plastiques. Matières renforcées au verre textile. Détermination des caractéristiques en traction.
3597	–	Plastiques renforcés au verre textile sous forme de joncs. Résistance à la flexion.
3605	–	Plastiques renforcés au verre textile sous forme de joncs. Résistance à la compression.
4137	T 51-018	Détermination du module d'élasticité par flexion alternée.

Tableau 14 – Exemples de normes pour essais sur tubes en plastique ou composite

ISO	Titre abrégé
2044	Raccords moulés en PVC non plastifié à joints collés. Essai à la pression hydraulique intérieure.
3127	Tube en PVC non plastifié pour transport de fluides. Résistance aux chocs extérieurs.
3501	Assemblage entre raccord et tube sous pression en polyéthylène. Essai de résistance à l'arrachement.
3503	Assemblage entre raccord et tube sous pression en polyéthylène. Étanchéité à la pression intérieure sous courbure.
3603	Raccord à bague d'étanchéité élastique (canalisation avec pression) en PVC non plastifié. Étanchéité.
3604	Raccord à bague d'étanchéité élastique en PVC non plastifié. Essai d'étanchéité sous pression externe.
7509/2	Tubes en thermodurcissable renforcé verre. Résistance à la pression interne.

■ Méthodes chromatographiques

Elles consistent à séparer les molécules en fonction de leur taille ou de leur masse par passage d'un échantillon gazeux, liquide ou en gel (GPC : *Gel Permeation Chromatography*) dans une colonne sélective. On obtient un chromatogramme avec des pics correspondants à une durée de rétention dans la colonne. On peut ainsi analyser la distribution en poids moléculaire d'un polymère puisque les chaînes vont traverser plus ou moins vite la colonne selon leur longueur.

■ Autres méthodes

- L'Analyse ThermoMécanique (TMA) enregistre la dilatation d'un polymère soumis à une élévation de température. Un changement de pente dans la courbe caractérise la transition vitreuse.

- L'analyse mécanique dynamique mesure le module d'élasticité d'un polymère dans différentes conditions mécaniques.

Il existe un nombre important de méthodes d'analyses physique et physico-chimique normalisées spécifiquement pour les polymères. Ces méthodes permettent d'analyser et d'identifier un polymère ou de définir les caractéristiques physiques comme la masse volumique ou la température de fusion.

Par **exemple** :

ISO 8995

Plastiques. Copolymère éthylène-acétate de vinyle. Dosage de l'acétate de vinyle par spectroscopie IR.

NF T 51-507

Plastiques. Mesure de la température de transition vitreuse par DSC.

5.3 Contrôles non destructifs

5.3.1 Description des procédés

Ils permettent de contrôler la bonne qualité d'une pièce fabriquée sans la détruire. Le tableau 15 donne les principales méthodes de contrôles non destructifs avec leurs avantages et leurs limites d'utilisation.

5.3.2 Contrôle qualité

L'assurance de la qualité se généralise de plus en plus dans les bureaux d'études, ateliers de fabrication ou laboratoires d'essais. Elle est définie comme étant l'ensemble des actions préétablies et systématiques nécessaires pour donner la confiance appropriée en ce qu'un produit ou service satisfera aux exigences données relatives à la qualité (norme ISO 8402). Des normes ont été créées pour rationaliser cette démarche. La norme ISO 9000 donne les lignes directrices pour la sélection et l'utilisation des normes de gestion qualité. Trois modèles ont été définis pour l'assurance de la qualité :

- ISO 9001, qui couvre toutes les procédures depuis la conception, le développement, la production, l'installation et le soutien après la vente ;

- ISO 9002, qui ne prend en compte que les phases de production, installation, essais et contrôles ;

- ISO 9003, qui est limitée aux contrôles et essais.

Une entreprise peut alors obtenir une certification, c'est-à-dire une reconnaissance de la conformité du système qualité à l'une de ces normes. La certification est délivrée par un organisme habilité. En France, l'Association française pour l'assurance de la qualité (AFAQ) prend en charge ce type de procédure qui se déroule en plusieurs étapes successives : la prise de contacts, l'instruction, l'audit puis la certification valable pour une durée de trois ans, renouvelable ensuite. L'AFNOR a édité un recueil des normes sur ce sujet, intitulé *Gérer et assurer la qualité*.

Tableau 15 – Principales méthodes de contrôles non destructifs

Méthode	Principe	Avantages	Limites d'utilisation
Inspection visuelle	Examiner la pièce à l'œil ou au microscope optique.	Rapide, peu coûteux.	Résultats subjectifs. Limité en détection de défaut.
Pesée	Mesurer la masse de la pièce.	Rapide et peu coûteux.	Contrôle global approché.
Inspection au son	Tapoter la surface et écouter les différences de sonorité (pièces collées surtout).	Exploration rapide, faible coût et facile à utiliser.	Capacité de détection limitée. Résultats subjectifs. Peut détériorer la surface.
Ressuage	Applications de produits en surface.	Simple et peu coûteux.	Ne détecte que les défauts de surface.
Interférométrie holographique	Comparer deux profils de la pièce, non contrainte et peu contrainte et noter les irrégularités de déformation	Sensible aux petits défauts, pas de contact avec les pièces.	Nécessité de déformer la zone de manière très précise sans déformation parasite.
Rayonnement infrarouge	Détection des irrégularités de réponse à un échauffement thermique.	Pas de contact avec les pièces, appareillage portable, peut se faire en fin de moulage à chaud quand la pièce refroidit.	Équipement assez coûteux. Résolution relativement faible.
Radiographie X	Photographie de la pièce.	Enregistrement sur film, niveaux énergétiques réglables.	Risque d'irradiation. Accès requis aux deux faces. Étalon requis si stratifié.
Ultrason (réflexion ou transmission)	Examiner le spectre de réponse à une onde ultrasonore.	Bonne résolution.	Immersion nécessaire. Localisation en profondeur.
Ultrason (résonance sonique)	Examiner le spectre de réponse à une onde ultrasonore.	Portable et coût modéré.	Exige un fluide de couplage.
Émission acoustique	Enregistrer les bruits émis lors d'une mise sous contrainte.	Méthode sensible.	Mise sous contrainte à faire. Nécessité d'un étalon pour chaque cas.

5.4 Analyses simples en atelier de fabrication

Des méthodes simples, parfois, permettent l'identification des polymères.

■ Examen d'aspect au pliage

Par pliage de la matière, on vérifie la fragilité ou la déformation. Les thermodurcissables ont le plus souvent une rupture fragile. Les thermoplastiques amorphes sont également fragiles, sauf ceux chargés de phases élastomériques ou de plastifiants. L'apparition d'une zone blanchâtre à la pliure peut révéler la présence de phase élastomérique (par exemple, le butadiène dans l'ABS). Les thermoplastiques cristallins sont plus souples généralement, avec une rupture du type *ductile*. La présence de charges renforçantes atténue cette particularité.

■ Examen par transparence

L'indice de réfraction peut donner une idée de la nature du plastique.

■ Mesure de la température de fusion

Un thermodurcissable ne fond pas contrairement aux thermoplastiques. Quelquefois, un taux de renfort élevé peut cacher une nature thermoplastique.

■ Identification par le comportement à la flamme (tableau 16).

■ Analyse par l'essai de Beilstein

On chauffe un fil de cuivre à la flamme jusqu'à disparition de la couleur verte, puis on touche la matière avec, comme pour l'*imprégné*, et on le remet à la flamme : si la couleur verte revient, il y a présence de chlore ou de fluor dans la matière.

■ **Identification par mesure de la densité** (si le polymère n'est pas chargé).

■ Test de solubilité

On immerge quelques décigrammes de plastique dans 5 cm³ de solvant à température ambiante. En fonction de la réaction du matériau avec deux ou trois solvants, on peut par déduction en définir la nature (tableau 17).

■ Indice de fluidité et viscosité en solution

Pour les thermoplastiques, quelques mesures simples permettent de vérifier que la mise en œuvre a été effectuée dans les bonnes conditions, ou qu'il n'y a pas un taux excessif de rebroyés dans la matière.

Pour la plupart des thermoplastiques, ceux qui ne sont pas trop fluides à l'état fondu, on peut déterminer l'*indice de fluidité à chaud* (ISO 1133/NFT 51-016) : on mesure la masse, ou le volume, de thermoplastique qui s'écoule d'une filière calibrée sous l'action d'une pression précise, pendant un temps donné à une température fixée (l'appareillage nécessaire est disponible auprès de fournisseurs de matériels de laboratoire spécifiques). En comparant, par exemple, les valeurs obtenues pour des granulés de matières fournis par le producteur et un échantillon de pièces moulées par le transformateur avec la même référence et le même lot de matière, on peut évaluer un **niveau de dégradation due aux conditions de moulage ou à une détérioration accidentelle de la matière**. En effet, une matière dont les chaînes moléculaires sont plus courtes s'écoule plus vite que la même matière avec des chaînes moléculaires plus longues. Selon le niveau de qualité, on peut admettre un écart inférieur ou égal à une valeur donnée (5 %, par exemple) entre les deux valeurs obtenues à partir de matière vierge et de matière moulée.

Tableau 16 – Identification sommaire sur le comportement à la flamme

Comportement	Couleur flamme	Odeur	Type
ni flamme, ni carbonisation			fluorés
carbonise sans brûler	jaune jaune pâle	formol formol-poisson	urée-formol mélamine
brûle mais la flamme ne s'auto-entretient pas	jaune vert clair vert clair jaune jaune jaune brillant	phénol acre caoutchouc aniline lait brûlé	phénolique PVC, PVDC néoprène résine d'aniline caséine durcie silicone
brûle	jaune base bleue jaune brillant	fruitée papier brûlé	acrylique base cellulose
combustion rapide	jaune lumineux	camphre	celluloïd
brûle, se ramollit	jaune sombre jaune fumeuse orange, flocons noirs jaune sombre, fumée noire	acétique géranium caoutchouc	PVAC isobutylène, caoutchouc butyl polystyrène et copolym. caoutchouc
goutte brûlante	base bleue sommets jaune-base bleue terne jaune sombre jaune brillant bleue	paraffine corne brûlée papier brûlé acétique rance rance	polyéthylène polyamides éthylcellulose acétate de cellulose CAB butyral vinylique

Tableau 17 – Solubilité de quelques polymères dans les solvants usuels (O soluble et N non soluble)

Nature	Eau	Acétone	Benzène	Chlorure de méthylène	Cyclohexanone	Trichloréthylène	Éther	Acétate d'éthyle	Éthanol	Méthanol	Toluène	Chloroforme	Acide acétique	Acide formique
Thermoplastiques														
ABS	N	O	O	O	-	O	O	O	N	-	O	O	O	-
Acétal	N	N	N	N	-	peu	N	N	N	-	N	N	O	-
Acétobutyrate de cellulose	N	O	O	O	-	O	N	O	O	-	O	O	peu	-
PPO	N	O	O	O	-	O	O	O	N	-	O	O	N	-
PMMA	N	O	O	O	O	peu	N	peu	N	peu	O	O	O	O
Polyamide 6-6	N	N	N	N	O	peu	N	N	N	-	N	O	peu	O
Polyamide 11	N	-	-	-	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polycarbonate	N	très	très	O	O	-	-	peu	N	-	O	O	O	-
Polyester PET	N	peu	-	O	-	-	-	peu	-	O	N	-	-	-
Polyéthylène, polypropylène	N	N	-	-	N	O	N	N	N	peu	O	peu	N	peu
Polystyrène	N	O	O	O	O	O	N	peu	N	N	O	O	N	N
Polysulfone	N	O	O	O	-	O	peu	O	peu	-	O	O	N	-
PTFE	N	N	N	-	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PVC	N	peu	-	-	O	peu	N	N	N	peu	N	N	N	N
PPS	N	N	N	N	-	N	N	N	N	-	N	N	N	-
Thermodurcissables														
Époxyde	N	N	O	O	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Polyester (1)	N	O	O	O	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Phénolique	N	N	N	N	N	non	N	N	N	N	N	N	N	N

(1) Le polyester résiste à l'acétone s'il a polymérisé à l'abri de l'air.

