

Traitement des eaux avant utilisation. Matières particulaires

par **Pierre MOUCHET**

Ingénieur Agronome-GREF

Ancien Directeur à la Société Degrémont

Chargé de cours à l'École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEES)

1. Présentation de la clarification	G 1 170 - 4
2. Coagulation	— 4
2.1 Principes de base.....	— 4
2.2 Chimie de la coagulation	— 6
3. Flocculation	— 8
3.1 Phénomène de base.....	— 8
3.2 Aspects pratiques de la flocculation. Flocculants.....	— 8
4. Décantation	— 9
4.1 Décanteurs statiques (simples ou lamellaires)	— 10
4.2 Décanteurs à recirculation de boues.....	— 10
4.3 Décanteurs à lit de boues.....	— 10
4.4 Décanteurs lamellaires à lit de boues	— 11
4.5 Décanteurs lamellaires à recirculation de boues.....	— 11
4.6 Décanteurs à floc lesté	— 11
4.7 Récapitulation des principaux décanteurs	— 11
4.8 Problèmes de décantation	— 14
5. Flottation	— 14
6. Filtration	— 15
6.1 Généralités	— 15
6.2 Paramètres fondamentaux de la filtration en profondeur	— 15
6.3 Principaux types de filtres à matériau granulaire	— 17
6.4 Filtration sur support.....	— 18
Pour en savoir plus	Doc. G 1 173

Le traitement des eaux de chaudières et de refroidissement faisant l'objet d'un autre article, celui-ci et les deux suivants [G 1 171], [G 1 172] ne sont relatifs qu'à celui des **eaux directement impliquées dans les procédés industriels** (et éventuellement des eaux des services généraux lorsqu'elles sont préparées à l'usine) ; les divers critères de qualité exigés pour les eaux de procédé étant détaillés par ailleurs, il s'agit maintenant de voir les moyens dont on dispose pour atteindre ces objectifs, lorsque la matière première est l'eau naturelle (les techniques de recyclage et de réutilisation sont passées en revue dans un autre article [G 1 330]). Seules les eaux douces sont prises en considération, les eaux de mer ressortant des techniques spécifiques de dessalement par distillation ou osmose inverse.

Que la ressource soit superficielle (rivière, lac naturel ou artificiel) ou souterraine, l'eau brute qu'elle fournit à l'utilisateur présentera dans le cas le plus général l'ensemble des caractéristiques défavorables suivantes :

- **critères organoleptiques** : turbidité, couleur, goût, odeur ;
- **critères chimiques**, correspondant à des constituants :
 - soit **naturellement présents dans l'eau** : sels minéraux (exemple : dureté, sulfates, chlorures...), fer, manganèse, ammonium, fluorures, arsenic, matières organiques (notamment les substances humiques responsables de la couleur)...
 - soit **apportés par la pollution** : micropolluants minéraux (métaux lourds, nitrates) ou organiques (pesticides, hydrocarbures, phénols, détergents...);
- **critères biologiques** : il s'agit surtout des germes pathogènes apportés par la pollution fécale, mais aussi des organismes dont l'eau est l'habitat naturel (microalgues planctoniques ou phytoplancton, micro-invertébrés ou zooplancton, bactéries de l'environnement).

Pour éliminer ou corriger tous ces paramètres défavorables, le traiteur d'eau dispose d'un certain nombre d'outils qui doivent d'abord être passés en revue : décanteurs ; flottateurs ; lits de matériaux granulaires à effet filtrant, adsorbant et/ou neutralisant ; réacteurs de floculation ou d'oxydation ; échangeurs d'ions ; membranes, etc. Ces outils seront combinés dans des filières plus ou moins complexes, suivant l'industrie considérée et l'usage de l'eau [G 1 172].

Le **présent article** décrit les traitements d'**élimination de tous les constituants insolubles** (on dit aussi « **particulaires** ») contenus dans les eaux superficielles et certaines eaux souterraines directement influencées à partir de la surface du sol : matières en suspension inertes (microsable ; limons ; colloïdes : argiles, formes précipitées de divers métaux, matières organiques floculées, etc.) ou organismes vivants (phyto- et zooplancton, plus une fraction significative des bactéries et des virus).

L'ensemble de ces traitements est généralement désigné sous le nom de **clarification**, car leur objectif est avant tout d'obtenir une eau claire ; toutefois, ils permettent souvent d'éliminer aussi une proportion notable de quelques substances dissoutes, par exemple : macromolécules organiques (en particulier celles qui constituent la couleur réelle de l'eau), certains métaux lourds.

Après un prétraitement approprié, destiné à éliminer les matières insolubles les plus grossières, un traitement de clarification, dans sa version la plus complète, est constitué de quatre phases successives : coagulation, floculation, décantation ou flottation, filtration.

L'article passe en revue ces différentes phases :

- réactifs et technologie de la **coagulation** et de la **floculation** (en y incluant les conséquences éventuelles de l'emploi de certains coagulants sur la composition minérale de l'eau) ;
- principes et appareils des différentes méthodes de **décantation** : statique, à contact de boues (lit de boues ou recirculation de boues), à floc lesté, lamellaire (ce dernier type de décantation pouvant être combiné avec chacune des autres techniques) ;
- examen de la **flottation**, qui constitue une variante intéressante à la décantation pour clarifier les eaux peu chargées en matières en suspension, mais colorées et/ou riches en microalgues planctoniques ;
- les différents modes de la **filtration** classique (un paragraphe spécifique sera consacré à la filtration sur membranes [G 1 171]) : en profondeur sur milieu granulaire (à sable ou multicouche) ou en surface sur support (filtres à cartouches, à bougies ou à précouche) ; la filtration sur sable est particulièrement développée dans ce chapitre, du fait de la variété de ses appareils (technologie, mode de lavage...) et de l'importance de ses applications.

Après avoir complété le présent article par l'examen des traitements d'élimination ou de correction des composés dissous [G 1 171], le dernier article [G 1 172] sera consacré aux filières de traitement et à leur mise en œuvre dans quelques industries majeures.

L'ensemble de ces trois articles montre que, dans son métier, le traiteur d'eau dispose de toutes les applications du génie chimique : neutralisation, oxydation, précipitation, adsorption, séparation solide-liquide, séparation gaz-liquide, etc. Les technologies appliquées pour leur mise en œuvre seront souvent familières aux industriels, car il existe de nombreuses similitudes entre les appareils utilisés en traitement des eaux et ceux que l'on peut trouver dans divers procédés industriels ; parfois, d'ailleurs, il s'agira d'un véritable transfert de technologie entre les deux domaines, comme ce fut le cas pour la flottation par exemple [1] ou [A 5 350], d'abord utilisée dans l'industrie minière qui, du reste, est l'un des secteurs où l'on trouve le plus grand nombre d'appareils également appliqués en traitement des eaux et des boues : décanteurs épaisseurs, hydrocyclones, centrifugeuses, filtres divers (à sable ; à bande ; sous vide ; filtres-presses), etc. D'autres techniques seront également communes à l'eau et à l'industrie, comme l'échange d'ions ou les membranes (hydro-métallurgie ; industries agroalimentaires), l'ozone (papeterie), etc., certaines d'entre elles ayant leur origine dans le traitement des eaux.

Les techniques de préparation des eaux industrielles vont maintenant être passées en revue ; pour de plus amples renseignements, le lecteur pourra consulter des ouvrages spécialisés [2] [3] [4] [5] [6]. Dans de nombreux cas, on constatera de grandes similitudes avec le traitement des eaux de consommation [2] [7] [8] ou [C 5 200], qui s'apparente à tout ou partie de celui des eaux industrielles.

Le lecteur trouvera le tableau des « Sigles et notations » en page 5.

1. Présentation de la clarification

La clarification est l'élimination des matières en suspension, des matières colloïdales et des macromolécules susceptibles de communiquer à l'eau une **turbidité** ou une **couleur** indésirables. Il s'agit de matières organiques aussi bien que minérales, et les organismes vivants du phytoplancton (algues) et du zooplancton entrent également dans cette définition.

On peut distinguer deux catégories de procédés.

■ Traitements physiques

Ils sont appliqués lorsqu'il s'agit d'une simple séparation mécanique solide-liquide, sans introduction de réactifs :

- dégrillage (si possible, grille à nettoyage automatique) ;
- tamisage (vide de maille de l'ordre de 1 mm) ;
- microtamisage (vide de maille de l'ordre de la dizaine de micromètres) ;
- dessablage ;
- débouage ;
- déshuilage.

Dans le domaine du traitement des eaux naturelles, ces procédés ne constituent en général qu'un préalable à un traitement physico-chimique ou biologique, sauf certains cas particuliers : par exemple, microtamisage d'une eau ne contenant que du plancton de grande taille ; mais dans ce cas, une postdésinfection énergique est indispensable pour éviter les développements ultérieurs à partir des formes de reproduction ou de résistance (œufs, kystes, spores, etc.) qui ont traversé le traitement.

Pour de plus amples détails sur ces prétraitements, on pourra se reporter à l'article relatif aux *traitements physico-chimiques de dépollution des eaux industrielles*, ou encore à la référence [2].

■ Traitements physico-chimiques

Ils sont nécessaires pour clarifier les eaux contenant des colloïdes, c'est-à-dire la quasi-totalité des eaux superficielles, certaines eaux de sources issues de terrains karstiques, certaines eaux profondes contenant des acides humiques en pseudosolution colloïdale, etc. La clarification se subdivisera en trois étapes :

- **coagulation** : destabilisation des particules colloïdales et formation de micromicelles constituées d'hydroxyde métallique et de colloïdes ;
- **floculation** : rassemblement des micromicelles sous forme séparable de la phase aqueuse ;
- **séparation** des phases solide et liquide :

décantation ou flottation



filtration

La suite de cet article fait le point sur les différentes étapes des traitements physico-chimiques.

2. Coagulation

2.1 Principes de base

La difficulté de séparation des colloïdes présents dans une eau par simple décantation ou filtration provient du fait que ces particules, qui sont d'origine minérale (argiles), végétale (acides humi-

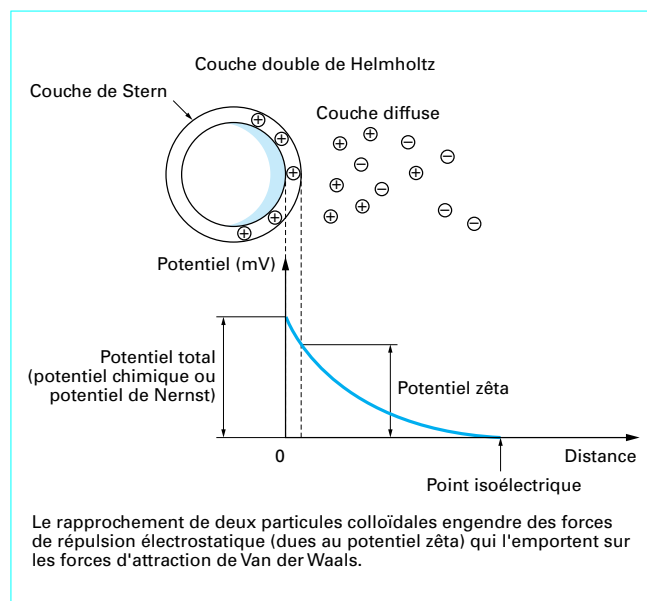


Figure 1 – Évolution du potentiel électrostatique en fonction de l'éloignement de la particule dans le cas de l'eau brute

ques ou fulviques, algues), animale (zooplancton), humaine (suspensions graisseuses, rejets ERU) ou industrielle (eaux résiduelles diverses), se trouvent dans l'eau à l'état de particules chargées électriquement (toujours négativement dans les eaux naturelles). La répulsion mutuelle exercée par ces particules les empêche de s'agglutiner sous l'effet des forces d'attraction naturelle (appelées à cette échelle forces de Van der Waals) et d'acquies ainsi une dimension suffisante pour devenir décantables ou filtrables (figure 1). On dit alors que la suspension est stable ; le mécanisme de sa destabilisation va être rapidement décrit dans ce qui suit ; on trouvera de plus amples explications dans l'article relatif aux *traitements physico-chimiques de dépollution des eaux industrielles*.

La **coagulation** consiste à ajouter à l'eau un électrolyte permettant de neutraliser les charges négatives qui sont à l'origine du maintien en suspension stable. On utilise généralement des sels d'un métal trivalent, Fe^{3+} ou Al^{3+} (figure 2).

Les charges positives de l'ion métallique neutralisant les charges négatives du colloïde, les particules peuvent alors se rassembler sous l'effet des forces attractives de Van der Waals et il se produit une précipitation simultanée et conjointe, sous forme d'un gel d'hydroxyde de fer ou d'aluminium, qui adsorbe le colloïde naturel coagulé. Ce gel amorphe se présente sous la forme de flocons que l'on va ensuite s'efforcer de faire grossir progressivement (§ 3) pour le séparer efficacement de l'eau dans les phases ultérieures de décantation et de filtration. L'ensemble de ces flocons est appelé le **floc**.