Les thermoplastiques très fluides à l'état fondu, comme les polyamides par exemple, sont difficilement analysables avec cette méthode. On effectue alors une mesure de l'*indice de viscosité en solution* (ISO 1628/NF T 51-019). L'indice est obtenu à partir des valeurs de viscosité déterminées par la vitesse d'écoulement dans un tube capillaire (type Ubbelohde) d'une solution thermoplastique + solvant approprié, d'une part, et du solvant pur, d'autre part. La comparaison des indices de viscosité entre deux matières identiques ayant subi un traitement différent (avant et après moulage par exemple) renseigne sur la dégradation entraînée par le traitement subi.

Pour les deux types d'analyse, indice de fluidité et indice de viscosité, il est plus sûr de pratiquer par comparaison entre deux matières de même nature, analysées sur le même appareillage, que de raisonner en absolu sur une mesure unique.

■ Analyse par immersion

Une pièce immergée dans un bain comportant l'*agent tensio-actif* adéquat peut révéler un niveau de contraintes excessif dans certaines zones après moulage, cela se traduit par des fissurations (tableau 18).

Tableau 18 – Agents tensio-actifs et conditions d’immersion pour révélation des contraintes internes (essais non normalisés)

Matière	Agent tensio-actif	Conditions d’immersion	Contrainte révélée
Polystyrène	Kérosène, white spirit, heptane	1 min à 25 °C	(quantification non connue)
Styrène butadiène	Kérosène, white spirit, heptane	1 min à 25 °C	
SAN	1 vol. Toluène/6 vol. Propanol-1	15 min à 25 °C	
ABS	Alcool méthylique, acide acétique	15 min à 25 °C	
PMMA	4 vol. Toluène/6 vol. <i>n</i> -Heptane	15 min à 25 °C	
Polycarbonate si chargé de fibres de verre	Tétrachlorure de carbone	3 min à 25 °C	2,5 MPa
	1 vol. Toluène/3 vol. Propanol-1	3 min à 25 °C	10 MPa
	1 vol. Toluène/10 vol. Propanol-1	3 min à 25 °C	20 MPa
	Tétrachlorure de carbone	10 min à 25 °C	5 MPa
PPO	Tributyl phosphate	3 à 10 min à 20 °C	9,5 MPa
		3 à 10 min à 30 °C	7,5 MPa
		3 à 10 min à 40 °C	5,5 MPa
Polyéthylène haute densité et Polypropylène	Hostapal-Igepal (à 10 %)	60 h à 40 °C	(quantification non connue)
	Teepol (qualité ASTM D 1693)	4 h à 65 °C	
Acétal	Acide sulfurique 50 % puis rinçage 15 min à l’eau	3 min à 25 °C	
Polyamide 6-6	Tétrachlorure de zinc 50 % dans l’eau (conditionner les pièces avant essai : 24 h – 50 % HR – 23 °C)	15 s à 60 °C	

6. Règles de conception. Exemples

6.1 Remarques spécifiques sur le cahier des charges fonctionnel

Avant de concevoir une pièce, il est primordial de définir ses fonctions le plus précisément possible en rédigeant un Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF), défini par la norme NF X 50-151 comme étant un document par lequel le demandeur exprime son besoin en terme de fonctions de services et de contraintes. Pour chacune d’elles sont définis des critères d’appréciation et leurs niveaux, assortis cependant d’une flexibilité. On peut alors entamer une action de type *analyse de la valeur*.

Le tableau 19 donne la base de rédaction d’un tel cahier des charges.

6.2 Critères de choix matériau/procédé

Il est primordial de choisir les matériaux et la mise en œuvre en parallèle. On ne peut pas sélectionner d’abord une matière, puis examiner plus tard le choix du procédé de fabrication car des différences importantes de caractéristiques sont possibles. Par exemple, un matériau défini par résine polyester – fibres de verre peut avoir une résistance à la rupture de 150 MPa s’il est moulé au contact et 1 500 MPa s’il est mis en œuvre par enroulement filamentaire.

Une présélection de matière peut être faite par analyse d’application similaire déjà existante. Par exemple un support, rigide et léger, de siège d’avion devant tenir au feu et fabriqué à 500 exemplaires, est fabriqué par stratification en polyimides avec des fibres de carbone (sans charges).

Le choix de la technique de moulage sera fait à partir de critères géométriques et dimensionnels, de l’importance des séries et de la nature de matière pressentie. Les tableaux 20, 21 et 22 permettent de faire ces choix.

6.3 Règles géométriques

6.3.1 Cas des plastiques

Dans le cas de pièces moulées par injection, il est recommandé de respecter certaines géométries essentiellement à cause du retrait de la matière au moulage (figure 7).

Les pièces massives sont déconseillées. Il faut préférer des géométries de parois minces nervurées. Il faut proscrire les arêtes vives et définir des formes arrondies (rayon minimal de 0,5 à 1 mm généralement). Il faut éviter alors les croisements de nervures au même niveau pour ne pas créer d’accumulation de matière. Les épaisseurs les plus courantes sont généralement de 0,75 à 3 mm pour un plastique renforcé et 0,5 à 5 mm pour un plastique non renforcé. En cas de variations nécessaires d’épaisseurs, il faut éviter la paroi de manière à avoir une épaisseur la plus constante possible. Les angles vifs concentrent les contraintes. Des rayons de 1 à 1,5 mm donnent de bons résultats.

Tableau 19 – Base de rédaction d'un cahier des charges fonctionnel

Contraintes technico-économiques	fonction mécanique	– principale : pièce dont la rupture bloque le fonctionnement ; – secondaire : habillage, capotage, etc.
	géométrie, encombrement	– situation de la pièce par rapport à l'ensemble du produit ; – déformations admissibles compte-tenu de l'encombrement.
	interface avec éléments environnants	– nature des matériaux en contact ; – assemblage à prévoir (boulonnage, collage, soudage, etc.).
	état de surface	rugosité, étanche ou poreux, autodémoulant, esthétique, brut.
	importance de la masse	légèreté, équilibrage, inertie.
	durée de vie	1 an, 5 ans, 10 ans, 30 ans.
	quantités prévisionnelles	série annuelle, cadence (pièces/jour et homme).
	importance du coût	le moins cher possible.
Caractéristiques techniques supportées par la pièce	contraintes mécaniques	– traction, compression, cisaillement, flexion, torsion ; – statique intermittent (fréquence), statique constant (fluage), fatigue (contrainte moyenne, fréquence, amplitude), choc (surface de contact, vitesse à l'impact, etc.).
	contraintes thermiques	– températures d'utilisation (mini, maxi, cyclique, constante) ; – isolation ou conduction thermique.
	contraintes d'environnement	– ambiance chimique (milieu, concentration, température, intermittente ou constante, etc.) ; – humidité (cyclique, constante) ; – comportement aux rayonnements (UV, radioactif, etc.) ; – frottement (surface et effort de contact, vitesse relative) ; – comportement au feu (exposition, inflammabilité, toxicité fumées).
	contraintes électriques	isolation, conduction, électrostatique.
	autres contraintes	– optique (transparence, opacité, couleur) ; – acoustique (isolation, conduction) ; – alimentaire, biocompatibilité ; – étanchéité.
Mise en œuvre	Conditions de fabrication	– sous-traitant spécialisé ; – en atelier standard ; – en salle climatisée ; – par du personnel qualifié ; – sur machine existante ou investissement à prévoir.
Contrôle qualité		– niveau de contrôle ; – utilisation des moyens existants ; – investissement nécessaire.

Dans le cas où on ne peut pas éviter des variations d'épaisseurs, celles-ci doivent être les plus régulières possible avec des rayons adéquats dans le cas d'une variation dans un angle.

De même, les bossages ne doivent pas entraîner d'accumulation de matière.

6.3.2 Cas des composites stratifiés et structures sandwichs

Dans le cas des composites, il y a interpénétration entre le choix des constituants, la définition du matériau et le choix du procédé de transformation. Il faut effectuer une démarche par itération et, à chaque boucle, définir le matériau tant que les fonctions ne sont pas remplies. On évitera systématiquement, dans la définition des formes et le dimensionnement, d'appliquer des concepts métalliques à des structures composites : il est rarement intéressant économiquement de contretyper les dimensions physiques des pièces en matériaux traditionnels (figure 8).

Il faut orienter les fibres de renforcement dans le sens principal des efforts de même qu'éliminer au maximum les usinages et limiter le nombre des éléments à assembler.

Si l'on cherche un maximum de rigidité en flexion, il faut penser à la structure sandwich.

Dans le cas des stratifiés, il faut adapter la conception et le mode de sollicitation aux efforts appliqués, en induisant une orientation des contraintes qui favorise la cohésion des couches constitutives du matériau. Les particularités géométriques, comme les nervures, trous, bossages, etc., doivent être conçues en fonction des possibilités du procédé de mise en œuvre choisi.

Les congés de raccordement sont le plus souvent fonction de l'épaisseur et réduits au minimum afin de limiter les défauts d'aspects sur les contrefaces consécutifs aux retraits de la matière au moulage. Les bossages reçoivent le plus souvent les éléments mécaniques d'assemblage, inserts ou vis autotaraudeuses. Ils doivent en principe être définis en maintenant l'épaisseur nominale de la pièce, et doivent comporter les dépouilles propres au démoulage. Leur dimensionnement exact est généralement lié au mode de transformation retenu. L'épaisseur nominale est l'épaisseur moyenne de la pièce. Elle doit pratiquement être aussi uniforme que possible afin de minimiser les effets du retrait et le vrillage après moulage. Sa valeur devrait dans la plus grande généralité des cas être comprise entre 1,5 et 25 mm, bien que les épaisseurs les plus fréquentes soient de l'ordre de 2,5 à 5 mm.

Les nervures constituent des éléments de renforcement permettant de conférer aux pièces une rigidité suffisante sans augmentation

Tableau 20 – Types d'application et polymères souvent utilisés

Fonction principale demandée à une pièce	Matières envisageables (liste non exclusive ni exhaustive, seulement indicative)
optique, transparente (lunette, matériel de laboratoire, vitrage, etc.)	PMMA, SMMA, polycarbonate, polystyrène, polysulfone, polyéthersulfone, polyméthylpentène, polyester PET, ionomère, puis PVC, cellulositiques, polyoléfine, certains époxydes et polyesters.
frottante (engrenage, etc.)	Acétal, polyamide, polyimide, polyuréthane, polyéthylène, fluorés.
alimentaire	Polyéthylène, polypropylène, PVC rigide, PVDC, polystyrène cristal, PPO, polyfluorés, polycarbonate, polysulfone, certains polyesters thermodurcissables, polyuréthane.
facilement usinable	Cellulosiques, acétal, polyamides, polycarbonate, PMMA.
soudable	PVC, polyéthylène, polypropylène et tous thermoplastiques rigides par ultrasons (difficile pour les fluorés, impossible pour les thermodurcissables).
collable	Époxyde, polyuréthane, PMMA, polystyrène et dérivés (très difficile pour les polyéthylènes, polypropylènes et fluorés).
exposée aux UV	Aminoplaste et phénolique, PMMA, polyamide, acétal, polystyrène et dérivés (et d'autres polymères s'ils sont chargés d'agent anti-UV).
tenue au feu	Phénolique, polyimides, polysulfone et dérivés, PPS, PEEK, polyfluorés (et d'autres s'ils sont chargés d'un agent ignifugeant).
tenue thermomécanique	Polyfluorés (PFA, PCTFE), polyimide et dérivés, PEEK, PPS, polyarylsulfone.
tenue au choc	Polyuréthane, polycarbonate, polyéthylène basse densité, polyamide, ionomère.
mousse	Polyuréthane, PVC, phénolique, polystyrène, polyimide, polyéthylène, urée.
film	Polyéthylène, polypropylène, polyfluorés, polyimide, polyamide, polycarbonate, PVC, cellulositiques, styréniques.
impermeable aux gaz	Vinyls (PVDF, PVDC), polyester PET, fluorés PTFE, (Polyéthylène et polypropylène pour la vapeur d'eau seulement).

Tableau 21 – Critères de choix des constituants d'un matériau composite

Constituant	Exemples de critère de choix (non exhaustif)
Fibre	<ul style="list-style-type: none"> - caractéristiques mécaniques (rigidité, tenue à la rupture, choc, etc.) ; - mise en œuvre (choix de l'aspect physique : fibre coupée, tissu, etc.) ; - densité, prix, etc.
Résine	<ul style="list-style-type: none"> - température de fléchissement sous charge, comportement au feu ; - type de mise en œuvre (viscosité, catalyse, température de fusion, etc.) ; - tenue chimique, vieillissement aux intempéries, aux UV, etc. ; - tenue à la fatigue, frottement, usure, prix.
Charges et additifs	<ul style="list-style-type: none"> - remplissage à bas prix, agent démoulant intégré ; - amélioration de tenue mécanique (par exemple, compression avec des microbilles) ; - coloration, amélioration de la tenue aux UV, conduction électrique, etc.

prohibitive de masse. Elles doivent respecter les épaisseurs nominales et comporter une dépouille nécessaire au démoulage (le haut de la nervure a généralement une épaisseur de 75 à 90 % de l'épaisseur nominale). Leur hauteur ne peut être quelconque. Les géométries d'extrémités et bords libres doivent apporter une rigidification de l'ensemble, soit au moyen d'un épaissement local, soit en nervurant les bords libres des pièces tout en conservant l'épaisseur nominale (solution préférable).

Le choix du procédé de transformation et ses implications sur la géométrie des pièces imposent nécessairement un ensemble de limitations.

Dans le cas des structures sandwich (§ 4.3), le choix peut être justifié par la recherche simultanée de l'allègement et de la rigidité, dès lors que les épaisseurs de panneaux envisageables ne constituent pas une entrave majeure, ou que les formes exigées, non planes, imposent la présence d'une âme de remplissage ne participant que partiellement à la résistance mécanique de l'ensemble. Les épaisseurs totales des panneaux les plus courantes sont de l'ordre de 10 à 250 mm.

Les caractéristiques des panneaux sandwich dépendent des épaisseurs, procédures d'assemblage et caractéristiques particulières des composants : peaux, âme, film de colle, ainsi que des dispositifs d'assemblages ou d'appuis en extrémités de panneaux, ou localisés dans les panneaux. L'âme de ces panneaux, de géométries et dimensions variables en fonction des applications et fournisseurs, se caractérise par la densité, ou masse volumique, la résistance en compression, orthogonalement au plan principal des panneaux, les résistances en cisaillement dans un plan parallèle au plan principal du panneau. Les caractéristiques sont approximativement proportionnelles à la masse volumique pour une même nature de matériau.

6.4 Exemples

Ces exemples de conception ne sont donnés qu'à titre indicatif pour illustrer le type de démarche à effectuer. Ils ont été inspirés de documentations techniques des producteurs de matières et

Tableau 22 – Choix du procédé de fabrication

Série	petite (1 à 1 000 pièces)	– stratifié au contact, par projection, injection de résine (RTM), frittage, coulée, etc. – thermoplastique thermoformé, usiné, soudé, etc.	
	grande (> 10 000 pièces)	procédé sous presse (injection, compression, etc.), injection RTM automatisé.	
	séries types	contact, projection	1 000 pièces
		rotomoulage	10 à 1 000 pièces
		injection RTM	5 000 pièces
		thermoformage	10 à 10 000 pièces
		soufflage	10 000 à 100 000 pièces
		compression SMC, BMC	10 000 à 100 000 pièces
		injection	100 000 à 1 000 000 pièces
		extrusion	100 000 mètres linéaires
calandrage	1 000 000 mètres linéaires		
pultrusion	5 000 mètres linéaires		
Dimension (entre les deux bilans à faire)	surface < 1 m ²	procédés sous presse (injection, compression, thermoformage, etc.), frittage, coulée, etc.	
	surface > 5 m ²	moulage au contact, par projection ou assemblage.	
	géométries maximales	injection	presse < 10 000 t, pièces < 2 × 2 m et 100 kg
		injection RIM	pièces < 50 kg
		compression SMC	pièces < 20 kg
		thermoformage	pièces < 8 × 2,5 m (200 kg)
		contact-projection	pièce monobloc < 50 m (30 t)
		soufflage	volume < 5 m ³
		rotomoulage	volume < 25 m ³
		enroulement	volume < 3 000 m ³
enduction, calandrage	largeur < 3,2 m		
extrusion	tube < Ø 1,5 m, gaine < Ø 0,5 m, plaque < 3,5 m, film < 15 m		
Géométrie	volumique	compression BMC, injection, etc.	
	plane	compression SMC ou TRE, injection, thermoformage, etc.	
	creuse	injection, soufflage, rotomoulage, enroulement, etc.	
	tubulaire	enroulement filamentaire (de Ø 1 cm à quelques mètres), pultrusion (Ø < 100 mm), centrifugation (Ø > 500 mm).	
	profilé	extrusion (thermoplastique), pultrusion (renforcé fibres longues), etc.	
Nature de polymère	thermoplastique	injection, extrusion, soufflage, thermoformage, rotomoulage, enroulement.	
	thermodurcissable	contact, projection, injection RTM ou RIM, compression, pultrusion, enroulement, etc.	
	fibres courtes	injection, compression, projection simultanée, etc.	
	fibres longues coupées	compression SMC ou BMC, centrifugation, contact, injection RTM, etc.	
	fibres tissées, tendues	enroulement, pultrusion, compression TRE, drapage, injection RTM, etc.	
	taux de fibres > 60 %	pultrusion, enroulement filamentaire, drapage-autoclave, etc.	

d'études réellement effectuées par les laboratoires du CETIM. Les valeurs numériques ont été modifiées et ne sont données que pour mieux illustrer l'exemple. Il ne faut pas appliquer directement les données numériques de ces exemples pour lancer la fabrication de produits réels.

6.4.1 Engrenage

Les caractéristiques demandées à un engrenage sont généralement :

— **thermomécaniques** : rigidité dans les intervalles de température de fonctionnement pour transmettre la sollicitation mécanique, résistance à la fatigue et parfois au choc (démarrage, arrêts fréquents, engrenage réversible, etc.) ; dureté superficielle suffisante, bonnes caractéristiques de frottement (faible perte et pas de grip-page avec les éléments en contact), et résistance à l'abrasion.

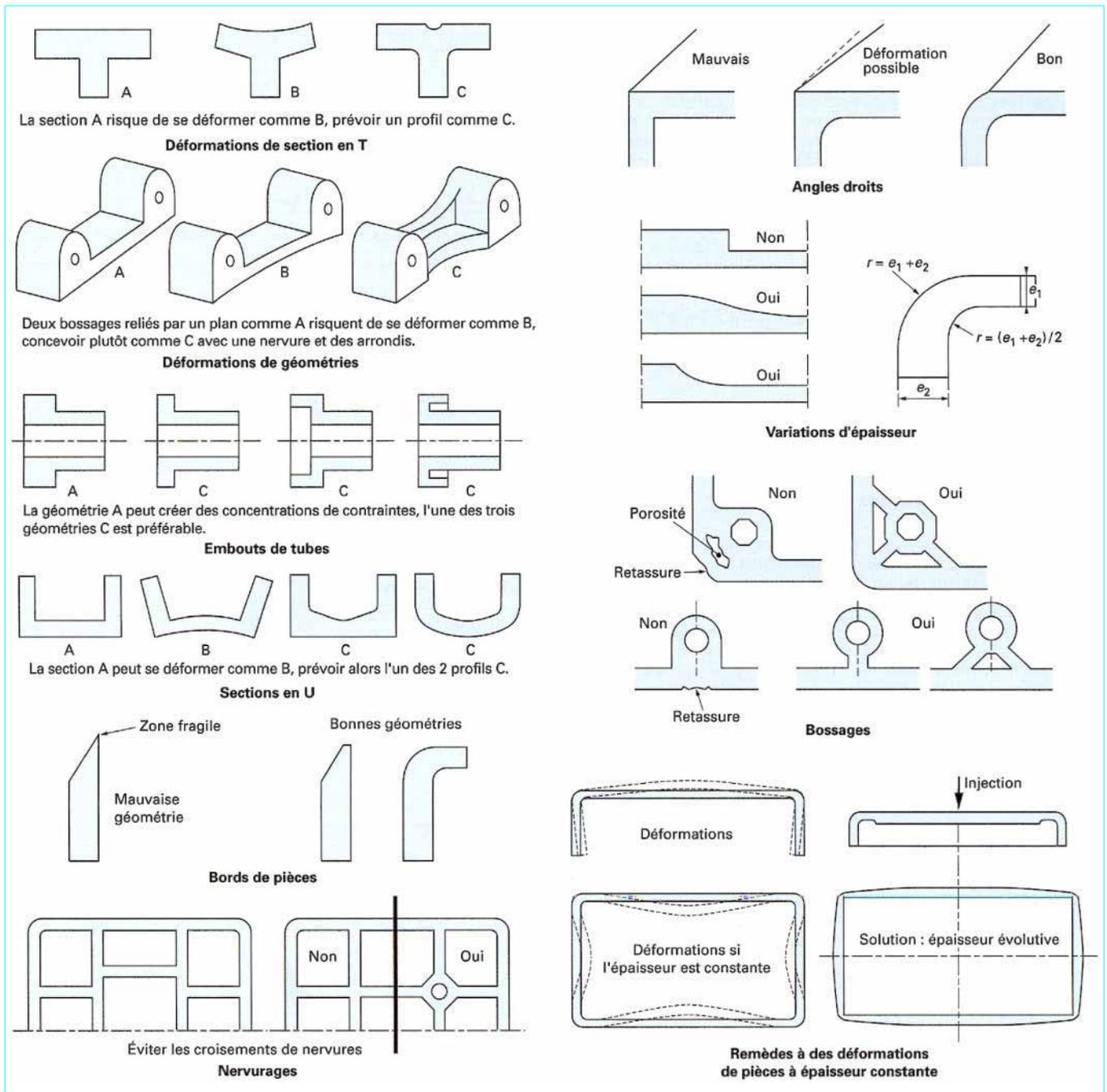


Figure 7 – Quelques règles géométriques à respecter pour les plastiques

Pendant le fonctionnement, la vitesse de frottement entre les dents n'est pas constante. Elle est maximale au début de l'engrènement, puis nulle, puis augmente à nouveau. La vitesse de glissement moyenne est de l'ordre de 0,2 fois la vitesse tangentielle ;

— **chimiques** : résistance au milieu environnant (graisse, produits divers, etc.) ;

— **géométriques** : stabilité dimensionnelle et fonctionnement silencieux.