La coagulation est optimale pour une introduction de charges électriques positives correspondant à l'annulation du **potentiel zêta**, potentiel que l'on mesure en observant la vitesse de déplacement des particules colloïdales sous l'action d'un champ électrique dans un appareil d'électrophorèse dit **zétamètre**.

Pour la clarification de la plupart des eaux, on peut se contenter d'utiliser une dose de coagulant permettant d'obtenir un potentiel zêta voisin de -5 mV ; par contre, lorsqu'une eau est riche en

Sigles et notations	
Sigle ou notation	Définition
ABW	<i>automatic backwash</i> (marque déposée d'un filtre américain à lavage automatique)
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$	forme commerciale du sulfate d'alumine solide, avec 18 molécules d'eau de cristallisation
BP	basse pression (chaudières)
EB, ED, EF	eau brute, eau décantée (parfois, eau déminéralisée), eau filtrée
EPI-DMA	épichlorhydrine diméthylamine, formule d'un coagulant organique (polymère cationique de faible masse molaire)
ERI, ERU, ET	eaux résiduaires industrielles, eaux résiduaires urbaines, eau traitée
HP	haute pression (chaudières)
mCE	mètres de colonne d'eau (unité de pression généralement utilisée pour exprimer la perte de charge d'un filtre)
MES	matières en suspension (généralement exprimées en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	mètres cubes par heure et par mètre carré (vitesse de passage dans un décanteur, un filtre, etc.) ; unité équivalente au $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ et pouvant aussi s'écrire $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ou $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$
MF, NF, OI	microfiltration, nanofiltration, osmose inverse (procédés membranaires)
PACI	polychlorure d'aluminium (de l'anglais <i>poly[aluminium chloride]</i> ; s'écrit également PAC, mais ce sigle désigne aussi en anglais le charbon actif en poudre)
PCBA	polychlorure basique d'aluminium (fabriqué sur place, à partir de chlorure d'aluminium et de soude, pour la coagulation des eaux brutes)
POLYDADMAC	poly[chlorure de diallyldiméthylammonium], formule d'un coagulant organique (polymère cationique de faible masse molaire)
p.p.m.	partie (d'un corps) par million (de parties d'un autre corps) ; pour être homogène, cette unité de concentration doit exprimer un rapport entre des volumes ou entre des masses de corps solides, liquides ou gazeux ; son usage en traitement des eaux à la place du $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ou du $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ est incorrect, donc déconseillé mais n'induit pas une erreur importante lorsqu'il s'agit d'eaux douces dont la masse volumique est voisine de $1 \text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$
RO	<i>reverse osmosis</i> (osmose inverse en Anglais)
RPS	recirculation-précipitation-sédimentation (marque déposée d'un décanteur Degremont)
TAC	titre alcalimétrique complet (teneur en hydroxydes, carbonates et hydrogénocarbonates alcalins et alcalino-terreux), exprimé en °F (voir plus loin)
TCa	titre calcique (dureté due au calcium), exprimé en °F (voir plus loin)
TE	taille effective (d'un matériau filtrant)
TH	titre hydrotimétrique (dureté totale), exprimé en °F (voir plus loin)
TMg	titre magnésien (dureté due au magnésium), exprimé en °F (voir plus loin)
UF	ultrafiltration (procédé membranaire)
WAC	de l'anglais <i>Water aluminium chloride</i> , nom commercial d'un polychlorosulfate basique d'aluminium, coagulant en solution à 10 % d' Al_2O_3 ; produit en France par Elf Atochem
°F	degré français, unité de concentration valant 1/5 de milliéquivalent par litre et utilisée pour exprimer la valeur des différents titres d'une eau, dont les principaux sont le TAC et le TH (voir ces symboles plus haut)

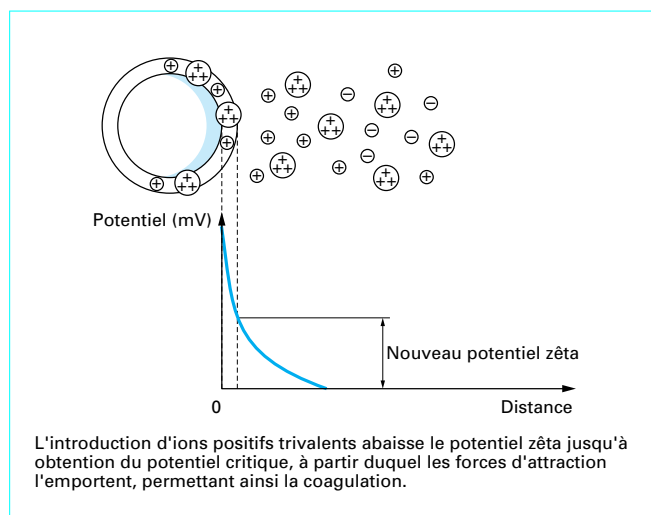


Figure 2 – Eau brute additionnée de coagulant

plancton ou en acides humiques, il est indispensable d'utiliser une dose de coagulant assurant l'annulation du potentiel zêta.

Il faut noter que la coagulation n'est correcte qu'à l'intérieur d'une zone de pH bien déterminée (pH supérieur à 4 pour le chlorure ferrique, compris entre 6 et 7 pour le sulfate d'aluminium). De plus, à l'intérieur même de cette zone, il existe toujours une plage de pH optimal, à doses égales de coagulant. Cette plage est parfois très étroite (de l'ordre de 0,2 unité de pH) et ne peut être déterminée qu'expérimentalement sur chaque type d'eau.

Les essais de laboratoire permettant de déterminer les conditions optimales de coagulation (essais de floculation, encore appelés *jar-tests*) doivent toujours comporter un essai effectué d'abord en utilisant uniquement le coagulant à des doses croissantes, ce qui a pour effet d'abaisser le pH à mesure qu'on augmente la dose de coagulant (comme on le verra plus loin (§ 2.2), la précipitation de l'hydroxyde à partir du sulfate d'aluminium ou du chlorure ferrique libère de l'acide sulfurique ou chlorhydrique) puis, si les résultats obtenus semblent insuffisants, en ajoutant des doses d'un réactif alcalin (soude ou chaux) permettant de refaire le même essai dans la plage de pH optimal, celle-ci ayant été déterminée au préalable par un essai à dose constante de coagulant et dose variable du réactif alcalin. Ceci est surtout nécessaire lorsqu'on a affaire à des eaux très douces et colorées.

Pour être efficace, la coagulation demande une dispersion immédiate du coagulant dans l'eau, afin que les charges électriques des particules colloïdales soient déchargées uniformément ; à cet effet, on utilise soit des mélangeurs statiques mis en place à l'intérieur d'une tuyauterie (système hélicoïdal, diaphragme, cône...) qui créent une turbulence suffisante pour permettre la diffusion instantanée du coagulant, soit des mélangeurs rapides qui comportent un agitateur du type à hélice ou à pales (turbine) mis en place dans une chambre de mélange spéciale (figure 3).

2.2 Chimie de la coagulation

Les réactifs coagulants sont présentés en encadré.

Il est souvent important de connaître l'influence de l'emploi d'un coagulant sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau traitée, notamment lorsque le taux de traitement est élevé, quand la clarification est suivie d'une déminéralisation par échange d'ions, etc.

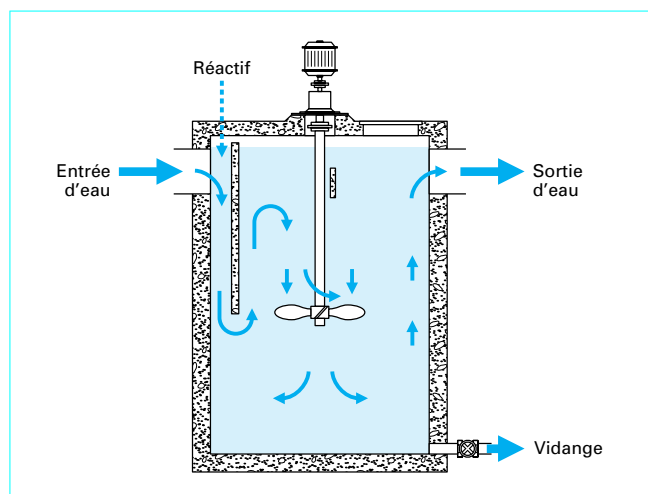


Figure 3 – Chambre de mélange avec agitateur rapide

Réactifs coagulants les plus généralement utilisés

■ Sulfate d'alumine (ou, mieux, d'aluminium) : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

Présentation :

- cristallisé (poudre, grains, noisettes, pains, etc.), qualité en France : 17-18 % Al_2O_3 ;
- solution à 600 ou 720 g · L⁻¹ environ de sulfate d'alumine cristallisé.

■ Chlorure ferrique : $FeCl_3$

Présentation :

- sublimé ou cristallisé ($FeCl_3$ ou $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) ;
- solution à 600 g · L⁻¹ de $FeCl_3$ environ.

■ **WAC, Aqualenc, PCBA (liquides) ou PACI (poudre)** : ce sont diverses formes de polychlorure basique d'aluminium ; ces réactifs sont moins acidifiants que le sulfate d'aluminium ou le chlorure ferrique et donnent souvent (mais pas toujours) naissance à un floc mieux décantable que celui obtenu à partir de sulfate d'aluminium.

■ Autres réactifs parfois mis en œuvre :

● Sulfate ferreux : $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

Présentation : en poudre.

Mise en œuvre : tel quel dans certains effluents industriels, ou après oxydation par le chlore (formation de **chlorosulfate ferrique** dont l'une des formes commerciales est le Clairtan ; voir plus loin la réaction chimique correspondante) pour le traitement des eaux naturelles.

● Sulfate ferrique : $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$

Présentation : en poudre.

● Aluminat de sodium : $NaAlO_2$

Présentation :

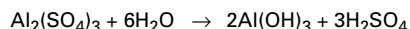
- en poudre ;
- en solution à 20 % (en masse) d' Al_2O_3 .

Ce dernier réactif est systématiquement choisi lorsque l'on veut abaisser la teneur en silice dissoute.

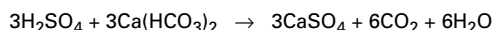
■ Avec le **sulfate d'aluminium** par exemple (cas le plus courant), la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium (qui formera les micromicelles en englobant les colloïdes déchargés électriquement) résulte de deux réactions successives d'hydrolyse du produit coagulant et

de neutralisation de l'acidité ainsi libérée par l'alcalinité (TAC) de l'eau :

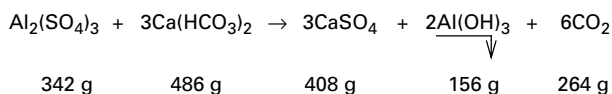
— hydrolyse du coagulant :



— neutralisation par le TAC :



— réaction globale :



342 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ correspondent à 666 g de produit commercial cristallisé $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$.

Calcul :

1 mole de sulfate d'aluminium $\rightarrow 2\text{Al}^{3+}$, soit 6 charges positives

$$1 \text{ eq} = \frac{666}{6} = 111 \text{ g} ; 1 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1} = 111 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

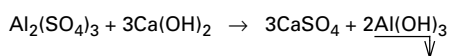
$$1 \text{ }^\circ\text{F} = \frac{1}{5} \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1} = 22,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}, \text{ ou encore } 10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \approx \frac{10}{22,2} = 0,45 \text{ }^\circ\text{F}$$

À partir des masses molaires respectives, on déduit que **10 g · m⁻³ (ou mg · L⁻¹) de sulfate d'aluminium commercial** (correspondant à 0,45 °F) :

- diminuent le TAC de 0,45 °F ;
- augmentent les sulfates de 0,45 °F ;
- forment 2,35 g · m⁻³ de floc d'hydroxyde d'Al ;
- donnent naissance à 4 g · m⁻³ de CO₂ libre.

La diminution du TAC et la libération de CO₂ libre abaissent le pH de l'eau ; dans les eaux très douces et acides, où l'alcalinité est insuffisante, l'emploi d'un réactif alcalin comme la chaux permet la neutralisation de l'acide fort libéré et le maintien d'un pH favorable à la précipitation totale de l'hydroxyde d'aluminium :



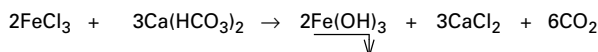
Par un calcul analogue au précédent, on déduit que :

666 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ réagissent avec 222 g de chaux éteinte, c'est-à-dire :

1 g · m⁻³ de chaux pure neutralisera exactement l'acidité apportée par 3 g · m⁻³ de sulfate d'aluminium commercial.

Toujours tenir compte du degré de pureté de la chaux commerciale à laquelle on a affaire.

■ Si on emploie du **chlorure ferrique**, la réaction globale du coagulant avec l'alcalinité de l'eau sera :



$$\begin{array}{cc} 325 \text{ g} & 486 \text{ g} \\ 10 \text{ g (0,92 }^\circ\text{F)} & 15 \text{ g} \end{array}$$

Calcul :

$$\text{FeCl}_3 = 162,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 54,17 \text{ g} \cdot \text{eq}^{-1}(\text{Fe}^{3+})$$

$$1 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1} = 54,17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$1 \text{ }^\circ\text{F} \text{ FeCl}_3 = \frac{1}{5} \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1} = \frac{54,17}{5} = 10,83 \text{ mg FeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$$

d'où :

$$10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (ou mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{) de FeCl}_3 \text{ pur} = \frac{10}{10,83} = 0,92 \text{ }^\circ\text{F}$$

et :

$$10 \text{ g (de solution à 41 \% FeCl}_3\text{) par m}^3 = 0,92 \times 0,41 = 0,38 \text{ }^\circ\text{F}$$

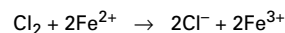
En pratique, 10 g · m⁻³ de solution commerciale de chlorure ferrique à 41 % de FeCl₃ :

- abaissent le TAC de 0,38 °F ;
- élèvent les chlorures de 0,38 °F.

Les taux de traitement les plus couramment appliqués sont récapitulés dans le tableau 1.

■ **Cas particulier du chlorosulfate ferrique**

Principe de sa fabrication à partir d'un effluent riche en sulfate ferreux :



Bilan de la formation du chlorosulfate ferrique :

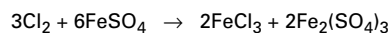


Tableau 1 – Taux de traitement usuels (en g · m⁻³)

Traitement	Sulfate d'aluminium cristallisé	Chlorure ferrique	
		Pur (FeCl ₃)	Solution 41 %
Floculation sur filtre	3 à 10	1,5 à 4	3,5 à 10
Décantation :			
— eaux peu chargées.....	15 à 30	6 à 12	15 à 30
— eaux de turbidité moyenne.....	30 à 60	12 à 25	30 à 60
— eaux très turbides.....	60 à 150	25 à 60	60 à 150
— eaux très colorées.....	100 à 250	40 à 100	100 à 250
— eaux riches en plancton	60 à 150	25 à 60	60 à 150

Dans 100 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, il y a environ 20 g de fer, réagissant sur 12,7 g de chlore. Il faut donc environ, théoriquement, une dose de chlore égale à 13 % de celle de sulfate ferreux cristallisé (en réalité, 11 à 12 % suffisent, à cause des impuretés du produit commercial). Cette dose est à ajouter à celle qui est nécessaire pour atteindre le break-point ([G 1 171], § 2.1.1) si la réaction se fait directement dans l'eau à traiter (mais il est préférable de préparer le chlorosulfate ferrique au préalable).

■ Coagulants organiques

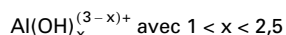
Dans certains pays, on remplace maintenant tout ou partie du coagulant minéral par un polyélectrolyte cationique de synthèse (mélamine-formaldéhyde, EPI-DMA, POLYDAD-MAC) ; ces réactifs de masse molaire relativement peu élevée (de l'ordre de 10^5) sont présentés en solution aqueuse et dilués en ligne juste avant injection dans l'eau à traiter ; leur taux de traitement usuel, exprimé en produit commercial, est généralement compris entre 5 et $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; leur avantage est, entre autres, de diminuer la production de boues et de ne pas modifier le pH ni la salinité de l'eau ; de tels produits ne sont pas encore agréés en France pour le traitement des eaux potables et ne peuvent donc pas être utilisés dans toutes les industries.

3. Flocculation

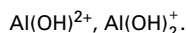
3.1 Phénomène de base

Reprenons l'exemple du **sulfate d'aluminium** : dans les réactions énoncées plus haut (§ 2.2), nous avons écrit qu'il apparaissait un précipité d'hydroxyde d'aluminium, que nous aurions pu aussi écrire $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ (la lettre s signifiant « solide », inverse de « dissous »).

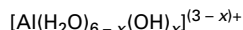
En fait, il ne s'agit ici que de réactions globales ; les mécanismes réels de formation de ce précipité gélatineux (ou **floc**) sont plus complexes et font intervenir des formes intermédiaires entre l'ion Al^{3+} et l'hydroxyde $\text{Al}(\text{OH})_3$, de la forme :



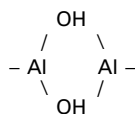
par exemple :



Ces ions sont aussi capables de s'hydrater, suivant la formule générale :

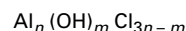


De tels ions complexes peuvent de plus subir une polymérisation par suite d'une **réaction d'olation**, qui correspond à un pontage entre les hydroxydes OH :

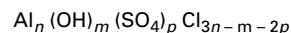


La diversité des polymères susceptibles de se former en fonction des conditions locales (pH, température, sels dissous, quantité et nature des colloïdes, etc.), allant de $\text{Al}_6(\text{OH})_{12}^{6+}$ et $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ à $\text{Al}_{54}(\text{OH})_{154}^{8+}$ (ce qui correspond à la formule générale $\text{Al}_n(\text{OH})_p^{(3n-p)+}$), explique les différences de flocculation qui existent d'une eau à l'autre. Cette théorie de la polymérisation des hydroxydes a d'autre part introduit l'idée de fabriquer ces polymères avant l'introduction du réactif dans l'eau, afin de mieux prépa-

rer la phase de flocculation (grossissement du floc pour le rendre décantable) qui suit la coagulation. C'est ainsi que sont apparus sur le marché divers produits (WAC, PACI, BAC, BACS, SL15, Aqualenc, Alpoclar...) qui répondent le plus souvent à la formule générale :



Certains d'entre eux contiennent en outre une certaine proportion de sulfates et répondent alors à la formule :



3.2 Aspects pratiques de la flocculation. Flocculants

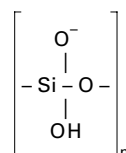
La formation du floc étant amorcée par l'introduction du coagulant, il est nécessaire d'accroître son volume, sa masse et sa cohésion, ce qui sera favorisé par :

- une coagulation préalable aussi parfaite que possible ;
- une augmentation de la quantité du floc dans l'eau ; on a intérêt à mettre l'eau en contact avec les précipités déjà formés par le traitement antérieur (recirculation des boues ou lit de boue) en recherchant la plus forte concentration possible (sans toutefois dépasser une valeur optimale au-delà de laquelle la décantation ultérieure se trouverait freinée) ;
- un brassage homogène et lent de l'ensemble afin d'augmenter les chances de rencontre des particules colloïdales déchargées électriquement avec une particule de floc ; lorsque les appareils de séparation ne comportent pas de contact de l'eau en cours de flocculation avec les boues préexistantes, on fait d'abord passer l'eau dans un flocculateur (temps de contact de l'ordre de 20 min), bassin muni d'un système d'agitation (hélice, comme sur la figure 3, ou ensemble de pales fixées sur un arbre tournant, vertical ou horizontal), qui tourne relativement lentement pour ne pas briser les flocons déjà formés, mais suffisamment vite pour assurer le grossissement progressif du floc et éviter une sédimentation précoce ;
- l'emploi de certains produits appelés **floculants**.

Les flocculants sont aussi appelés **adjuvants de coagulation** ou **de flocculation**. Ils peuvent intervenir au niveau de la filtration (vis-à-vis de l'avancement du front de colmatage, évitant ainsi les phénomènes de « crevaisson » des filtres) aussi bien qu'à celui de la flocculation-décantation (vitesse de flocculation ; floc plus gros, donc mieux décantable ; cohésion accrue dans les appareils à contact de boues).

On peut classer les flocculants en deux groupes.

Flocculants minéraux : il s'agit essentiellement de la **silice activée**, préparée (en continu ou discontinu) en neutralisant partiellement l'alcalinité d'une solution de silicate de sodium par un acide (H_2SO_4 le plus souvent, mais aussi HCl, NaHCO_3 , sulfate d'aluminium, eau de chlore, etc.). On obtient un polymère anionique linéaire, de formule générale :



Flocculants organiques :

- **d'origine naturelle** : on utilise surtout l'acide alginique ou ses sels, les alginates de sodium (polymères anioniques linéaires), plus simples à mettre en œuvre, mais souvent moins actifs que la silice activée (sauf lorsque le coagulant est un sel de fer). Formes commerciales : Aqualgine, Sobalguine, Cellalgine, etc.
- **d'origine synthétique** : ce sont des polyélectrolytes anioniques, cationiques ou non ioniques, à très haute masse molaire

(10^6 à 10^7) ; il s'agit de polyacrylates, polyacrylamides, polyamines, polyéthylèneimines, etc. ; ce sont les plus efficaces des flocculants et beaucoup d'entre eux sont maintenant officiellement agréés pour leur utilisation dans le traitement des eaux potables en France, du moins en ce qui concerne les anioniques et les non ioniques ; ceux-ci sont donc utilisables dans toutes les industries, pour la préparation d'eaux de tous types.

4. Décantation

Une fois le floc formé, il faut réaliser la séparation solide-liquide qui permettra d'obtenir l'eau clarifiée d'un côté et les boues (particules colloïdales initiales + floc) de l'autre. On utilise en général l'action de la pesanteur sur les particules en suspension et l'on recueille ensuite l'eau claire à la partie supérieure de l'appareil, alors qu'on soutire les boues sédimentées dans la partie inférieure : c'est la **décantation** [J 3 450] ou [9]. Dans certains cas particuliers, où le floc est léger, on réalise une **flottation** (§ 5) et la situation est alors inversée : les boues sont évacuées sous forme d'écume à la partie supérieure et c'est le sous-nageant, recueilli par ramifications perforées ou cloison siphonide, qui donnera l'eau traitée.

Dans un décanteur, lorsque la concentration en matières est faible, le floc formé est dispersé et chaque flocon décante comme s'il était seul : c'est la **décantation diffuse** utilisée lorsque la floculation préalable a, elle aussi, été diffuse ; elle est mise en œuvre dans des **décanteurs statiques**, les plus anciens.

Lorsque la concentration en matières est plus élevée, l'abondance du floc crée une décantation d'ensemble, caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant : c'est la **décantation en piston** ou « à **contact de boues** », principalement utilisée dans les **décanteurs « à lit de boues »** ou « à **recirculation de boues** », dans lesquels l'eau brute, additionnée de ses réactifs, est mise en contact avec les boues préexistantes. Dans ces **décanteurs**, appelés aussi « **accélérés** », l'augmentation de la concentration est utilisée pour améliorer la floculation elle-même. D'autre part, la formation d'un lit de boues permet des vitesses de séparation plus élevées que dans un décanteur statique.

La **décantation lamellaire**, réalisée en introduisant des surfaces inclinées dans l'espace de décantation, améliore considérablement les conditions de la décantation, qu'elle soit statique ou accélérée. Enfin, on peut aussi augmenter la masse volumique apparente du floc en le lestant avec du microsable. On conçoit que les diverses combinaisons possibles de tous ces principes conduisent à une grande variété d'appareils, dont les principaux vont être énumérés ci-après (voir aussi les références [2] [3] [8] ou [C 5 200], [10] ou [J 3 451]).