■ **Choix des matériaux**

L'un des grands avantages de certains polymères dans ce domaine est la qualité autolubrifiante, ce qui réduit les coûts de maintenance. Il existe des applications de pignons ou roues dentées en plastique de toute taille jusqu'à même 10 à 12 m de diamètre, dans tous les secteurs d'activité. Une lubrification initiale facilite le rodage et augmente la durée de vie. Ce premier graissage persiste environ 200 à 600 h selon les conditions d'utilisation. Dans le cas de conditions

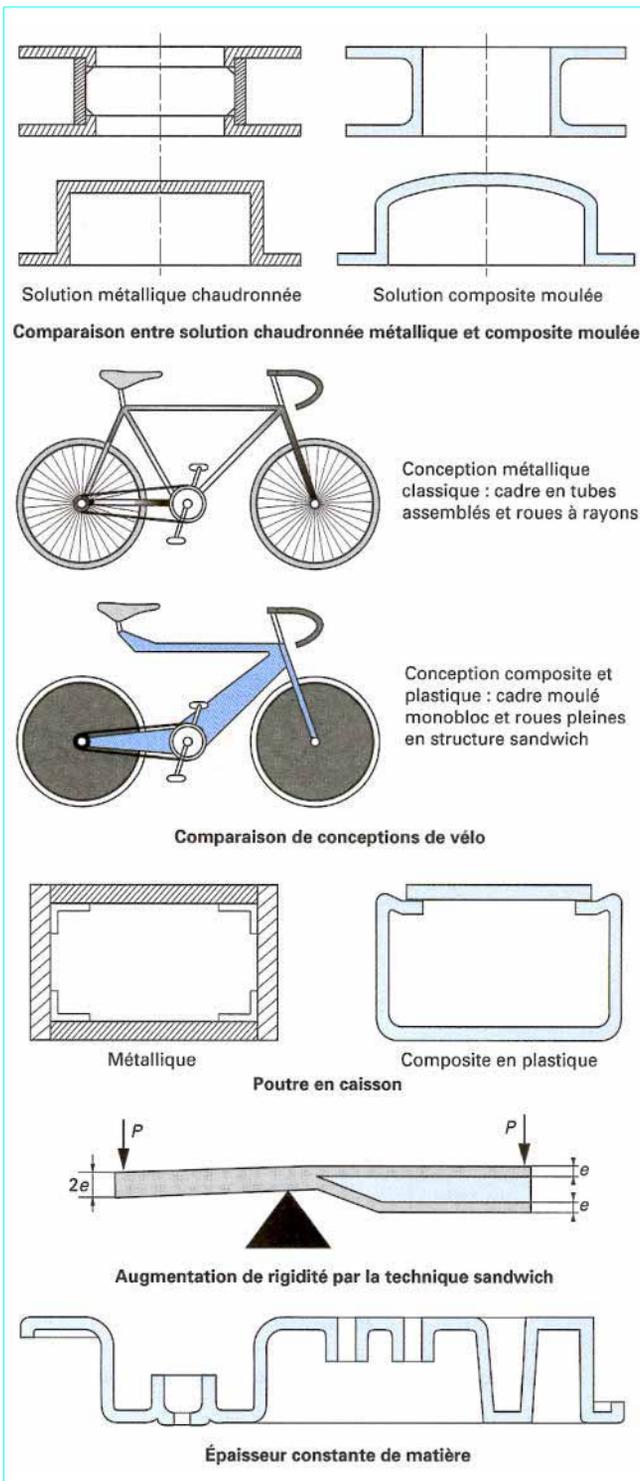


Figure 8 - Quelques règles géométriques à respecter pour les composites et structures sandwichs

extrêmes, un graissage intermittent peut multiplier la durée de vie jusque par 4. Les limites, par contre, résident dans le fait que les plastiques supportent des charges généralement inférieures aux métaux (dimensionnement à revoir en conséquence), sont limités en température et ont des coefficients de dilatation thermique plus élevés (prévoir des jeux plus importants pour les conditions extrêmes). De plus, certains plastiques sont très influencés par les conditions ambiantes d'hygrométrie qui peuvent entraîner des variations dimensionnelles importantes (polyamides par exemple). Les polymères le plus fréquemment employés pour engrenages sont :

- acétal (bon compromis) ;
- polyamide (sensible à l'humidité) ;
- polyéthylène haute densité (limité en température) ;
- polyfluoré (*Téflon* – peu de tenue mécanique mais coefficient de frottement le plus faible) ;
- polyester PET ou PBT (sensible à l'eau chaude) ;
- polyuréthane (résistance à l'usure mais coefficient de frottement élevé) ;
- polyimide (pour haute température) ;
- phénolique stratifié – tissu de coton.

Une roue dentée ne se conçoit pas seule mais toujours en fonction de l'élément qui lui est associé. En effet, certaines associations de matériaux ne conviennent pas pour remplir le cahier des charges prévu :

- polymère X/polymère X : s'il y a risque d'échauffement, les deux plastiques vont être à la même température, éventuellement proche du point de ramollissement, ce qui peut entraîner un grippage voire un *soudage par frottement* au prochain arrêt de fonctionnement (cela se produit rarement à moins de 5 m/s) ;
- polymère X/polymère Y : c'est généralement la solution plastique recommandée en choisissant deux natures compatibles entre elles et avec les conditions de fonctionnement (par exemple, acétal/polyamide) ;
- polymère/métal : l'avantage est que la chaleur est évacuée par l'engrenage métallique, mais certains métaux sont parfois déconseillés comme le bronze ou fonte sont préférables, avec un état de surface $Ra \leq 2 \mu\text{m}$.

■ Choix du lubrifiant

Lubrifiant interne : charge ou additif, solide ou liquide, incorporé aux polymères pour améliorer les qualités autolubrifiantes, par exemple :

- PTFE : en poudre ou en fibre, il migre en surface et diminue le coefficient de frottement. Le taux est limité à 15-20 % maximum car il diminue les caractéristiques mécaniques. On peut ajouter des fibres de verre, mais en taux limité car cela augmente l'usure de la contre-pièce ;
- graphite : il est préconisé en présence d'eau (part typique : 10 %) ;
- bisulfure de molybdène (MoS_2) : d'une efficacité élevée sur les cristallins (quantité type : 2-5 %), il favorise l'obtention d'une structure cristalline fine et homogène qui abaisse nettement l'usure superficielle (agent nucléant) ;
- huile silicone : il migre à la surface et forme un film lubrifiant qui améliore le frottement au démarrage et aux vitesses élevées. On incorpore souvent $\approx 2\%$ de silicone seul ou avec 15-20 % de PTFE.

Lubrifiant externe : graisses habituellement utilisées dans ce domaine à choisir selon la nature du plastique. Pour des acétals ou des PBT, on peut prendre une graisse à base d'huile minérale, souvent additionnée d'un savon de lithium (graisse multiusage). Elle ne convient pas pour un polyéthylène ou pour une température supérieure à 65 °C.

Si les exigences sont sévères (vieillessement, température, alimentaire, etc.), on peut choisir une huile synthétique comme les alkoxy-fluorées, les huiles d'éthers de polyglycol ou des huiles siliconées. Les huiles de diester ne conviennent pas au PBT (gonflement). Les huiles méthyl-siliconées ramollissent l'acétal et le PBT ; par contre, l'huile phénylméthylsiliconée convient.

■ Mise en œuvre

Différentes techniques de mise en œuvre sont possibles selon les séries, le matériau, la géométrie (tableau 22).

- **Usinage** : petite série, très grande pièce, engrenage de forme massive. Il faut alors choisir les paramètres de coupe correspondant à la matière et pratiquer en plusieurs passes successives pour que la matière ne s'échauffe pas et assurer la précision dimensionnelle.

- **Moulage par injection** : grande série, mais nécessite de définir une géométrie adaptée au moulage. Des précautions particulières doivent être prises pour assurer la qualité de l'engrenage (figure 9) :

- définir une épaisseur la plus constante possible sinon le retrait peut créer des déformations (pas d'engrenage massif mais plutôt nervuré de manière symétrique) ;
- injection préférable à partir du centre, sinon multi-points sur la toile, voire injection annulaire pour une denture intérieure. L'injection sur une dent, plus économique, risque d'aboutir à des défauts ;
- alimenter le moule par une zone épaisse ;
- régler les conditions de moulage pour assurer la cristallinité optimale en surface (moule chaud).

Il serait possible d'utiliser également le frittage pour le *Téflon* et la coulée pour les polyuréthanes ou certains polyamides.

■ Calculs

Se reporter aux articles *Engrenages* [B 636] [B 5 640] [B 5 645] [BM 7 155] dans le présent traité.

Il existe des logiciels de calculs d'engrenages métalliques qui permettraient d'avoir une première approche en les adaptant au cas des plastiques. On peut éventuellement procéder aussi à un calcul standard par éléments finis. Mais il existe quelques formules simplifiées adaptées aux plastiques permettant d'évaluer les caractéristiques d'un engrenage.

- **Cas d'un fonctionnement à sec** : le calcul de la pression de contact est le premier critère car la durée de vie est conditionnée par l'usure au contact entre les dents. Elle est donnée par la formule suivante (doc. Hoechst) :

$$\sigma_H = Z_H Z_M \sqrt{\frac{F_t (i+1)}{b d i}}$$

- avec σ_H (MPa) pression superficielle (pression de Hertz),
 F_t (N) force tangentielle au cercle primitif,
 b (mm) largeur de dent,
 d (mm) diamètre du cercle primitif,
 i rapport du nombre de dents (z_2/z_1),
 Z_H facteur de forme des flancs (= 1,76 pour des roues cylindriques à denture droite avec un angle de pression de 20°, sans correction du profil),
 Z_M facteur matériau, dépendant de la nature des matériaux en contact et de la température superficielle (figure 10).

- **Cas d'un fonctionnement avec lubrifiant à vitesse > 5 m/s** : il est généralement reconnu que, dans ce cas, il y a échauffement par frottement. Une formule empirique permet d'évaluer la température des flancs de dents des roues 1 et 2 en contact (doc. Hoechst) :

$$T_1 \text{ (ou } T_2) = T_0 + 0,136 P \mu \frac{1+i}{5+z_1(z_2)} \left[\frac{17\,100 k_2}{b z_1 \text{ (ou } z_2) (v \cdot m)^\chi} + \frac{6,3 k_3}{S} \right]$$

- avec T_1 (ou T_2) (°C) température de flanc des dents 1 (et 2),
 T_0 (°C) température à l'arrêt,
 P (W) puissance,
 μ coefficient de frottement dynamique,
 S (m²) surface du carter d'engrenage,
 b (mm) largeur de dent minimale,
 i rapport du nombre de dents z_1/z_2 ,

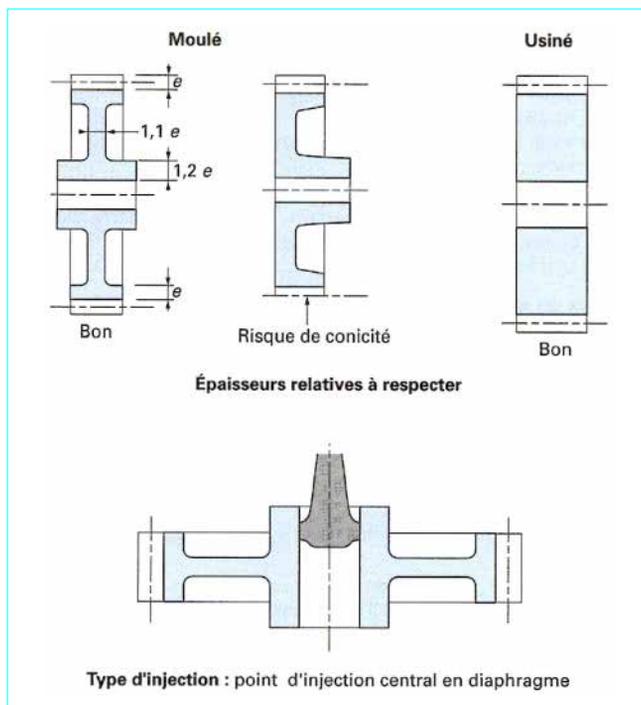


Figure 9 – Précautions à prendre dans le moulage par injection

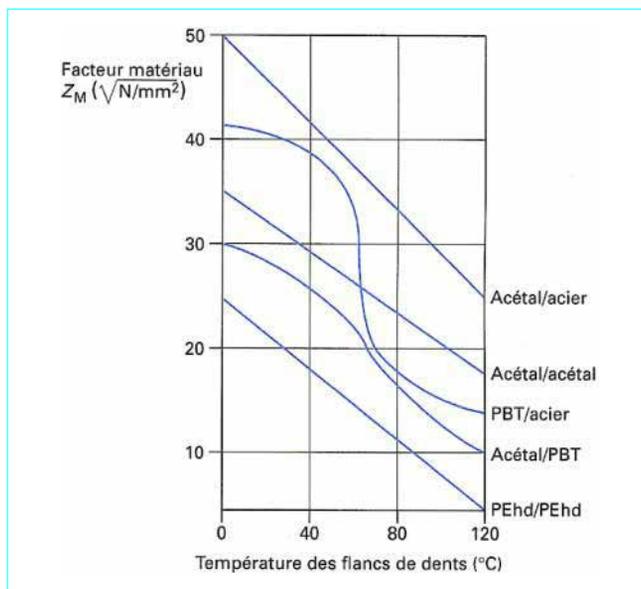


Figure 10 – Facteur matériau en fonction de la température

- k_2, k_3 et χ constantes,
 m (mm) module (= pas/ π),
 v (m/s) vitesse tangentielle,
 z_1 (ou z_2) nombre de dents de la roue 1 (ou de la roue 2).

Les constantes sont à définir (expérimentalement) avec les matériaux et configurations prévus :

- $k_2 = 2,5$: acétal-acétal ou acétal-PBT (sauf pour l'Hostaform C9021K = 7) ;
- $k_3 = 0$: engrenages lubrifiés à l'huile ou très aérés ;
- 0,17 : engrenages enfermés ;
- $\chi = 0,4$: acétal et PBT standard ;
- 0,75 : polyamide et Hostaform C9021K.

Après vérification que la température soit compatible avec le polymère envisagé, il faut calculer la contrainte en pied de dent tel qu'explicité dans le paragraphe suivant.

● **Cas d'un fonctionnement avec lubrifiant, vitesse ≤ 5 m/s** : le calcul de la contrainte en pied de dent peut être fait avec les formules simplifiées classiques en utilisant des facteurs de correction spécifiques aux plastiques :

si couple connu $\rightarrow \sigma_F = 2 \times 10^3 M K_1 K_2 / d m b y$ (en MPa)

si puissance connue $\rightarrow \sigma_F = 191 \times 10^5 P K_1 K_2 / d m b y n$

avec $M(N \cdot m) = 9\,550 P/n$,

$P(kW)$ puissance,

$d(mm)$ diamètre du cercle primitif,

$m(mm)$ module,

$b(mm)$ largeur de dent,

$n(tr/min)$ vitesse de rotation,

y facteur de forme de la dent,

K_1 facteur de correction de vitesse,

K_2 facteur de correction de température.

Le tableau 23 donne des valeurs de contrainte admissible pour divers plastiques et la figure 11 illustre le cas d'un engrenage en acétal en fonction de sa durée de vie.

● **Liaison engrenage – axe** : il existe plusieurs possibilités d'assurer la liaison entre l'engrenage en plastique et son axe :

— engrenage monobloc moulé ou usiné avec son axe intégré : réservé aux petites dimensions et relativement faibles efforts ;

— engrenage plastique sur axe métallique :

- surmoulage direct sur l'axe (précision de positionnement dans le moule, géométrie d'interface adaptée à la transmission d'effort (cannelure, moletage, etc.),
- emmanchement de l'axe (problème de fluage du plastique),
- insert métallique dans l'engrenage (on se ramène à une liaison métal – métal),
- clavetage.

Exemple de calcul d'un clavetage :

$$F_c = 0,002 M_d / D_a = 19,1 P / (n D_a)$$

avec $F_c(N)$ effort transmis par la clavette,
 $D_a(mm)$ diamètre de l'arbre,
 $M_d(N \cdot m)$ couple de rotation,
 $P(kW)$ puissance nominale,
 $n(tr/min)$ vitesse de l'arbre.

Les dimensions des clavettes sont normalisées en fonction du diamètre de l'arbre. Il faut vérifier si la surface de la partie de clavette en appui dans la rainure suffit :

$$F_c / h \cdot L \leq P_a$$

avec $h(mm)$ hauteur en contact,
 P_a pression maximale admissible par le plastique,
 $L(mm)$ hauteur en contact.

Si la clavette est insuffisante, il faut prévoir un assemblage vissé de l'axe. Pour un diamètre de pignon supérieur à 300 mm, il est préférable de prévoir seulement une couronne dentée en polymère, boulonnée sur des flasques métalliques.

Avec les notations précédentes et $l(mm)$ longueur de contact axe de boulon/pignon, $r(mm)$ rayon du cercle reliant les axes de boulons, $\varnothing(mm)$ diamètre d'axe de boulon, il faut que le nombre de boulons soit au moins :

$$N = 72\,500\,000 P / n r \varnothing 1 P_a$$

Le tableau 24 donne des valeurs de compression admissible pour différents plastiques.

Tableau 23 – Valeurs de contrainte admissible σ_F en pied de dent à 50 % HR (en MPa)

Plastiques	PA6	PA66	PA6 coulé	PA11	POM	PET	PEhd
à sec 23 °C	57	69	69	44	63	63	18
à sec 50 °C	44	55	55	31	50	50	12
à sec 80 °C	31	42	42	20	38	38	–
lubrifié à 23 °C	85	103	103	66	95	95	27
lubrifié à 50 °C	66	83	83	47	75	75	18
lubrifié à 80 °C	47	62	62	30	57	57	–
lubrifié à 100 °C	31	41	41	22	38	38	–

Tableau 24 – Valeurs de contrainte de compression admissible à 50 % HR (en MPa)

Plastiques	PA6	PA66	PA6 coulé	PA11	POM	PET	PEhd
23 °C	18	20	22	12	22	30	5
50 °C	12	13	15	8	15	16	3
80 °C	8	9	10	5	10	6	–
100 °C	7	7	8	4	8	4	–
T °C maxi à sec	80	90	90	80	80	90	50
T °C maxi lubrifié	120	120	120	120	120	120	50

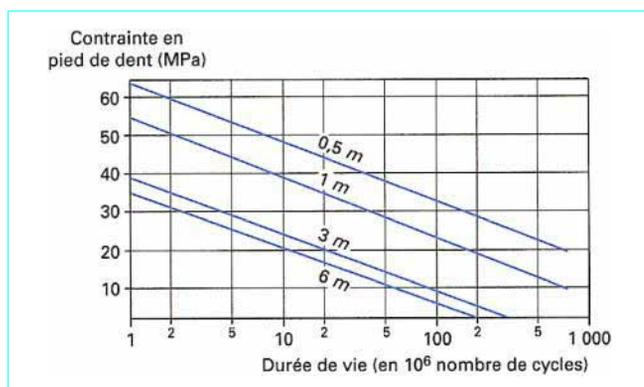


Figure 11 – Contrainte en pied de dent en fonction de la durée de vie d'un engrenage en acétal (doc. Polypenco)

6.4.2 Arbre de transmission

On trouve quelques applications de composites dans le domaine des arbres de transmission pour véhicules, hélicoptères ou navires, prototypes expérimentaux ou fabrication en série. L'arbre pour automobile ou hélicoptère a une vitesse de rotation plus rapide, est relié à chaque extrémité et ne supporte que des efforts de flexion et torsion, alors que l'arbre pour navire est très long avec des paliers intermédiaires et le dernier élément sur lequel est fixée l'hélice est en porte-à-faux. Il supporte en plus des efforts de compression axiale dus à la poussée de l'hélice.

Exemple de fonctions à remplir par une ligne d'arbre pour construction navale :

- diamètre extérieur : 400 mm
- couple de torsion : 500 000 N · m
- poussée : 700 000 N
- masse de l'hélice (5 pales) : 10 t
- vitesse de rotation maxi : 200 tr/min
- environnement : ambiance marine (côté hélice), chauffée à 50 °C, présence d'huile et graisse (côté moteur)

— étanchéité nécessaire entre la partie immergée et l'intérieur de la coque.

La figure 12 montre l'assemblage par manchons et boulons de deux tubes composites bout à bout, utilisé sur la ligne d'arbres d'un navire par exemple.

■ Analyse matériaux et géométrie

Les paliers peuvent être à base de résine phénolique (charge minérale lubrifiante). La pression d'appui sur un palier doit être inférieure à 2 bar. La pression considérée est celle calculée sur la section au diamètre. En dynamique, la position des fréquences propres est très importante. En flexion ou en torsion, la première fréquence propre doit être supérieure à celle correspondant à la vitesse de rotation maximale. Il ne doit y avoir aucune fréquence secondaire dans le domaine des vitesses usuelles du navire qui sont (par exemple) de l'ordre de 150 tr/min.

■ Calculs

Dans ce domaine, on peut utiliser des méthodes de calculs par éléments finis mais aussi des formules plus ou moins empiriques. La formule suivante donne les fréquences propres de vibration en torsion et flexion d'un tube :

$$f_{T1} = (30/\pi L) [(G/\rho) I_0 (1/I_1 + 1/I_2)]^{1/2}$$

$$f_{L1} = K (30 \pi / L^2) (Er^2/2\rho)^{1/2}$$

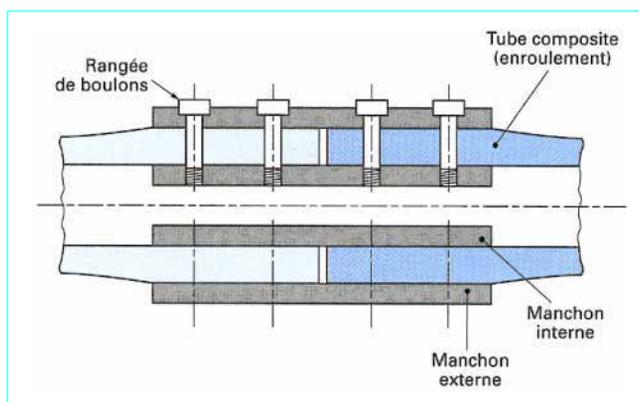


Figure 12 – Assemblage par manchons et boulons de deux tubes composites bout à bout

- avec f_{T1}, f_{L1} première fréquence propre en torsion et en flexion (latérale),
 L longueur du tube entre appuis,
 r rayon du tube,
 E module d'élasticité longitudinal,
 G module de cisaillement du matériau,
 ρ densité du matériau,
 I_0, I_1 et I_2 inertie polaire, inerties en amont (moteur) et en aval (hélice) du tube,
 K coefficient tel que $1/K^2 = 1 + \pi^2 r^2 (1 + 2E/G)/2 L^2$

On peut retenir trois critères à vérifier :

- la torsion appliquée ne cause la rupture d'aucune des couches du composite ;
- la torsion appliquée ne produit aucun vrillage par flambement dans le tube ;
- la première vitesse critique est supérieure à la vitesse d'utilisation.

Contrainte maximale en cisaillement :

$$\tau_{\max} = T_e/J$$

- avec T couple maximal,
 r_e et r_i rayons extérieur et intérieur du tube,
 J moment d'inertie polaire (en torsion)
 $= 0,5\pi (r_e^4 - r_i^4)$.

La figure 13 donne le croquis des principaux efforts sur une ligne d'arbres de navire.

Exemple : avec les dimensions suivantes :

- $L_1 = 6,0$ m et $L_2 = 4,0$ m, d'où $L = 10,0$ m, et une structure : verre 0°/carbone 45°/45°/45°/verre 90°, orthotrope,
- un taux volumique de fibre : 50 %,
- un module E , équivalent en flexion = 22 000 MPa,
- un module G , équivalent en torsion = 20 000 MPa,
- une densité = 1,61 kg/dm³,
- les calculs aboutissent à un diamètre extérieur $D_e = 350$ mm et un diamètre intérieur $D_i = 290$ mm.