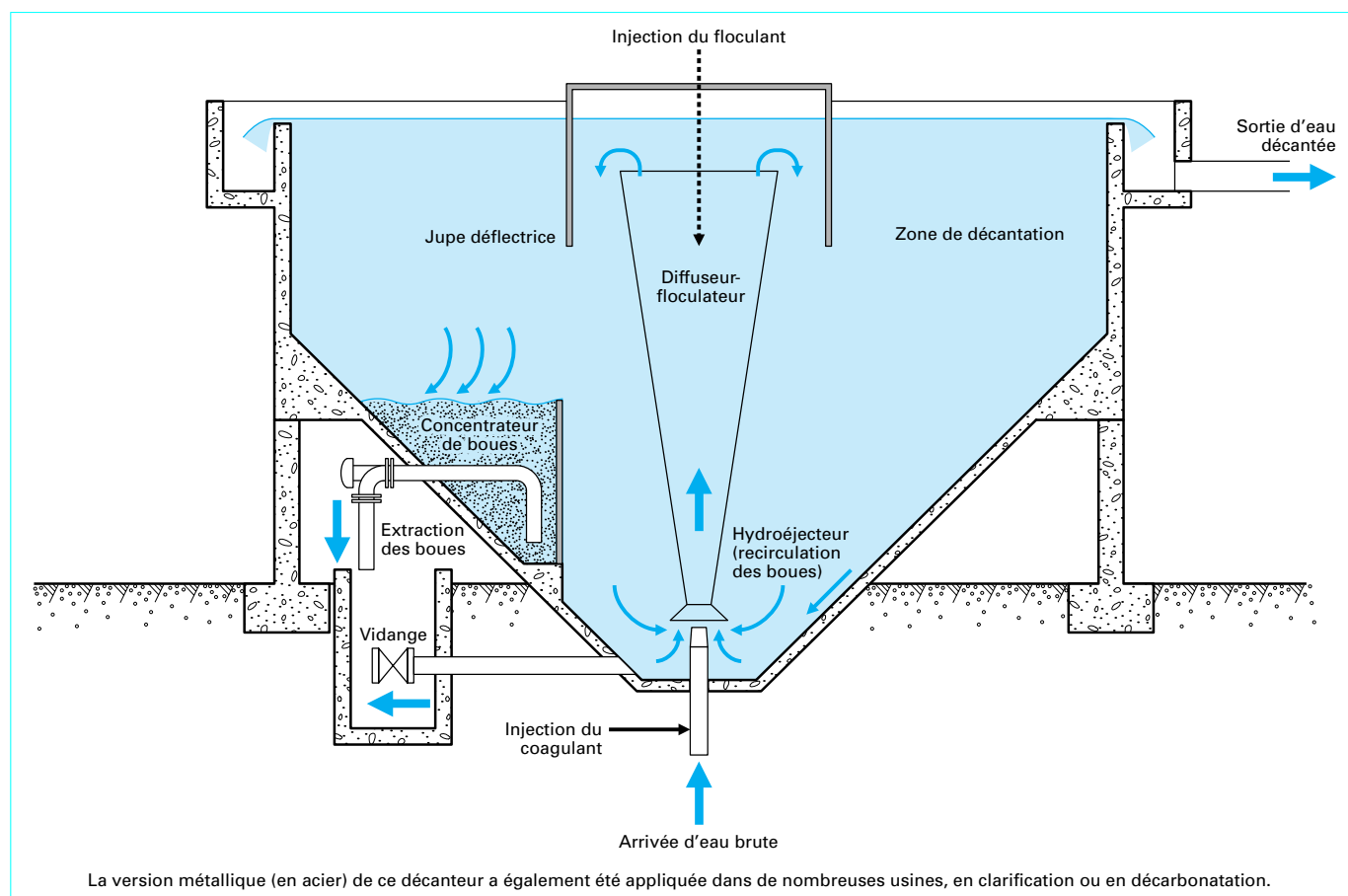


Figure 4 – Décanteur Circulator (version béton)

4.1 Décanteurs statiques (simples ou lamellaires)

On trouve là de nombreux types de décanteurs, circulaires ou rectangulaires, raclés ou non raclés, précédés ou non d'un flocculateur ; les plus récents peuvent en outre être garnis d'un dispositif de **décantation lamellaire** (plaques ou tubes, inclinés à 60° sur le plan horizontal), pour tenter d'augmenter la vitesse de passage qui, sans cela, ne pouvait dépasser $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ sur la surface de décantation (surface des flocculateurs non comprise) : c'est par exemple le cas du **Sedipac** Degrémont ou du **Multiflo** d'OTV.

4.2 Décanteurs à recirculation de boues

Ils favorisent un bon contact de l'eau et des boues par recyclage de tout ou partie des boues dans une colonne centrale de réaction. D'autre part, le rassemblement des flocons permet une sédimentation plus rapide. Nous citerons :

— l'**Accelator**, un des premiers appareils à recirculation de boues (on pourra consulter la figure dans l'article relatif aux traitements physico-chimiques des eaux [résiduaires] industrielles), comportant une zone centrale de réaction entourée d'une zone de décantation ; comme tous les appareils de cette famille, les deux zones communiquent par le haut et par le bas. L'Accelator est caractérisé par la présence d'une turbine, comme organe de floculation et de recirculation des boues, et d'une jupe inclinée à la sortie de la colonne centrale de floculation, favorisant l'écoulement des boues et leur séparation d'avec l'eau surnageante ;

— le **Circulator** (figure 4), très simple de conception (recirculation des boues par un système d'hydro-éjecteur placé sur le tuyau d'arrivée d'eau brute) ; mais le floc risque de se briser au passage de la tuyère, ce qui a conduit au type suivant ;

— le **Turbocirculator** où la tuyère est remplacée par une hélice ; on trouvera le schéma de cet appareil dans l'article relatif aux traitements physico-chimiques des eaux (résiduaires) industrielles. Il existe depuis de nombreuses années une version à zone de décantation lamellaire de cet appareil, inscrite dans une structure rectangulaire, le **RPS** ; mais nous verrons plus loin qu'il existe maintenant sur ce principe des appareils beaucoup plus élaborés et performants (Densadeg, § 4.5 et Actiflo, § 4.6).

Dans les grands appareils, le radier très incliné est remplacé par un radier à faible pente et un pont racler assure la collecte des boues pour les ramener dans la zone centrale.

Ces appareils offrent de grands avantages par rapport aux décanteurs statiques, mais présentent parfois certains inconvénients (forme circulaire quasi impérative ; double fonction du système central : floculation et recyclage des boues ; réglage parfois difficile). C'est pourquoi il leur est souvent préféré des appareils de la catégorie suivante.

4.3 Décanteurs à lit de boues

Ce type d'appareil est surtout représenté par le **Pulsator** (figure 5) dans lequel l'eau à clarifier traverse verticalement le lit de boues qui joue un rôle de filtre fluidisé très efficace.

Les pulsations (qui lui ont donné son nom) garantissent la bonne floculation et l'homogénéité du lit de boues.

À surface de homogénéité égale, la vitesse autorisée est souvent 2 à 3 fois celle d'un appareil statique (soit $3 \text{ à } 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

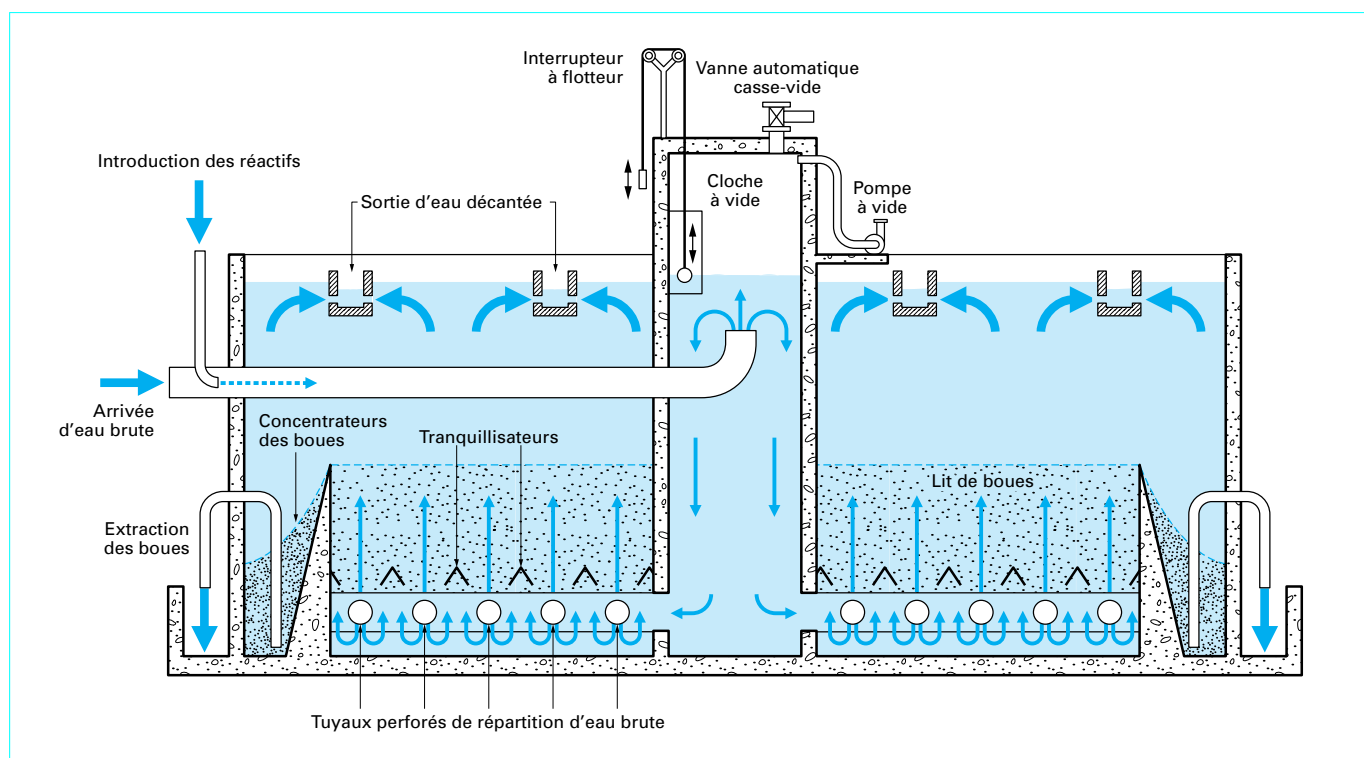


Figure 5 – Décanteur Pulsator

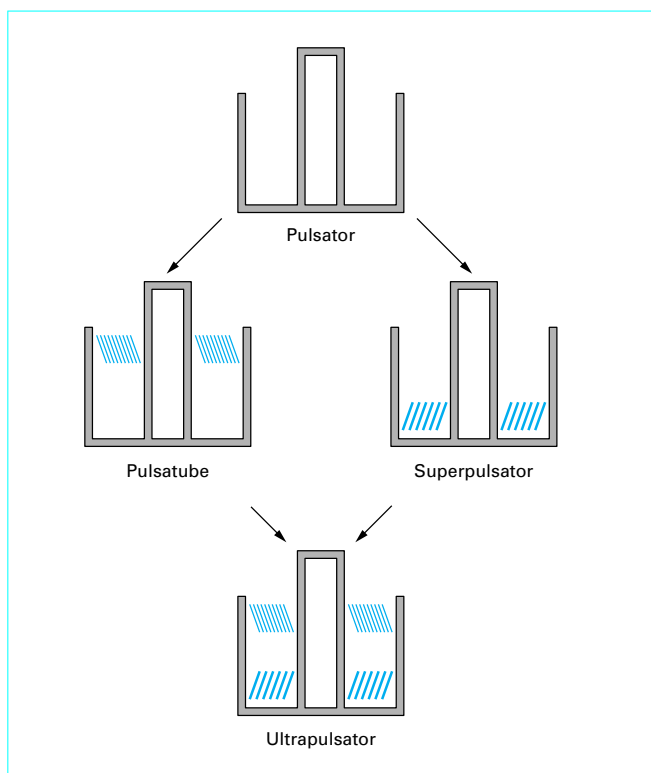


Figure 6 – Évolution des décanteurs à lit de boues pulsé

Les concentrateurs présentent, d'autre part, l'intérêt de pouvoir extraire des boues déjà concentrées, sans modifier le comportement du décanteur et sans qu'une extraction excessive risque d'appauvrir le lit de boues.

4.4 Décanteurs lamellaires à lit de boues

L'adjonction de dispositifs lamellaires au principe de base du Pulsator a donné naissance à une famille d'appareils qui est récapitulée dans la figure 6 ; les deux premiers remontent à plus de vingt ans :

— **Pulsatube** (figure 7) : tubes inclinés, placés au-dessus du lit de boues ;

— **Superpulsator** (figure 8) : plaques inclinées munies de déflecteurs, placées au sein du lit de boues.

Dans les deux cas, on peut atteindre une vitesse ascensionnelle double de celle d'un Pulsator classique fonctionnant dans les mêmes conditions, soit $6 \text{ à } 10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Le dernier-né de cette gamme est l'**Ultrapulsator**, qui réunit les deux principes précédents : plaques inclinées dans le lit de boues, modules tubulaires au-dessus ; la vitesse ascensionnelle peut alors atteindre une valeur triple de celle du Pulsator conventionnel.

4.5 Décanteurs lamellaires à recirculation de boues

Dans cette famille de décanteurs, associant le principe de la recirculation des boues à celui d'une décantation lamellaire gé-

ralement pratiquée dans des modules tubulaires, nous prendrons pour exemple l'appareil breveté par Degremont sous le nom de **Densadeg**, qui est aussi un **décanteur-épaississeur**.

La figure 9 rappelle le principe de cet appareil, dont les principaux avantages sont : une recirculation externe des boues ; une floculation optimisée ; une décantation lamellaire très performante ($30 \text{ à } 50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ en clarification d'eaux naturelles) ; un épaississeur intégré (avec stockage éventuel des boues) donnant des boues très concentrées qui permettent de limiter les pertes d'eau et d'admettre directement les boues sur un système de déshydratation, sans épaississement intermédiaire.