Les jonctions (figure 12) aux extrémités sont calculées par éléments finis. Dans le cas d'une conception riveté-collé, on trouve les recommandations suivantes :

- diamètre du perçage inférieur à 2 fois l'épaisseur de stratifié ;
- distance entre deux perçages (ou par rapport au bord) supérieure à 5 fois le diamètre du perçage ;

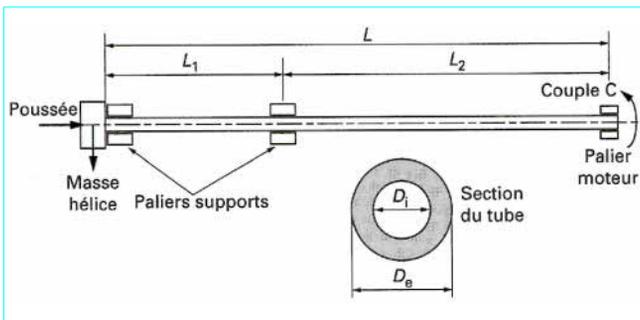


Figure 13 – Croquis des principaux efforts sur une ligne d'arbres de navire

— vérifier que le stratifié résiste bien à la contrainte d'écrasement du bord du trou qui est égale à F/D_e , si l'on considère qu'elle est régulièrement répartie sur la demi-circonférence (en pratique, la répartition est différente en fonction du jeu rivet-trou, mais s'il y a un collage avec le rivetage, on peut considérer que la répartition est bonne) avec F force appliquée sur le rivet, dans le sens du cisaillement, D diamètre du perçage (ou du rivet en place) et e épaisseur de stratifié.

On peut prendre les valeurs de référence suivantes comme résistance à l'écrasement pour une préétude et pour un rapport diamètre de trou/épaisseur égal à 1 :

- stratifié verre $0^\circ/90^\circ$ – époxyde : 250 MPa ;
- stratifié carbone $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ – époxyde : 310 MPa ;

alors qu'un stratifié verre-époxyde $0^\circ/90^\circ$ peut avoir une résistance à la rupture en traction, dans les deux sens principaux des fibres, de 600 MPa, et un stratifié carbone-époxyde $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$, une résistance à la traction, quasiment isotrope, d'environ 500 MPa.

À titre d'exemple, on peut faire un petit calcul simple sur un arbre de diamètre moyen 260 mm et d'épaisseur 20 mm, en carbone-époxyde $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$. Le couple à transmettre, par exemple, de 40 000 N · m se traduit par des efforts sur les rivets (ou boulons) :

- effort résultant du couple : $2 \times 40\,000/0,33 = 240\,000$ N
- résistance du stratifié à l'écrasement : 310 MPa

on a alors : $310 = 240\,000/nd\,30$

avec n le nombre de rivets et d le diamètre de chaque rivet en supposant qu'ils supportent tous le même effort (jeu nul entre rivet et trou ou collage complémentaire),

d'où $nd = 25,8$ mm

Si l'on prend, par exemple, 5 rivets de 6 mm de diamètre ($5 \times 6 = 30 > 25,8$), répartis sur la circonférence de diamètre moyen 260 mm, c'est-à-dire sur une longueur d'environ 810 mm, on a 1 rivet tous les $810/5$, soit 160 mm.

La distance entre deux perçages est $160 - 6 = 154$ mm. Le rapport intervalle/diamètre trou est $154/6 = 25,6$; il est recommandé d'en avoir au moins 5, par conséquent la configuration est tout à fait bonne.

Le rapport « diamètre du trou/épaisseur de stratifié » est égal à $6/20$ donc très inférieur à 2, ce qui suit les recommandations habituelles.

Ce prédimensionnement simple peut permettre d'approcher la définition d'une configuration à analyser et, éventuellement, être modifiée par éléments finis.

Plusieurs types de jonctions peuvent être testés :

- un système de frettage : l'insert métallique comporte une pression interne qui le plaque sur la paroi intérieure du tube rigidifié par une surépaisseur de fibres circonférentielles ;
- un couplage par des sections polygonales insert-intérieur du tube ;
- 2 rangées de 10 rivets (tous les 36° sur deux périphéries).

Si l'on envisage seulement un collage, en toute première approximation, on peut évaluer la longueur d'emmanchement nécessaire L . En considérant que les traitements de surface et la mise en œuvre de l'adhésif sont parfaitement réalisés, on peut prendre comme valeur-guide de prédimensionnement pour la résistance au cisaillement 10 MPa. Pour le calcul effectif de l'étude, on prend la valeur correspondant à la jonction choisie et tenant compte des conditions d'utilisation.

Avec un diamètre intérieur d'arbre de 240 mm (ou 0,24 m) et un couple à transmettre de 40 000 N · m, on a alors :

- surface de collage (mm^2) : $\pi\,240\,L$
- effort réparti résultant du couple : $2 \times 40\,000/0,24 = 330\,000$ N

d'où $1 = 33\,000/\pi\,240\,L$

et $L = 33\,000/\pi\,240 = 43,8$ mm

Cette longueur indicative ne tient pas compte du coefficient de sécurité à appliquer pour le vieillissement, la fatigue vibratoire, les efforts de traction axiaux éventuels, etc. Étant donné la nature de la résine du stratifié (époxyde), un adhésif époxyde serait tout à fait indiqué pour cette application.

Dans tous les cas recensés d'arbre de transmission, on trouve les choix suivants de conception :

- les fibres renforçantes sont en verre ou/et carbone ;
- la résine est toujours de l'époxyde ;
- les couches de fibres sont orientées à $\pm 45^\circ$, 90° et 0° ou un angle très faible de 10 - 12° ;

— la mise en œuvre est du type enroulement filamentaire. En théorie, il faut des fibres à $\pm 45^\circ$, pour transmettre le couple, à 0° pour la rigidité en flexion et 90° pour la résistance au flambement en torsion ;

— les critères de dimensionnement sont la vitesse critique de rotation, la résistance au flambement en torsion, la rigidité et la tenue au cisaillement ;

— les méthodes de calcul peuvent être à base de formules simplifiées, mais on doit envisager un calcul par éléments finis prenant en compte les aspects dynamiques ;

— les jonctions sont quasiment toujours avec un blocage mécanique, par section polygonale, par rivetage ou par serrage, complété par un adhésif.

La phase expérimentale consiste à mesurer la vitesse critique, la tenue en flexion et en torsion, la résistance de l'assemblage, la tenue au choc, la durée de vie, entre autres.

La figure 14 donne l'organigramme pour faire le choix de la structure et de la géométrie du tube d'arbre.

6.4.3 Robinet à papillon

Il s'agit de proposer une nouvelle gamme en remplacement des robinets à papillon en alliage de cupro-aluminium (limite élastique = 180 MPa, module d'élasticité = 100 000 MPa, densité = 8). L'obturateur en cupro-aluminium de diamètre 80 mm pèse 300 g et a un coût de revient fabrication de 8,5 F (épaisseur générale de matière : 7 mm, avec 2 renflements de matière en haut et bas, de $\varnothing 20$ mm pour le logement des axes de manœuvre $\varnothing 10$ mm, profondeur 15 mm. Les séries de fabrication sont de 10 000 modèles par an. La pression maximale du fluide est de 10 bar.

Le matériau doit résister à l'eau et à un nombre maximal de produits chimiques différents. La température n'est pas imposée mais il faut préciser la température limite acceptable pour le matériau retenu.

■ Choix du matériau et de la technique de mise en œuvre

Par rapport aux versions métalliques existantes, la géométrie ne peut être modifiée que si le nouveau profil n'augmente pas la perte de charge en position ouverte. Ne pouvant pas augmenter les sections de matière, le choix doit s'orienter vers des polymères ayant

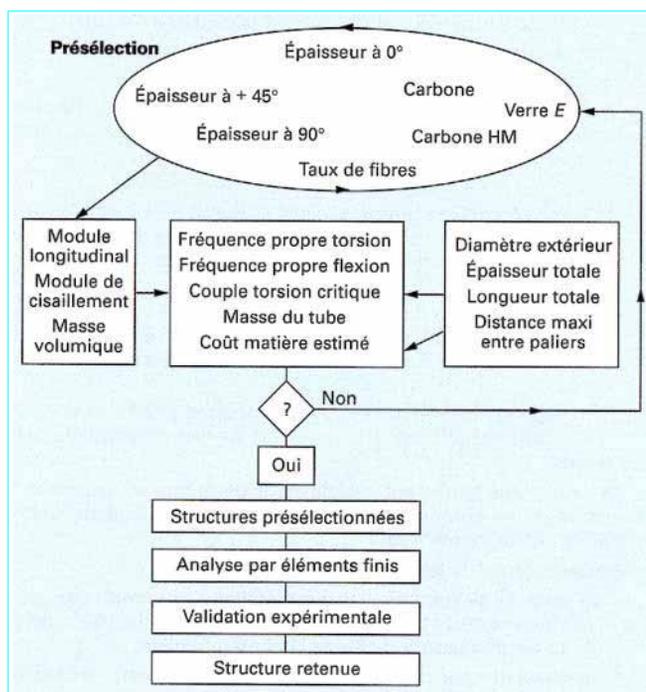


Figure 14 – Choix de la structure et de la géométrie du tube d'arbre

les mêmes limites élastiques que le cupro-aluminium, c'est-à-dire de l'ordre de 180 à 200 MPa (en flexion) (tableau 25) et parmi ceux-ci :

- les plastiques moulés par injection : polyaryl-amide, polyamide 6-6, PPS et PEEK, tous renforcés de fibres de verre ;
- les thermodurcissables moulés par compression : SMC polyester-verre.

Après une analyse technico-économique, compte-tenu notamment des séries de fabrication et du principe qu'une pièce moulée par injection a un prix de revient fabrication égal à 2 fois son prix matière, le choix s'est porté sur une référence PPS-40 % de fibres de verre. Des inserts introduits par Ultra-Sons serviront de supports à l'axe de rotation du papillon. La pièce pèse 300 g en cupro-aluminium de densité 8. Elle pèse $300 \times 1,6/8 = 60$ g en PPS. On peut s'attendre à un prix de pièce moulé en grande série, de l'ordre de $2 \times 70 \times 0,06 = 8,4$ FHT (pièce en sortie de moulage avant finition, c'est-à-dire mise en place des inserts). Le prix est sensiblement équivalent à celui de l'obturateur en cupro-aluminium, pour un gain de masse de 240 g sur une pièce qui en pesait 300.

■ Analyse mécanique

Dans ce cas, le cahier des charges veut qu'il s'agisse de remplacer pièce par pièce un élément métallique par un matériau de limite élastique équivalente (on rappelle qu'il faut éviter ce principe de remplacement pièce pour pièce, mais ici le cahier des charges géométrique est très limitatif) ; une vérification est faite expérimentalement des déformations sous la pression nominale de 10 bar pour vérifier l'étanchéité, car le module d'élasticité du polymère est très inférieur à celui du PPS-40 % verre bien que ce matériau soit parmi les plus rigides des plastiques injectés.

■ Essais

Une vérification de l'étanchéité à la fermeture est faite pour s'assurer que la moindre rigidité du plastique par rapport au cupro-aluminium n'entraîne pas de fuites sous la pression du fluide, en particulier aux extrémités du diamètre perpendiculaire à l'axe de manœuvre. Dans le cas de dimatériaux, il faut bien vérifier que les dilatations thermiques différentielles ne nuisent pas à l'étanchéité ou au bon fonctionnement.

6.4.4 Réservoir sous pression

Un réservoir doit contenir de l'eau chaude avec les caractéristiques suivantes :

- température de l'eau : 60 °C ;
- pression de service : 4 bar ;
- durée de vie espérée : 10 ans ;
- volume : 200 L ;
- être alimentaire.

La pièce est reliée à un tuyau d'arrivée d'eau et à un autre pour l'évacuation. Elle comporte également un système de chauffage thermostatique pour le maintien en température. L'ensemble doit pouvoir être démonté et retiré du réservoir pour la maintenance et l'entretien (changement de sonde thermique).

■ Choix du matériau et du procédé

On peut recenser plusieurs types de choix de matériaux, parmi les plus souvent employés pour la fabrication d'enceintes sous pression :

- *le liner* (revêtement interne assurant l'étanchéité ou une protection anti-corrosion) : acier, titane, aluminium, alliage cuivreux, thermoplastique (polypropylène) ou élastomère (silicone ou butyl) ;
- *la structure mécanique* : fibres de verre, carbone ou Kevlar et résine époxyde, polyester, voire polyimide ;
- *la fabrication* : enroulement filamentaire ;
- *la conception* :

- une enveloppe métallique (calculée pour les 2/3 de la pression de travail) et un frettage circonférentiel sur la partie cylindrique (calculé pour le dernier tiers),
- une enveloppe métallique mince (calculée pour 1/3 de la pression de travail) et un enroulement mixte (polaire et frettage circonférentiel) calculé pour assurer les 2/3 de la pression,
- une enveloppe non métallique (plastique ou élastomère) qui n'est pas prise en compte dans le calcul et assure seulement l'étanchéité à la pression.

Pour une valeur PD faible (produit de la pression et du diamètre), on peut éventuellement envisager une *fabrication sans liner* en tenant compte que les capacités en plastique renforcé perdent leur étanchéité bien avant la pression de rupture quand elles sont soumises à une pression interne. Cette étanchéité peut alors être assurée par un *gel-coat* et l'épaisseur adéquate de structure ou un revêtement souple du type élastomère mis après moulage par coulée, centrifugation ou rotomoulage.

Dans ce cas de pièce où il n'y a pas de liner servant de support à l'enroulement des fibres, *la mise en œuvre peut être réalisée sur un mandrin démontable, soluble ou fusible, voire gonflable*.

Un mandrin démontable, ou expansible mécaniquement, pourrait convenir pour de grandes pièces.

Un mandrin fusible constitué d'un alliage à bas point de fusion (étain-bismuth) fabriqué par coulée sous pression a l'inconvénient de poser des problèmes de toxicité. En plus, il reste toujours quelques particules de l'alliage en surface de la pièce moulée, qui ne sont pas du tout alimentaires (à cause de la présence de bismuth notamment).

Le mandrin en résine acrylique chargée ou en alcool polyvinylique, soluble à l'eau, peut être choisi si l'on souhaite une grande précision des cotes intérieures. Le mandrin soluble est moulé par injection (corps creux), puis *récupéré* par circulation d'eau chaude à l'intérieur du ballon polymérisé. Pour cette géométrie, il est nécessaire de mouler deux demi-coquilles à paroi mince, et de les assembler par soudage. Ce type de mandrin a l'inconvénient de nécessiter une opération complémentaire pour sa fabrication qui revient à fabriquer un liner, à la différence près du prix matière que l'on récupère en très grande partie.

La dernière technique envisagée est le mandrin gonflable qui convient si les précisions souhaitées ne sont pas trop grandes. L'enroulement est fait sur un mandrin en élastomère rigide ou tissu enduit à base de silicone ou *Téflon* (par exemple) que l'on récupère par dégonflage. Quelques essais préalables permettent de définir

la pression interne nécessaire pour supporter la tension des fibres pendant l'enroulement. Le mandrin doit avoir une partie rigide pour l'entraînement en rotation sur la machine et l'appui sur la contrepointe (effort axial de compression).

Le tableau 26 compare les deux techniques à mandrins solubles et gonflables.

Analyse mécanique

Les formules simplifiées de résistance des matériaux appliquées aux enceintes de diamètre D , sous pression interne p avec effet de fond montre que la contrainte radiale est deux fois plus grande que la contrainte axiale dans la paroi d'épaisseur e ($\sigma_r = pD/2e$ et $\sigma_a = pD/4e$). On peut être tenté de faire en sorte d'avoir un équilibre des contraintes dans le stratifié $\sigma_r = \sigma_a$. Il en résulte une relation fixant l'angle d'enroulement θ (angle d'inclinaison des fibres par rapport à l'axe de l'enceinte) : $\tan^2 \theta = 2$, d'où un angle voisin de 55° .

L'analyse d'un stratifié constitué de fibres à 55° à l'aide d'un logiciel interne au CETIM donne les caractéristiques suivantes, avec des fibres de verre E et une résine polyester standard :

- module axial = 9 566 MPa ;
- module radial = 15 833 MPa ;
- module de cisaillement = 9 914 MPa.

Dans le cas où il n'y a pas de liner étanche, le perlage, c'est-à-dire la possibilité pour le liquide sous pression de cheminer à travers la

paroi du stratifié jusqu'à l'extérieur, de microfissuration en microfissuration, intervient théoriquement à partir d'une contrainte dans le matériau de 40 MPa. L'apparition du perlage, sans être aléatoire, est difficilement définie par théorie de manière précise. On peut noter que les fabricants de tubes en matériaux composites proposent, dans leurs catalogues, des structures dont la résistance à la rupture est d'environ 10 fois la pression de service (coefficient de sécurité par rapport à la rupture) pour tenir compte du perlage. Ces tubes, destinés à véhiculer des liquides sous pression, n'ont pas de liner mais un *gel-coat* sous forme de voile de surface abondamment imprégné de résine, mis sur le mandrin au début de l'enroulement. Le coefficient de sécurité par rapport au perlage est en général compris entre 3 et 4. Un enroulement à 55° ne peut pas recouvrir jusqu'à l'axe de la pièce. Cela nécessite de recouvrir les fonds de l'enceinte avec une pièce complémentaire ou une stratification manuelle avant l'enroulement.

Le calcul pour un stratifié constitué d'un enroulement de fibres à $\pm 10^\circ$ donne (rigidité avant la première rupture, domaine dans lequel doit se trouver la pression de service) :

- module axial = 26 367 MPa ;
- module radial = 8 031 MPa ;
- module de cisaillement = 2 807 MPa.

Tableau 25 – Comparaison des propriétés de différents polymères

Matériau	polyaryl-amide 60 % verre	polyamide 6-6 30 % verre	PPS 40 % verre	PEEK 20 % carbone	SMC 33 % verre
Flexion (MPa)	200	180	200	200	200
Module d'élasticité (MPa)	18 200	7 400	11 700	11 000	15 000
Densité	1,77	1,44	1,6	1,5	1,8
Température de fléchissement sous charge (°C)	226	> 200	260	300	150
Tenue chimique	altérée par l'eau, les bases fortes et les acides	altérée par l'eau et les acides	très bonne	très bonne	très bonne avec une résine de base adéquate
Prix (FHT/kg)	40	30	70	500	30

Tableau 26 – Caractéristiques comparées des techniques à mandrins solubles et gonflables

Caractéristiques	Mandrin soluble	Mandrin gonflable
Matières et matériels nécessaires	Investissement d'une presse à injecter et de l'outillage nécessaire à la fabrication. Montage pour dissolution des mandrins. Achats de matières (résine acrylique et charges).	Montage pour gonflage des mandrins. Achat de mandrins gonflables ou fabrication intégrée.
Mise en œuvre	Moulage des mandrins.	Gonflage.
	Mise en place sur la machine d'enroulement. Enroulement de la cuve. Polymérisation.	
	Récupération par dissolution à l'eau chaude (quelques minutes).	Dégonflage (quasi instantané).
Recyclage du mandrin	Compléments de matière à prévoir selon le taux de récupération (> 95 %).	Renouvellement du mandrin par usure après un certain nombre de fabrications de cuves (1 000 – 10 000 ou plus selon sa nature).
	Cotes internes de la pièce à la précision des cotes externes du mandrin (rigide).	Cotes internes de la pièce selon la pression de gonflage du mandrin.

Ainsi, pour un stratifié d'enroulement $\pm 80^\circ$ (angles complémentaires à $\pm 10^\circ$), il suffit d'invertir les adjectifs *radial* et *axial* :

- module axial = 8 031 MPa ;
- module radial = 26 367 MPa ;
- module de cisaillement = 2 807 MPa.

Le tableau 27 donne les caractéristiques comparées des différents types d'enroulements.

Une analyse par éléments finis a abouti à une épaisseur minimale de 2,5 mm avec un revêtement étanche de 0,5 mm. L'épaisseur est constante sur la zone cylindrique, mais l'enroulement filamentaire impose des surépaisseurs à chaque extrémité (figure 15).

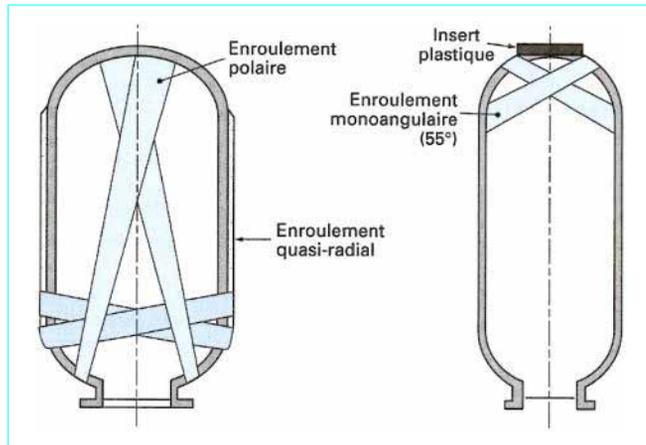


Figure 15 - Enroulements mono- et bi-angulaire

■ **Essais**

Des essais de pression interne sont effectués avec suivi de la dégradation avant rupture par émission acoustique.

■ **Mise en fabrication série**

Une analyse comparative des gammes de fabrication dans les deux cas mandrin soluble et mandrin gonflable est faite (figure 16).

Estimation du temps de cycle : les machines peuvent enrouler à raison de 1 mètre de roving par seconde. Par sécurité et compte tenu de la géométrie de la pièce (pièce fermée avec embouts et non pas tubulaire cylindrique sur quelques mètres de longueur), nous prendrons 0,5 m/s.

Si on choisit un roving 2400 tex, comme référence, sa masse est de 2,4 kg par 1 000 m. Une évaluation de la masse de fibre donne environ 5,4 kg de fibres de verre par cuve, soit :

$$1\ 000 \times 5,4 / 2,4 = 2\ 250\ \text{m de roving 2400 tex}$$

Il en résulte un temps d'enroulement, fonction du nombre de roving mis côte à côte, enroulés en même temps :

$$\text{avec 1 roving (référence)} = 4\ 500\ \text{s}$$

$$\text{avec 16 roving} = 280\ \text{s (environ 5 min)}$$

Il existe des machines d'enroulement avec lesquelles on peut enrouler, simultanément, plusieurs éléments de structure identique mis bout à bout.

En choisissant ce type de machine à 3 postes simultanés, on peut alors compter sur environ 60 cuves par heure dans ces conditions de vitesse. Une fabrication en équipe du type 2 x 8 pourrait alors en fabriquer 960 par jour, sans tenir compte des rebuts, temps de maintenance sur machine, etc.