Le Densadeg peut être utilisé dans tous les domaines du traitement des eaux : préparation des eaux potables ou industrielles (en clarification ou en décarbonation) ; épuration des effluents urbains (traitement primaire ou déphosphatation physico-chimique tertiaire) ou industriels (clarification avant rejet ou recyclage, précipitation de métaux, épaississement des boues, etc.).

4.6 Décanteurs à floc lesté

Il existe aussi des appareils (développés par OTV, filiale de la Compagnie Générale des Eaux) où les boues sont lestées par du microsable de $25 \text{ à } 100 \mu\text{m}$, avec un fort apport de polymère pour faire adhérer le floc à son matériau de lestage. Les boues obtenues sont envoyées sur un hydrocyclone, afin de récupérer le microsable et le réinjecter dans l'eau brute. Les performances du premier décanteur de cette catégorie (**Cyclofloc**) ont été ensuite améliorées par l'adjonction de modules lamellaires à la partie supérieure, au-dessus d'un lit de boues fluidisé (**Fluo-rapid**).

Le dernier-né de cette famille est l'**Actiflo** (figure 10), dont l'hydraulique générale ressemble un peu à celle du Densadeg, mais avec deux caractéristiques particulières :

— très grande vitesse sur la surface de décantation ($30 \text{ à } 80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, suivant la qualité d'eau décantée désirée) grâce au lestage du floc par le microsable ;

— en revanche, aucun épaississement des boues, du fait du débit nécessaire pour le recyclage des eaux boueuses sur l'hydrocyclone destiné à récupérer le microsable.

4.7 Récapitulation des principaux décanteurs

Bien d'autres types d'appareils, d'origine étrangère, auraient pu être décrits dans ce qui précède, sans toutefois pouvoir être classés dans des catégories fondamentalement différentes : l'énumération précédente représente les principales disponibilités offertes par « l'École française de l'Eau » (suivant le terme sous lequel la technologie française est quelquefois désignée à l'étranger) et sa récapitulation (tableau 2) montre que l'on dispose de produits susceptibles de répondre à toutes les exigences des cahiers des charges :

— décantation lamellaire (plaques ou tubes) ou décantation classique ;

— décantation statique, ou accélérée grâce au principe dit « à contact de boues » (recirculation de boues ou lit de boues) ;

— décanteurs raclés ou non raclés ;

— épaississement incorporé si nécessaire (Densadeg), en particulier quand un traitement des boues est envisagé.

Enfin, le tableau 3 résume les vitesses usuelles et les concentrations prévisibles des boues extraites pour les principaux types de décanteurs habituellement mis en œuvre en clarification.

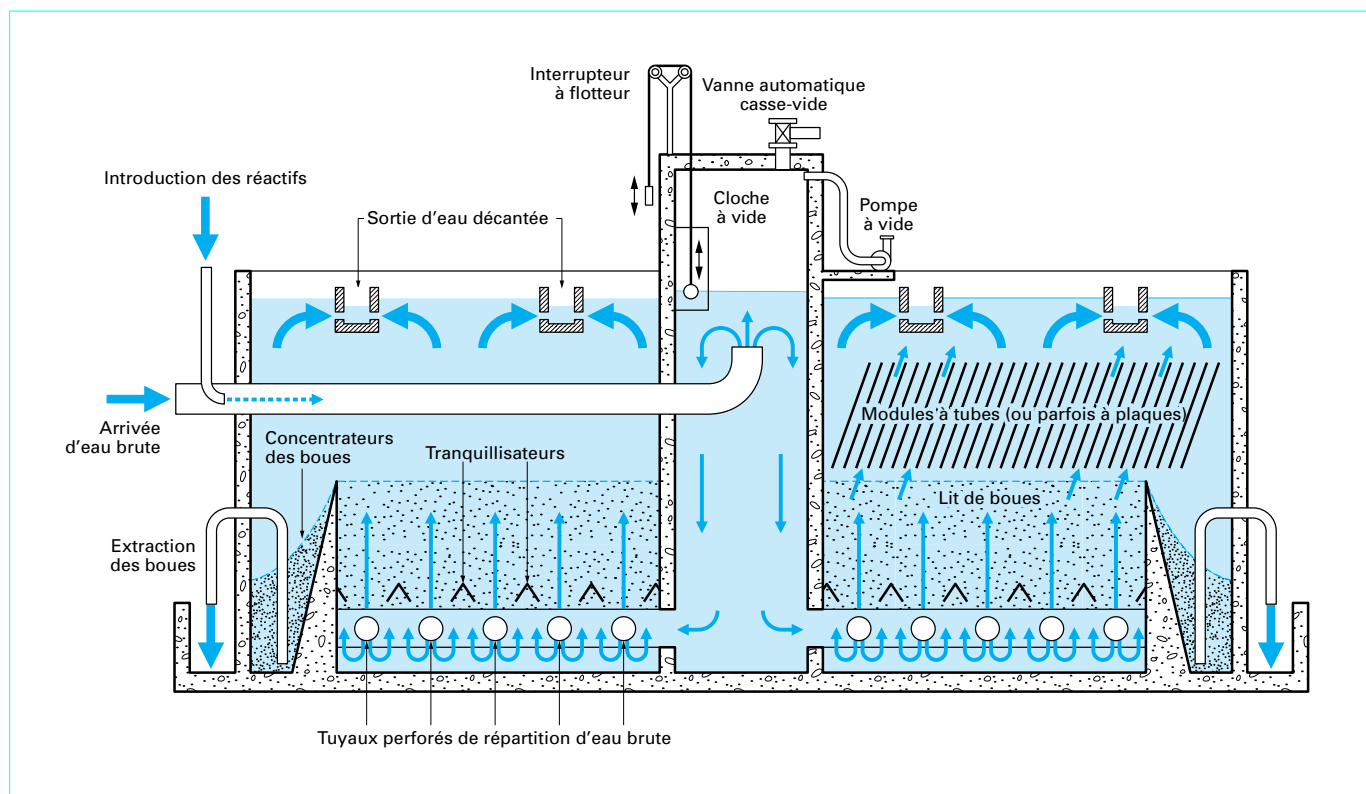


Figure 7 – Décanteur Pulsatube

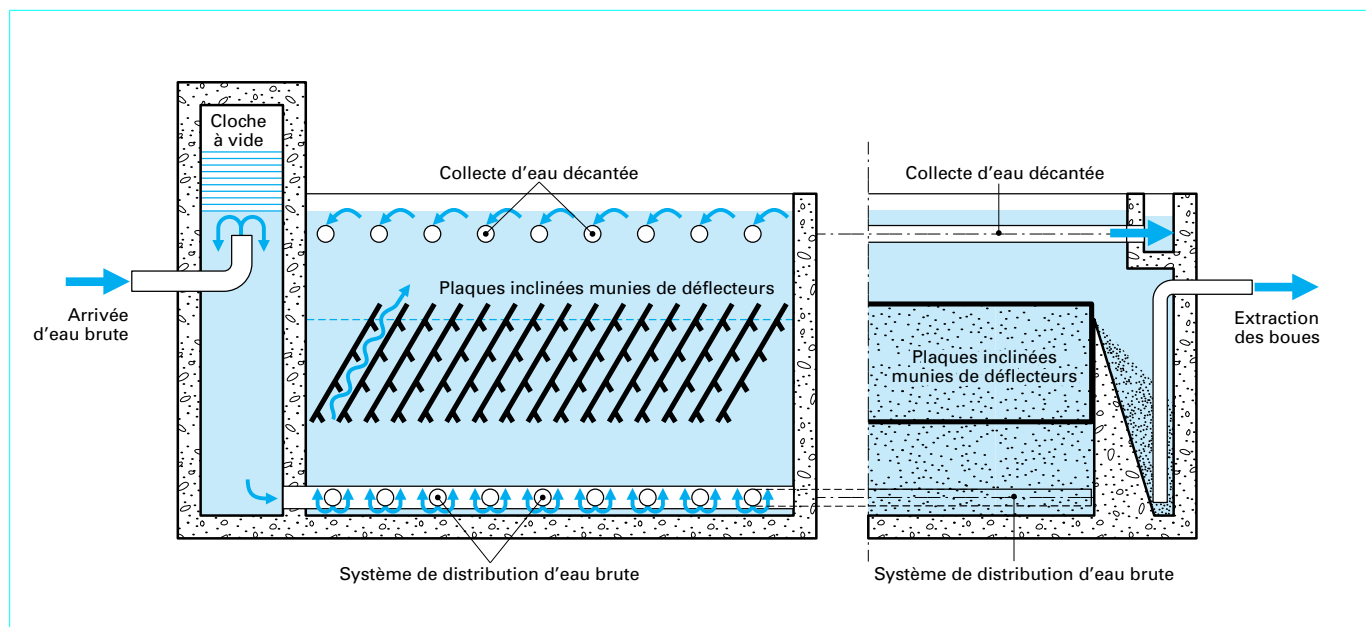


Figure 8 – Décanteur Superpulsator

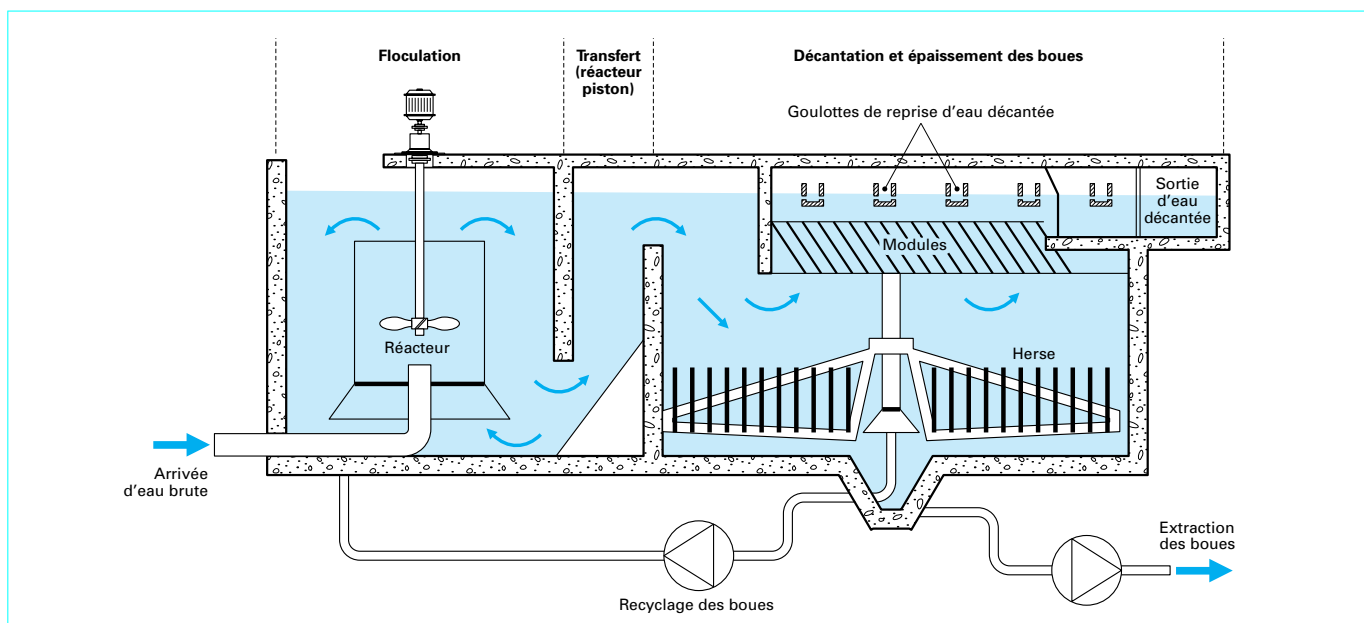


Figure 9 – Décanteur Densadeg

Tableau 2 – Classification des décanteurs

Type de décantation	Statique	À contact de boues		
		À lit de boues pulsé	À recirculation de boues	
			Sans épaissement des boues	Avec recirculation des MES (décanteur-épaisseur)
Sans équipement lamellaire	– Rectangulaire, floculateur séparé, raclé ou non, – Circulaire, raclé, floculateur intégré (clarifloculateur)	Pulsator	Accelator Circulator Turbocirculator Claricontact Actiflo (floc lesté)	–
Avec équipement lamellaire (plaques et/ou tubes)	Sedipac Multiflo Fluorapid (floc lesté)	Pulsatube Superpulsator Ultrapulsator	RPS	Densadeg

Tableau 3 – Caractéristiques et performances des principaux décanteurs en clarification

Type de décanteur	Floculateur	Vitesse apparente sur la zone de décantation ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)	Concentration des boues extraites ($g \cdot L^{-1}$)
Statique	En tête ou intégré	0,5 à 1,5	0,5 à 5
Turbocirculator	Intégré	1,5 à 3	2 à 10
Accelator	Intégré	3 à 5	1 à 10
Pulsator	Intégré	3 à 5	2 à 10
Pulsatube, Superpulsator	Intégré	6 à 10	2 à 10
Ultrapulsator	Intégré	8 à 15	2 à 10
Sedipac, Multiflo	En tête	5 à 10	1 à 15
RPS	En tête	8 à 12	2 à 15
Densadeg	En tête	30 à 50	30 à 150
Actiflo	En tête	30 à 80	2 à 10