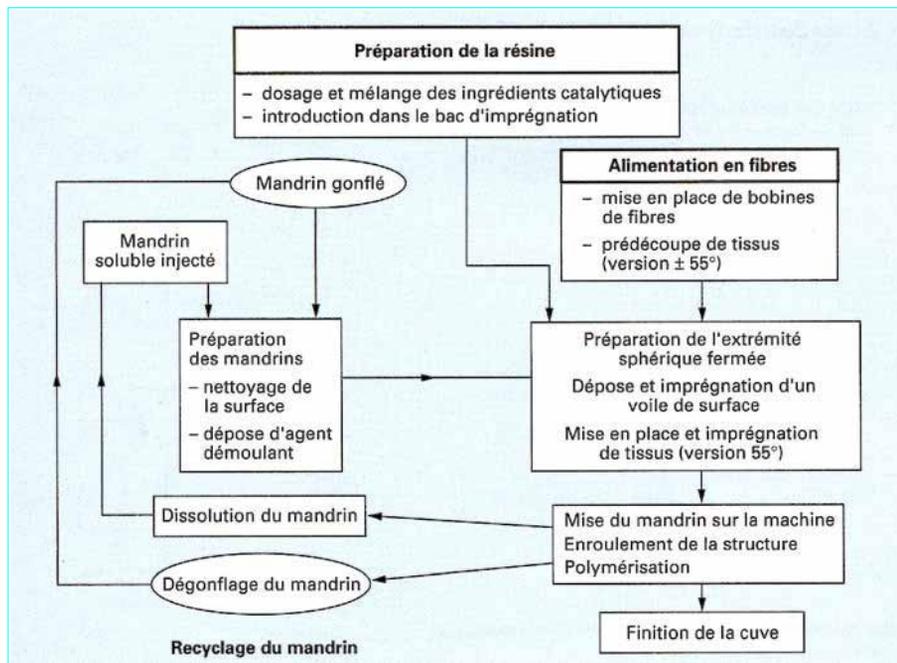


Figure 16 - Gammes de fabrication des cuves

Tableau 27 – Caractéristiques comparées des différents types d'enroulements

Solutions	Observations
$\pm 55^\circ$ et voile de surface imprégné de résine avant enroulement de la structure	<ul style="list-style-type: none"> – relativement équilibré en contrainte, – calotte nécessaire à l'extrémité fermée, – mise en œuvre du revêtement étanche avant enroulement sur le mandrin avec la même résine, – possibilités de fuites entre structure et calotte plastique sauf si la calotte est en tissu imprégné de la même résine.
$\pm 55^\circ$ et revêtement élastomère après polymérisation	<ul style="list-style-type: none"> – relativement équilibré en contrainte, – calotte nécessaire à l'extrémité fermée, – opération de finition nécessitant un montage spécial, une opération complémentaire, une matière spécifique, etc.
$\pm 10^\circ/\pm 80^\circ$ et voile de surface imprégné de résine avant enroulement de la structure	<ul style="list-style-type: none"> – comportements axial et radial dissociés, – mise en œuvre du revêtement étanche avant enroulement sur le mandrin avec la même résine.
$\pm 10^\circ/\pm 80^\circ$ et revêtement élastomère après polymérisation	<ul style="list-style-type: none"> – comportements axial et radial dissociés, – opération de finition nécessitant un montage spécial, une opération complémentaire, une matière spécifique, etc.

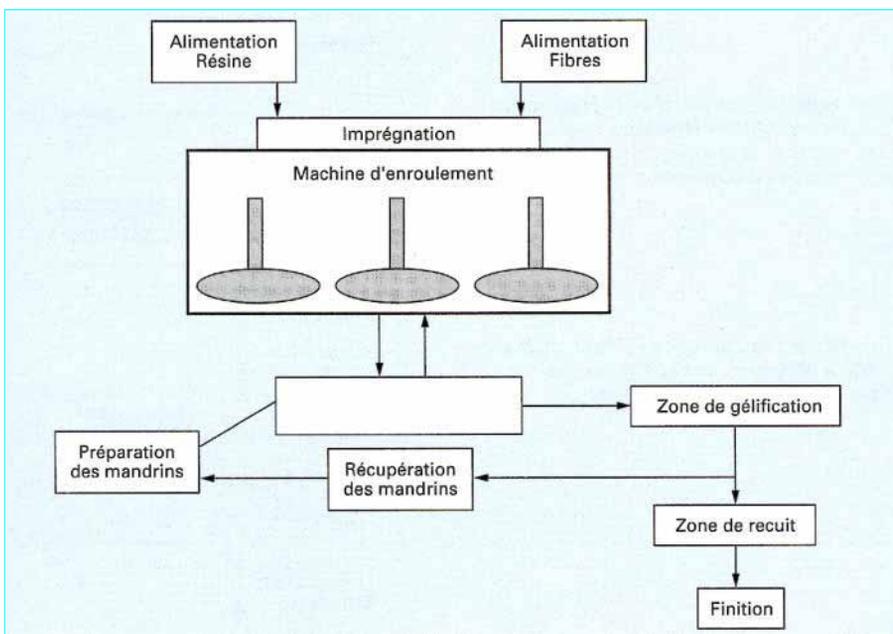


Figure 17 – Implantation d'atelier pour la fabrication avec mandrins gonflables

Les manipulations nécessaires pour un cycle aboutissant à 3 cuves enroulées simultanément, sont :

- début de cycle ;
- mise en place de l'ensemble des 3 mandrins ;
- amorçage des fibres (2 ou 3 tours du côté embout ouvert de la cuve) sur chacun des 3 postes ;
- enroulement en temps masqué (durée d'enroulement = 5 min) :
- préparation des mandrins pour le cycle suivant, mise du démoulant, puis du voile, etc., vérification de l'alimentation de résine et de fibres ;
- fin d'enroulement ;
- coupe des *roving* aux 3 postes ;

- dépose de l'ensemble enroulé pour aller vers la polymérisation ;
- fin de cycle.

Dans le cas *mandrin souple*, il y a circulation d'eau chaude à l'intérieur pour dissoudre le mandrin pendant 10 à 15 min. Dans le cas *mandrin gonflable*, il y a dégonflage et retrait du mandrin (durée inférieure à la minute).

Ainsi, pour assurer la continuité de la chaîne de fabrication (figure 17), il faudra un nombre de mandrins gonflables inférieur à celui des mandrins solubles.

Introduction aux plastiques et composites en mécanique

par **Alain DESSARTHE**

Ingénieur responsable du service Conception-industrialisation des polymères et composites du Centre technique des industries mécaniques (CETIM)

Données économiques

Prix des matières premières	
Matériaux	Gamme de prix ⁽¹⁾ (F/kg)
Aminoplaste, polyéthylène, PVC, polypropylène, phénolique	5 à 10
Polystyrène, résine polyester, SAN	10 à 15
Acrylique, PMMA, PET, ABS, Cellulosique, PBT	20 à 25
PPO, PA6 & 66, polycarbonate, acétal, PPS, époxyde, PU	25 à 35
PA11, polysulfone	60 à 90
PTFE, polyéthersulfone, PVDF, LCP	100 à 150
PEEK	500 et plus

(1) prix de la matière de base achetée par tonne ; certaines références particulières peuvent être jusqu'à 2 fois plus chères (version ignifugée, avec additif spécial, etc.).

Productions mondiales annuelles de matériaux (ordres de grandeur 1994)	
Matériau	Production
Acier	750 000 kt
Plastique	75 000 kt
Aluminium et alliages	16 000 kt
Composite	3 000 kt
Fibre de verre	800 kt
Fibre d'aramide	15 kt
Fibre de carbone	8 kt

Répartition par technique de moulage		
Technique de moulage	Proportion ⁽¹⁾	Observations
Extrusion	37,8 %	films : 20,4 %, tubes : 7,9 %, profilés : 3,6 %, câbles : 3,2 %, fibres : 2,7 %
Injection	24,8 %	plastiques techniques : 3,5 %, grande diffusion : 21,3 %
Soufflage	13,9 %	PVC : 8,1 %, polyéthylène : 5,1 %, divers : 0,7 %
Thermoformage	5,4 %	emballages : 3,5 %, pièces techniques : 1,9 %
Calandrage-enduction	4,1 %	
Compression-transfert	0,8 %	
Rotomoulage	0,3 %	
Composites	5 %	sur 100 % : SMC : 27 %, injection TP renf. : 25 %, contact : 14 %, BMC : 8 %, projection : 7 %, RTM : 6 %, RIM : 3 %, stratifiés industriels : 3 %, enroulements : 2 %, TRE : 1 %, pultrusion : 1 %

(1) 7,9 % des polymères sont utilisés sous forme de mousses (2,9 % en polystyrène)

Consommation et domaines d'application en France (1993)		
Matériau	Consommation	Applications principales
PVC	870 kt (2/3 PVC rigide – 1/3 PVC souple)	rigide : 28 % tubes et raccords, 9 % profilés, 9 % films, 8 % bouteilles, 8 % fenêtres souple : 8 % câbles électriques, 7 % films, 5 % revêtements sol, 4 % tube et profilés
PE bd	720 kt	75 % films, 7 % revêtements extrudés, 6 % injection, 4 % câbles isolants, 3 % tubes
PE hd	320 kt	35 % soufflage, 23 % injection, 15 % tubes et plaques, 18 % films, 4 % rubans et fibres
Polypropylène	435 kt	40 % injection (automobile 11 %), 55 % extrusion (11 % tuyaux, plaques + 18 % films)
Polystyrène	360 kt	44 % emballages, 15 % pièces techniques, 13 % équipements maison, électroménager, 5 % réfrigérateurs
ABS	70 kt	28 % automobile, 24 % équipements maison, électroménager, 14 % électronique, 5 % tubes et raccords
Polyester insaturé	71 kt	tout secteur
PA 6	11 kt (50 % renforcés)	33 % électricité/électronique, 27 % automobile
PA 66	45 kt (50 % renforcés)	51 % automobile, 32 % électricité/électronique
PA 11, 12	4 kt	60 % tubes extrudés
Acétal	20 kt	27 % transport, 15 % briquets, 15 % électrotechnique, 15 % électroménager
Polyester PET	2 kt, 6 kt en soufflage	49 % flacons boisson gazeuse, 23 % flacons eau, 14 % flacons divers, 10 % électricité, 9 % cosmétique
Polyester PBT	5 kt	43 % électronique, 32 % automobile, 12 % équipements maison, électroménager, 5 % tubes et profilés
Polycarbonate	18 kt	32 % électronique, 26 % plaques, 20 % luminaire extrudé, 10 % CD, 5 % transport, 2 % médical
PMMA	26 kt	70 % plaques
PPO (Noryl, GEP)	8 kt	35 % automobile, 25 % électronique, 15 % bureau, 10 % radio-TV
Fluorés	2 kt, PFA 50 t, FEP 200 t, ETFE 100 t	40 % chimie et semi-conducteurs, 25 % câbles électriques, 25 % revêtements
Polysulfone	200 t	médical, chimie
PEI	100 t	30 % éclairage, 15 % électronique, 10 % médical
PPS	700 t	65 % électronique
LCP	10 t	70 % électronique, 24 % audio/vidéo

Laboratoires spécialisés

Centre technique des industries mécaniques, département Plastiques et Composites (CETIM)

École nationale supérieure des techniques industrielles et des mines de Douai

Institut des matériaux composites

Laboratoire de recherches et de contrôle du caoutchouc et des plastiques (LRCCP)

Pôle de plasturgie de l'Est

Pôle européen de plasturgie

Revue périodiques françaises

Annuaire France-Plastiques et Annuaire France-Composites

Caoutchoucs et Plastiques

Composites. Plastiques renforcés. Fibres de verre textiles

Plastiques modernes et élastomères

Expositions internationales périodiques spécialisées

Journées européennes des composites (France)

Kunststoffe (Allemagne)

Europlastiques (exposition se déroulant dans un pays d'Europe par roulement)

Journées de la Society of Plastics Industry (États-Unis)

Logiciels de calculs et de rhéologie

Logiciels de calculs par éléments finis de structures éventuellement composites (fournisseur)

Adina
ALGOR (CADLM)
ANSYS (Swanson Analysis Systems Inc.)
ASCA (Technomic Publishing Company)
COMPOSIC (Framasoft CSI)
COSMOS (Dymag)
MARC (Marc Analysis Research Corporation Europe)
MSC/ABAQUS (MacNeal Schwendler GmbH)
MSC/NASTRAN (MacNeal Schwendler GmbH)

PATRAN (P
DA Engineering)
SAMCEF (Samtech)

Logiciels de rhéologie pour simulation d'injection plastique (fournisseur)

STRIM (Matra datavision)
MOLDFLOW (Imap)
Ideas Plastics (SDRC Engineering Services Ltd)
TM-Concept (Afcoplast)
Cadmould-IKV (Material SA)
C-Mold (Rheo Technology Consulting)

Les fournisseurs sont susceptibles de changer à tout moment car il y a de fréquents changements de revendeurs dans le domaine des logiciels de calcul.