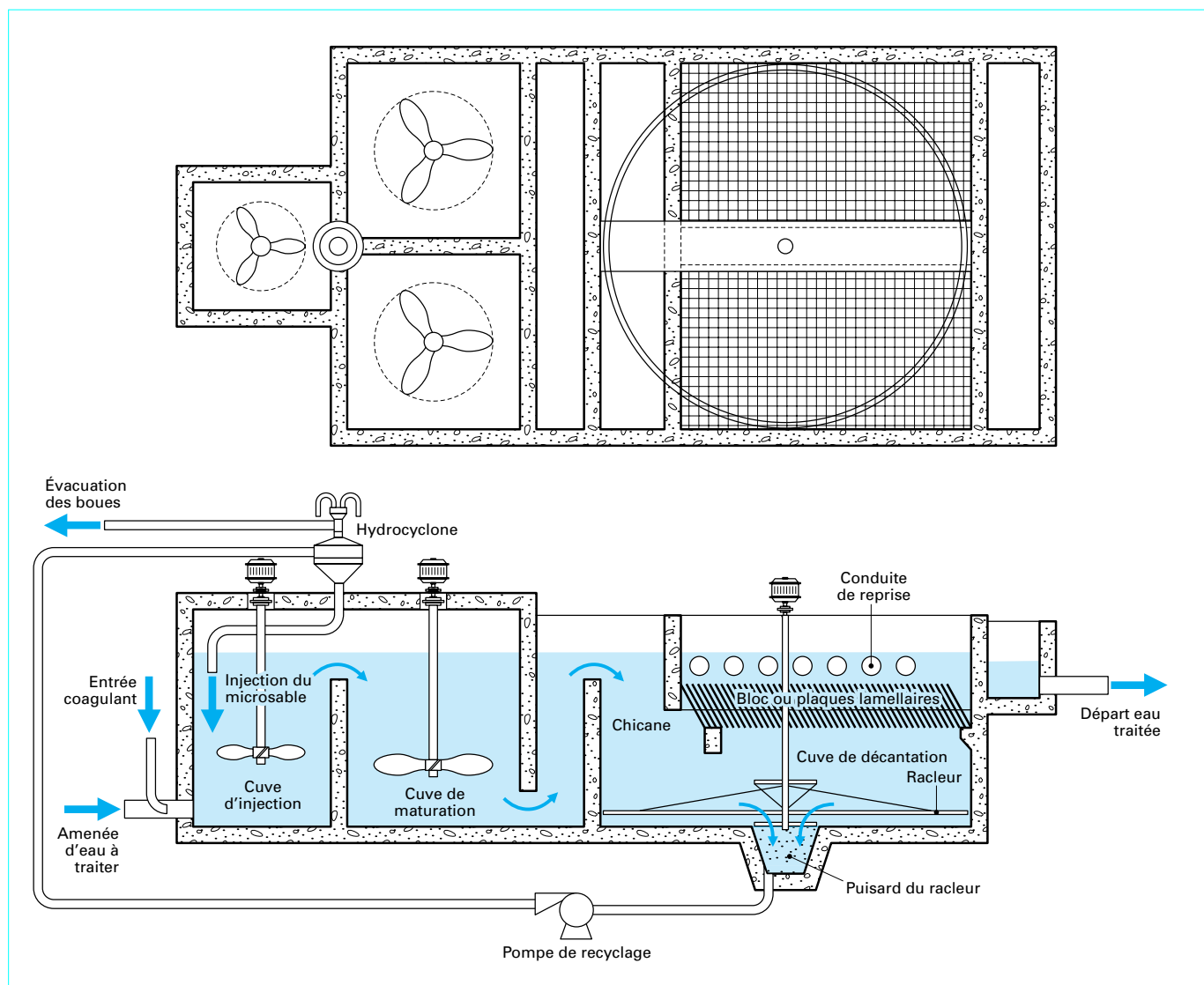


Figure 10 - Décanteur Actiflo

4.8 Problèmes de décantation

Les plus fréquents peuvent être :

— **présence de sable** : un dessablage préliminaire évitera l'envasement du décanteur ;

— **fortes pointes de matières en suspension** : suivant le cas, on choisira un appareil statique raclé de préférence à un décanteur accéléré, ou bien on placera un débourbeur (prédécanteur spécialement conçu à cet effet, précédé ou non d'une injection de coagulant) en amont d'un appareil accéléré à contact de boues ;

— **variations brutales de température** : du fait des courants de convection qu'elles engendrent, elles provoquent des départs de boues si l'eau n'est pas parfaitement répartie dans l'appareil (dans une usine, il faut donc éviter d'utiliser l'eau brute comme échangeur de chaleur avant une phase de décantation, surtout si cet échange thermique présente des paramètres variables) ;

— **abondance d'algues** : les bulles gazeuses qu'elles émettent provoquent des remontées de boues ; une préchloration, une préozonation et/ou un traitement simultané au charbon actif en poudre entravent ces phénomènes.

5. Flottation

Certaines eaux (lacs, barrages en particulier) sont relativement claires, mais colorées ou riches en algues : elles réclament alors de fortes doses de coagulant sans que le floc puisse être alourdi par des matières initialement en suspension dans l'eau brute ; sur de telles eaux, la décantation est donc souvent difficile (à moins de jouer sur les forces de cohésion qui s'exercent au sein d'un appareil à lit de boues comme le Pulsator).

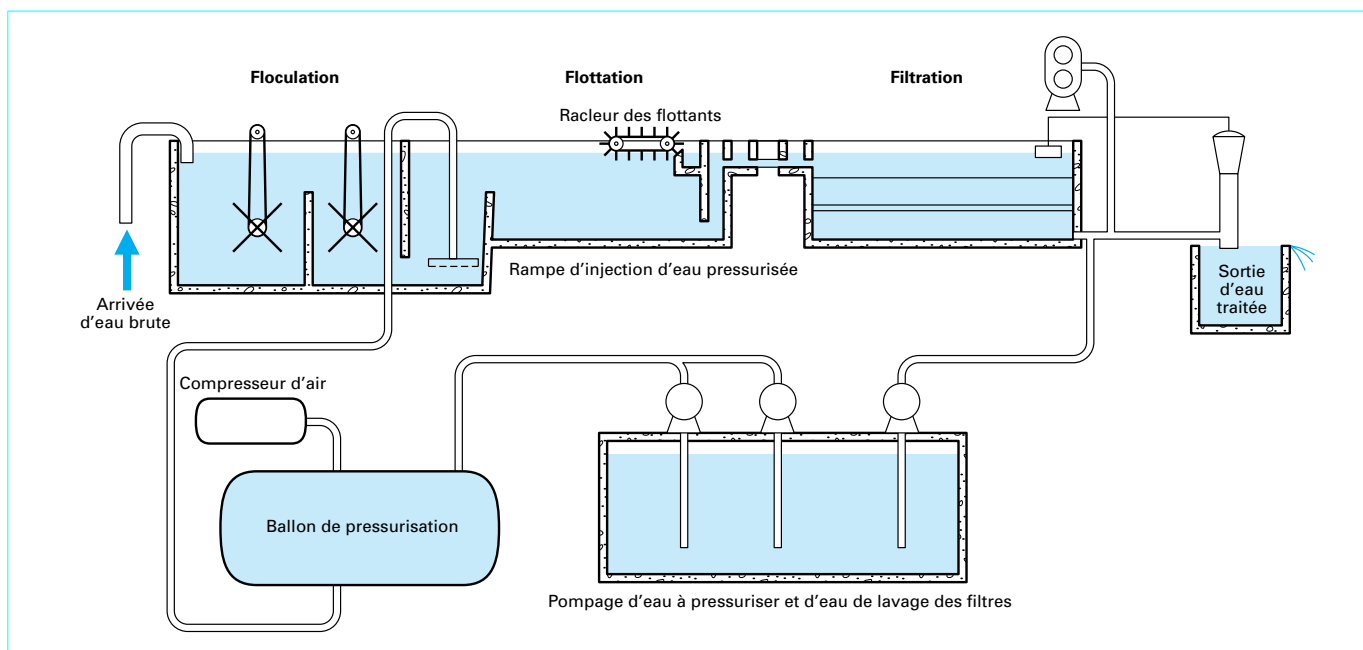


Figure 11 – Schéma-type d'une clarification par flottation-filtration

La flottation à air dissous (figure 11) est alors une variante intéressante de la décantation. L'eau brute, additionnée de réactifs, passe d'abord dans un flocculateur dont le temps de contact est de 20 à 30 min. Elle est ensuite dirigée vers une chambre de mélange où est introduite une fraction d'eau saturée en air sous une pression de 4 à 5 bar. La détente de cette eau pressurisée entraîne l'apparition de fines bulles d'air (40 à 70 μm) qui se fixent sur les précipités dont la masse volumique apparente devient alors inférieure à celle de l'eau.

L'eau flocculée mélangée à l'eau pressurisée pénètre ensuite dans le flottateur où s'opère la séparation, les précipités étant récupérés en surface de l'appareil sous forme d'une écume éliminée par un racleur superficiel, alors que l'eau clarifiée est reprise à la partie inférieure. La flottation permet d'obtenir des caractéristiques d'eau analogues à celles obtenues par décantation.

Il existe divers types de flottateurs fonctionnant, suivant les modèles, à des vitesses de séparation de l'ordre de 7 à 10 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Pour traiter les eaux naturelles, les plus courants sont rectangulaires et forment un ensemble compact avec les flocculateurs et les filtres. En cas de besoin, il est possible de choisir un appareil circulaire avec racleur de fond pour répondre aussi à des périodes de turbidité notable. Il est également possible de construire des flottateurs-filtres combinés, intégrant la filtration au-dessous de la zone de flottation.

6. Filtration

La filtration a déjà fait l'objet d'articles détaillés dans les Techniques de l'Ingénieur, tant dans ses aspects théoriques [J 3 503] ou [11], [J 3 501] ou [12] que technologiques [J 3 510] ou [13].

6.1 Généralités

Que l'eau soit coagulée ou non, décantée (ou « flottée ») ou non, il faut toujours la filtrer pour que l'élimination des matières insolubles soit aussi complète que possible (c'est-à-dire pour que la

turbidité soit ramenée au voisinage de zéro). La filtration est également indispensable en déferrisation-démanganisation [G 1 172], en polissage de décarbonatation [G 1 171], en aval des réacteurs biologiques d'élimination de l'ammonium ou des nitrates [G 1 172], etc.

C'est surtout la **filtration en profondeur** [J 3 503] ou [11], sur **matériau granulaire**, qui constitue le cœur de la majorité des stations de préparation d'eau industrielle et qui sera développée ci-après ; cependant, on trouve aussi divers procédés où l'épaisseur du milieu filtrant est négligeable ou très faible devant sa surface et où les impuretés sont retenues sous forme d'un **gâteau** ne pénétrant pratiquement pas dans ce milieu :

- **filtration sur support** [J 3 501] ou [12] : filtres à cartouches, à bougies, à précouche (§ 6.4) ;
- **filtration sur membranes de microfiltration et d'ultrafiltration** [G 1 171].

Les deux actions fondamentales qu'il faudra effectuer successivement en filtration peuvent être résumées ainsi.

1. Produire une eau propre en retenant les impuretés.
2. Laver le filtre en chassant les impuretés sans perdre ou détériorer le milieu filtrant.

La filtration est donc une opération cyclique, alternant (ou combinant) des phases (ou cycles) de production par filtration et des phases de lavage. Ce dernier doit intervenir :

- soit lorsque la perte de charge atteint une valeur fixée par construction ou par sécurité ;
- soit lorsque la qualité du filtrat commence à se détériorer (par exemple, augmentation de la turbidité : on dit alors que le filtre « crève »).

6.2 Paramètres fondamentaux de la filtration en profondeur

Il existe une grande variété de filtres, que l'on peut classer selon les paramètres énoncés dans ce qui suit.

6.2.1 Composition du lit filtrant

6.2.1.1 Nature des matériaux

Si le sable représente le matériau traditionnel et encore le plus utilisé, d'autres matériaux, combinés ou non avec le sable, peuvent entrer dans la composition d'un filtre ; on peut ainsi distinguer les types de lits filtrants suivants :

- sable homogène ;
- bicouche (exemple : sable et anthracite) ou multicouche (exemple : du bas vers le haut, grenat, sable et anthracite ou pierre ponce) ; ces filtres présentent l'avantage d'une rétention plus grande des particules, mais leur lavage est plus difficile (§ 6.3) ;
- matériaux spécifiques de la biofiltration (exemple : argile expansée), de l'adsorption (charbon actif, etc.) ;
- éventuellement, matériau dont la masse volumique est inférieure à celle de l'eau (exemple : billes de polystyrène expansé) pour constituer un lit flottant.

6.2.1.2 Granulométrie

La granulométrie du ou des matériau(x) filtrant(s) est caractérisée par les paramètres suivants :

- **taille effective (TE)** : c'est la taille du tamis laissant passer 10 % de la masse (en général 100 g) d'un échantillon représentatif ; les TE usuelles vont de 0,5 mm à 1,5 mm (0,95 mm le plus souvent) ;
- **coefficient d'uniformité**, exprimant l'homogénéité du matériau ; il doit être aussi proche que possible de l'unité (en pratique de 1,2 à 1,4).

6.2.1.3 Hauteur de couche

La hauteur de couche d'un lit filtrant se situe entre 0,8 et 2 m en général ; le plus souvent, elle est de l'ordre de 1 m.

6.2.2 Caractéristiques de la filtration

6.2.2.1 Sens de la filtration

Suivant le cas, cette phase du traitement se fait :

- de haut en bas (classique) ;
- de bas en haut (autrefois pratiqué dans le filtre type **Immedium**, ce type de filtration est obligatoire dans le cas d'un lit flottant,

de développement plus récent, comme le **Filtrazur** Degrémont ou le biofiltre **Biostyr** OTV) ;

- dans les deux sens avec un bifiltre (distribution simultanément à la partie supérieure et à la partie inférieure ; reprise de l'eau par un collecteur au milieu de la masse filtrante) ;
- par filtration horizontale (type de filtre plus rustique).

6.2.2.2 Vitesse de filtration

La vitesse de filtration s'exprime en $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$, mais on peut aussi trouver d'autres types d'écriture, non officiels, de cette unité : m/h , $m \cdot h^{-1}$, $(m^3/h)/m^2$, $m^3/h \cdot m^2$, $m^3/(h \cdot m^2)$. Suivant le domaine d'application, on peut appliquer des vitesses de filtration comprises entre 5 et $50 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$.

6.2.2.3 Lavage du filtre

La **perte de charge** maximale à laquelle il faut laver le filtre est, en général, 1 à 2 m de colonne d'eau (CE) pour les filtres gravitaires, 0,5 à 0,8 bar (5 à 8 mCE) pour les filtres sous pression.

Les **modes de lavage du filtre** applicables sont les suivants :

- contre-courant d'eau seule (États-Unis) avec comme inconvénient le classement du sable et la formation de *mud balls* (agglomérations de boues, aboutissant finalement à la prise en masse du lit filtrant) ; ce type de lavage n'est plus pratiqué que sur les petits filtres à sable très fin, notamment les filtres sans vannes autolaveurs (figure 12) ;
- le lavage à l'air, puis à l'eau (en filtre bicouche ou à sable très fin) :

air : $50 \text{ à } 60 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$

eau : $35 \text{ à } 55 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ pour sable de 0,6 à 0,85 mm de TE ;

le phénomène des « mud balls » est également fréquent avec ce type de lavage ;

- le lavage simultané à l'air ($50 \text{ à } 60 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$) et à l'eau ($5 \text{ à } 10 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$), puis rinçage ($15 \text{ à } 20 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$) : c'est le mode de lavage usité en Europe sur les filtres à sable homogène ; le filtre est alors muni d'un faux plancher, sur lequel repose le sable et qui est garni de buselures spécialement conçues pour ce type de lavage (figure 13) ;

- les filtres à lavage continu, par exemple : à circulation de sable (figure 14), comme le **Liftazur** Degrémont ou le **Dynasand** ; à compartiments (figure 15), comme le **Greenleaf** ou l'**ABW** commercialisés aux États-Unis.

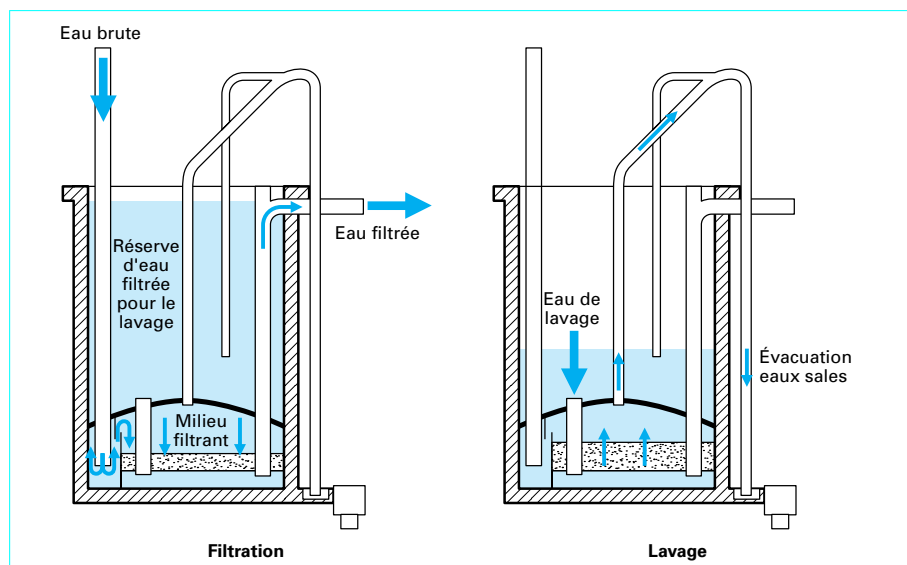


Figure 12 – Filtre sans vannes à lavage automatique

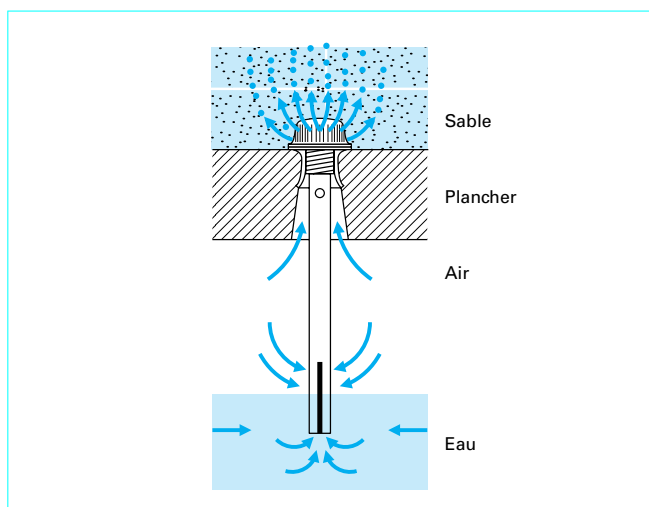


Figure 13 – Buselure de filtre lavé à l'air et à l'eau

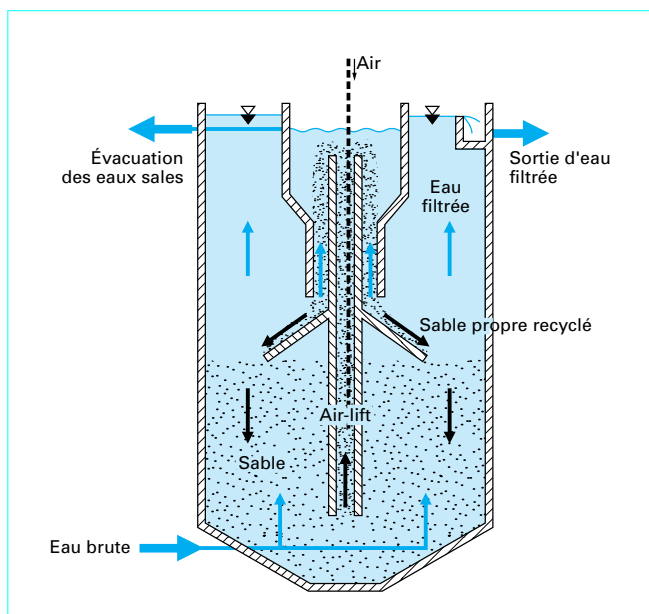


Figure 14 – Filtre à courant ascendant et à lavage continu avec circulation de sable

6.2.2.4 Cycles de filtration

La durée des cycles de filtration entre deux lavages dépend de la nature et de la concentration des matières en suspension (MES) arrivant sur le filtre, de la vitesse de filtration, des caractéristiques du lit filtrant, de la température de l'eau, de la perte de charge admissible et de la garantie donnée pour la qualité du filtrat. À partir de la concentration des MES dans l'eau à filtrer, de la vitesse de filtration et de la durée du cycle, la performance du filtre peut être estimée par la masse de MES retenues par m^2 de filtre entre deux lavages ; ce chiffre est très variable : de $0,3 \text{ kg}$ de MES par m^2 de filtre pour les déferrisations délicates ou les filtrations d'eau décantée de très bonne qualité, jusqu'à $20 \text{ kg} \cdot m^{-2}$ pour retenir certains floccs ou particules de nature minérale.

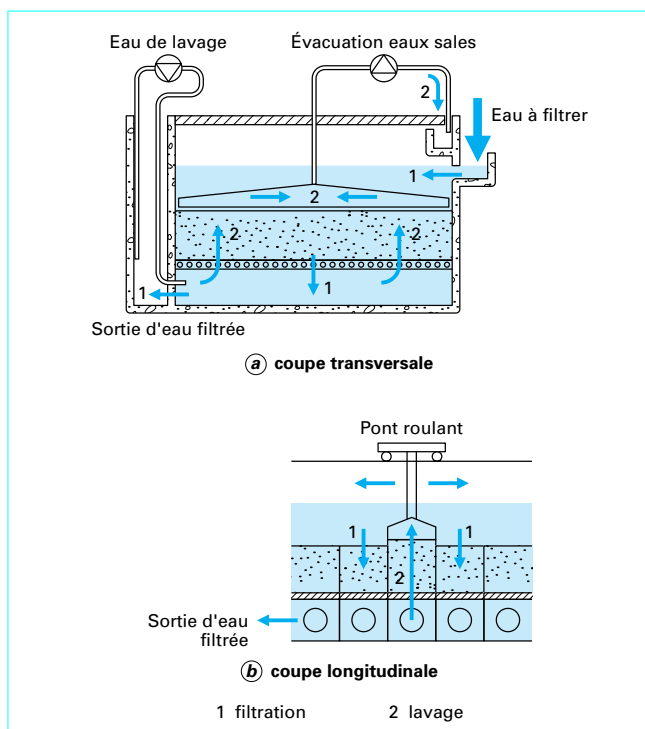


Figure 15 – Filtre cellulaire à lavage continu

6.3 Principaux types de filtres à matériau granulaire

Dans certains cas (filtration directe d'eaux de surface présentant des teneurs variables en MES ; cas délicats de déferrisation-démanganisation physico-chimique, etc.), on peut avoir intérêt à choisir une **combinaison multicouche**, la plus courante étant la solution **bicouche** comprenant :

- un matériau plus dense (sable) et de faible TE ($0,55$ à $0,75 \text{ mm}$) à la partie inférieure ;
- et un matériau plus léger (anthracite, pierre ponce, charbon actif...) et de TE plus élevée (1 à $1,5 \text{ mm}$) à la partie supérieure.

Dans cette solution, l'eau à filtrer percole successivement à travers un matériau de grosse granulométrie avec une forte capacité de rétention des MES, puis un matériau plus petit permettant d'affiner la qualité de l'eau. En revanche, ces filtres ne peuvent être lavés simultanément à l'air et à l'eau, sous peine de perdre le matériau léger, à moins d'accepter une dépense accrue de génie civil en accumulant l'eau sale au-dessus du filtre pendant la période [air + eau] ; en général, la solution adoptée comporte les séquences :

- soufflage à l'air seul ;
- rinçage à l'eau seule, à une vitesse permettant la mise en expansion et le reclassement des matériaux, la différence de masse volumique permettant au matériau le plus grossier de se replacer à la partie supérieure du filtre.

Ce type de lavage est moins efficace et plus coûteux (la vitesse d'eau nécessaire dépend de la masse volumique et de la TE des matériaux, ainsi que de la température de l'eau, mais elle est toujours beaucoup plus élevée que pour le lavage [air + eau] appliqué aux filtres à sable homogène) : c'est la raison pour laquelle les **filtres à sable homogène sont le plus couramment utilisés**.

Dans ce qui suit seul ce dernier type de filtre sera traité.

6.3.1 Filtres sous pression

Ces filtres, généralement en acier, se distinguent surtout par leur mode de lavage.

6.3.1.1 Lavage à l'eau seule

Ce type de lavage est utilisé dans les très petites installations ou lorsque l'on met en œuvre un sable très fin permettant l'expansion à l'eau seule. La répartition de l'eau de lavage se fait par collecteur ; il n'y a donc pas de plancher à buselures, mais la couche de sable filtrant repose sur des couches de gravier.

6.3.1.2 Lavage [air + eau] ou [air puis eau]

Ce lavage se pratique :

— soit dans des filtres verticaux métalliques, en forme de bidon fermé par deux fonds bombés, très utilisés dans les petites installations de déferrisation ou de filtration directe d'eau de surface, où on évite ainsi le double pompage (figure 16) ;

— soit dans des filtres horizontaux métalliques utilisés dans les plus grandes stations.

Ces filtres sont généralement équipés d'un plancher métallique avec des buselures (figure 13) qui permettent l'injection simultanée d'eau et d'air pour le lavage (*vitesse de filtration* : $5 \text{ à } 50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

Diamètre maximal : le plus souvent de l'ordre de 4 m.

6.3.2 Filtres ouverts (gravitaires)

Suivant leur taille, on distingue :

— Les **filtres métalliques pour les petites stations** ; dans le cas le plus courant, ce sera un filtre circulaire vertical à un seul fond bombé, correspondant au filtre représenté sur la figure 16 auquel on aurait ôté le fond bombé supérieur ; d'autres types de filtres plus particuliers sont parfois utilisés : à circulation de sable (exemple : **Dynasand**, **Liftazur**, voir principe sur la figure 14), filtres sans vanes (figure 12), etc. ;

— Les **filtres rectangulaires en béton** : ce sont les filtres que l'on utilise le plus couramment dans les **moyennes et grandes installations** car ils peuvent atteindre de très grandes surfaces unitaires (jusqu'à plus de 200 m^2). Ils sont généralement lavés à l'air et à l'eau simultanément.

■ Il existe en gros **deux types de filtres à sable en béton** suivant la gamme de vitesse considérée.

● **Vitesse de filtration comprise entre $5 \text{ et } 7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$** : filtres à **faible hauteur d'eau**. Perte de charge maximale : de l'ordre de 1,5 m.

Avantage : coût de génie civil moins élevé.

Inconvénient : la faible hauteur d'eau peut permettre une mise en dépression de l'intérieur de la masse filtrante, entraînant un phénomène de dégazage (surtout dans les eaux riches en algues, lesquelles peuvent provoquer une sursaturation de l'eau en oxygène dissous).

● **Vitesse de filtration comprise entre $7 \text{ et } 25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$** : filtres à **forte hauteur d'eau** au-dessus du sable (1,2 m au minimum). Perte de charge maximale : de l'ordre de 2,5 m. Il n'y a alors plus de risque de mise en dépression et les cycles sont plus longs. L'un de ces types de filtre est représenté sur la figure 17 ; dans ce cas précis, le lavage est en outre facilité par un rinçage latéral (« balayage » de surface), qui permet une évacuation plus rapide et plus complète des eaux sales à l'égout, tout en évitant une surcharge des autres filtres au moment du lavage (l'eau à filtrer continuant à alimenter le filtre pour assurer le balayage).

Ces filtres peuvent être agencés en filtres simples à une seule cellule, ou en filtres doubles à cellules jumelles comme représenté sur la figure 17.

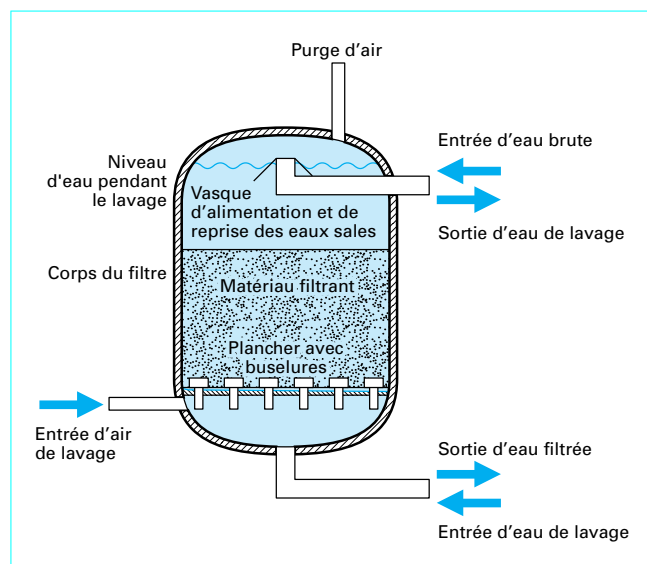


Figure 16 – Filtre vertical métallique sous pression, lavé à l'air et à l'eau

■ La **régulation de ces filtres** est assurée de trois façons différentes :

— par **régulation automatique** (cas le plus fréquent) : l'augmentation de la perte de charge dans le filtre est compensée par l'ouverture progressive d'une vanne asservie au niveau d'eau sur le filtre, qui reste sensiblement constant. L'ensemble peut être complètement automatisé. La vanne peut être remplacée par un siphon concentrique dont le débit est régulé à la partie supérieure par une admission d'air, également asservie au niveau d'eau par un système [flotteur-clapet], appelé « boîte de partialisation » ;

— par **encrassement** (solution « rustique ») : le débit du filtre est constant, on compense l'augmentation de la perte de charge par l'élévation du niveau d'eau au-dessus du filtre ;

— par **débit décroissant**, le lavage étant déclenché lorsque le débit du filtre atteint la valeur minimale prédéterminée.

6.4 Filtration sur support

On pourra se reporter à la référence [J 3 501] ou [12].

Le tamisage et le microtamisage (§ 1) peuvent déjà être classés dans cette catégorie, dans laquelle l'attention sera surtout attirée sur les procédés de filtration fine, généralement appliqués pour la protection de certains circuits de refroidissement ou d'usinage, le traitement d'eau de mer pour injection dans des forages pétroliers ou la préparation de filtrats de très haute qualité (exemple : alimentation de circuits d'eau ultrapure, protection de membranes de nanofiltration ou d'osmose inverse, condensats de chaudières HP ou de centrales, traitements de fluides agroalimentaires : bière, vin, sirops, etc.).

6.4.1 Filtres à cartouches

La cartouche filtrante (figure 18) est montée sur un manchon support et logée dans un corps cylindrique ou tronconique vissé sur une embase.

L'eau à filtrer est répartie à l'extérieur de la cartouche et traverse cette dernière, le filtrat étant collecté à l'intérieur du manchon support.

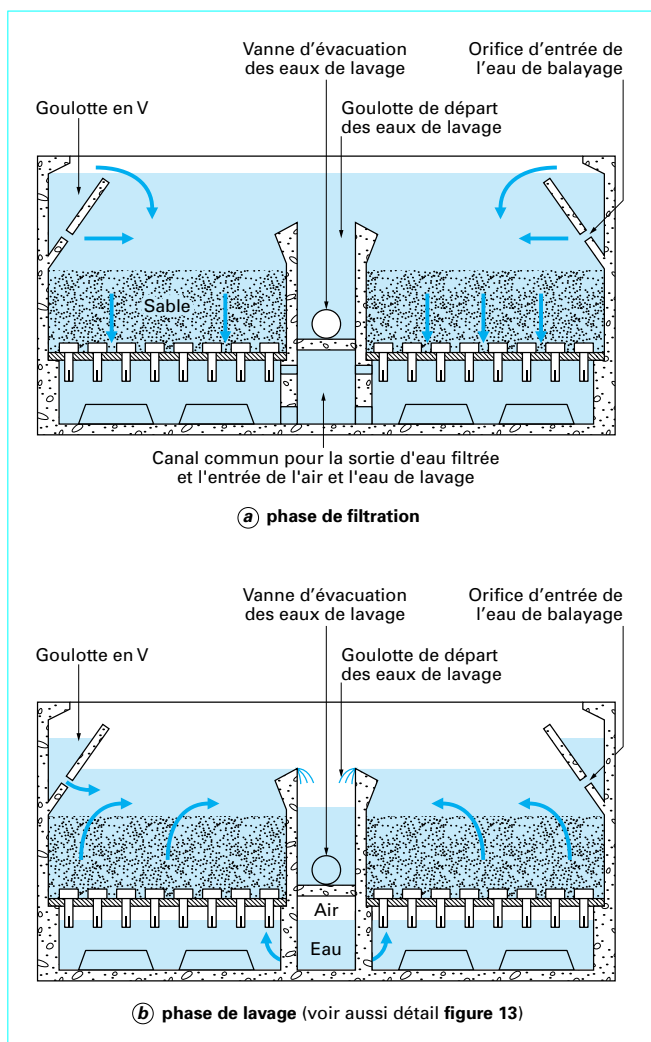


Figure 17 - Filtration gravitaire en béton à lavage [air + eau] avec balayage latéral de surface (Aqazur V de Degrémont)

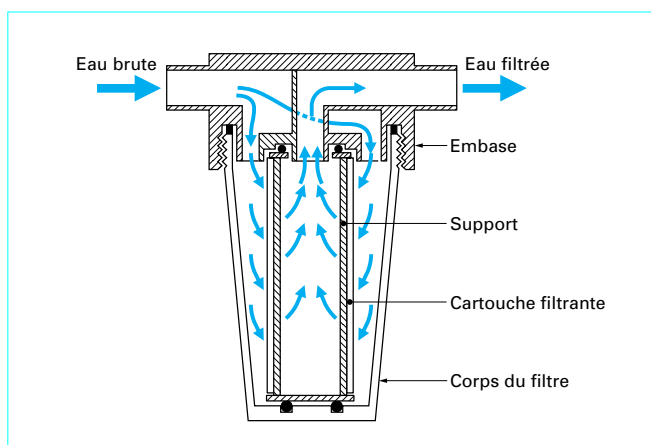


Figure 18 - Filtration à cartouche, d'après [5]

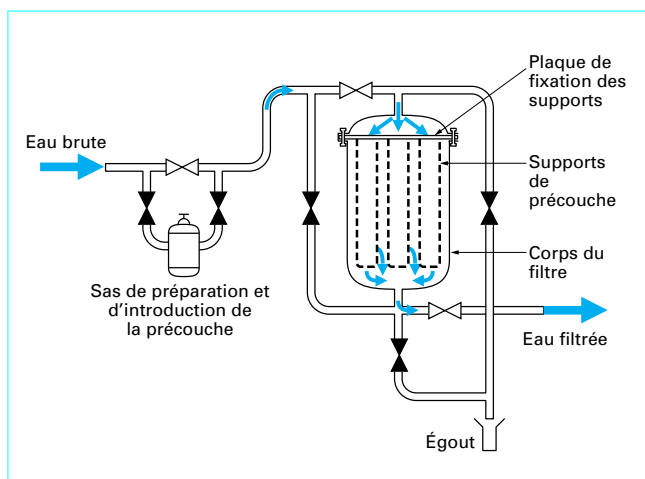


Figure 19 - Filtration à précouche, d'après [5]

Il existe divers types de cartouches, constituées soit par un fil bobiné (nylon, polypropylène, coton, verre), soit par une membrane plissée (papier, nylon, polycarbonate), soit par un tissu (textile, polypropylène), soit par un produit fritté (métal, polypropylène), etc.

On distingue aussi :

- les **cartouches consommables**, à pouvoir de coupure parfois très bas (entre 0,1 et 20 μm) ; au-dessous de 1 μm , on parlera de cartouches de microfiltration ;
- les **cartouches rétrolavables à l'eau** [14], à pouvoir de coupure généralement plus élevé (entre 5 et 200 μm) ; après un certain nombre de cycles, variable suivant le pouvoir colmatant de l'eau à traiter, leur remplacement devient de toute façon nécessaire.

6.4.2 Filtres à bougies

Ce terme est habituellement réservé à des structures poreuses en porcelaine, céramique, métal fritté ou matières plastiques agglomérées ; leur porosité peut être très basse (de l'ordre du dixième de μm) ; les bougies sont généralement régénérables soit par rétrolavage, soit par des traitements plus énergiques (vapeur, acide, ultrasons, etc.), mais là encore elles doivent être renouvelées après un certain nombre de cycles.

6.4.3 Filtres à précouche

Il s'agit ici d'une catégorie intermédiaire entre la filtration de surface et la filtration en profondeur ; le milieu filtrant n'est plus un élément fixe, mais un matériau très fin soit introduit dans l'appareil au début de chaque cycle (« empâtage », voir figure 19), soit parfois constitué par la suspension à traiter elle-même ; dans le premier cas, le plus général, le matériau constituant la précouche pourra, suivant l'application, être des fibres de cellulose, des diatomées fossiles, du charbon actif en poudre, des résines échangeuses d'ions en poudre. Pendant le cycle, il peut être nécessaire de procéder à un « nourrissage » en continu de la précouche, encore appelé « alluvionnage » ; lorsque la perte de charge atteint la valeur maximale fixée par le constructeur, on procède à un lavage par retour d'eau, si possible combiné à une détente instantanée d'un certain volume d'air (exemple : filtre « Cannon » [2] Degrémont) afin de décrocher du support toute la précouche et les impuretés qu'elle a retenues.