

Eaux de distribution

Clarification

par **Hugues GODART**

Ingénieur civil des Mines

Ingénieur en chef à la Générale des Eaux

| | |
|---|--------------|
| 1. Séparation mécanique préalable | C 5 199 - 2 |
| 1.1 Emplacement et aménagement de la prise d'eau (eau de surface) | — 2 |
| 1.2 Dégrillage et tamisage | — 2 |
| 1.3 Microtamisage | — 2 |
| 2. Coagulation (coagulants et adjuvants) | — 2 |
| 2.1 But et théorie..... | — 2 |
| 2.2 Réactifs coagulants..... | — 3 |
| 2.3 <i>Streaming current detector</i> | — 4 |
| 2.4 Adjuvants | — 5 |
| 3. Flocculation | — 5 |
| 4. Décantation | — 6 |
| 4.1 Généralités | — 6 |
| 4.2 Théorie..... | — 6 |
| 4.3 Décanteurs à écoulement horizontal | — 7 |
| 4.4 Modules lamellaires | — 7 |
| 4.5 Décanteurs à écoulement vertical | — 8 |
| 4.6 Amélioration des décanteurs..... | — 9 |
| 4.7 Derniers développements | — 11 |
| 4.8 Flottation | — 11 |
| 5. Filtration | — 12 |
| 5.1 Généralités | — 12 |
| 5.2 Filtration lente..... | — 12 |
| 5.3 Filtration rapide..... | — 12 |
| Pour en savoir plus | Doc. C 5 205 |

Avant d'appliquer tout autre traitement, y compris ceux de désinfection qui sont communs à toutes les distributions publiques d'eau de consommation humaine, il faut rendre l'eau apte à recevoir efficacement ces traitements. Cela suppose, en particulier, une **eau débarrassée de ses impuretés macroscopiques ou microscopiques** : c'est le **domaine de la clarification**.

Les techniques et processus auxquels il est fait appel sont d'ordre :

- mécanique ;
- physique ;
- physico-chimique.

On distingue alors :

- dégrillage, tamisage, microtamisage ;
- coagulation/flocculation/décantation ;
- filtration.

Nous traiterons dans un autre article des **techniques de séparation membranaires** [C 5 200] qui nécessitent elles-mêmes un prétraitement de clarification.

L'étude complète du sujet comprend les articles :

- C 5 198 - Eaux de distribution. Objet des traitements ;
- C 5 199 - Eaux de distribution. Clarification (le présent article) ;
- C 5 200 - Eaux de distribution. Traitements unitaires ;
- C 5 201 - Eaux de distribution. Traitements spécifiques.

1. Séparation mécanique préalable

1.1 Emplacement et aménagement de la prise d'eau (eau de surface)

Une étude détaillée le long du cours d'eau et sur plusieurs sections droites ainsi qu'un relevé des rejets polluants en amont permettront de choisir le point de prise et le mode de prise (fond, milieu, berge, etc.) entraînant le moins de débit solide et de pollution.

Dans le cas de prise dans un réservoir naturel ou artificiel, l'endroit et la profondeur de prise devront pouvoir être choisis en cours d'année pour tenir compte des phénomènes limnologiques modifiant localement ou par strates la qualité des eaux stockées.

1.2 Dégrillage et tamisage

Ils arrêtent mécaniquement les corps flottants grossiers d'une dimension supérieure à celle des mailles ou à l'espacement des barreaux.

Les grilles et le tamis doivent être régulièrement nettoyés. Il existe des grilles et des tamis à nettoyage périodique automatique (figure 1).

1.3 Microtamisage

Les microtamis sont constitués par un tissu métallique au vide de maille de 20 à 60 µm.

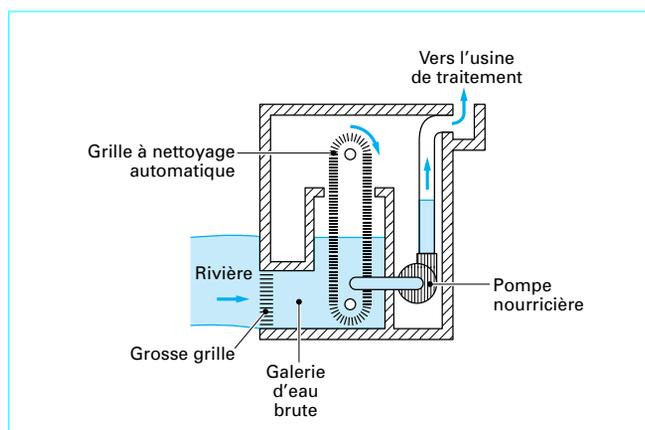


Figure 1 – Grille automatique

Ils sont obligatoirement autonettoyants. Leur usage est utile dans le cas d'eaux chargées de micro-organismes du type plancton qui sédimentent difficilement et qui engorgent très rapidement les filtres à sable (figure 2). On les utilise généralement pendant les périodes de foisonnement du plancton dans les retenues et les lacs.

2. Coagulation (coagulants et adjuvants)

2.1 But et théorie

La coagulation a pour but la déstabilisation des colloïdes et leur agglomération ainsi que celle des particules fines en suspension. Elle agit également par adsorption sur les substances dissoutes et les grosses molécules organiques hydrophiles en suspension stable. Elle est utilisée pour la clarification, la décoloration, l'agglomération des précipités résultant d'un adoucissement calcosodique, l'amélioration de goûts et d'odeurs.

Les colloïdes sont des particules qui ne décantent pas naturellement, en raison de leur grande surface spécifique et de leur très faible densité.

Les colloïdes sont soumis à des forces d'attraction (de Van der Waals) et à des forces de répulsion électrostatique. Ils sont généralement chargés négativement.

Afin de neutraliser cette charge des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés par le biais du coagulant viennent se coller aux colloïdes chargés négativement (couche fixe) et, au-delà, former un nuage autour du colloïde, on parle alors de double couche (figure 3) :

— la première adhère au colloïde, le potentiel (le potentiel traduit une énergie exprimée en volts) y décroît rapidement et linéairement ;

— la seconde est diffuse et le potentiel décroît lentement selon une loi de la forme :

$$E = E_S \exp - Kx$$

avec E_S potentiel de Stern (\approx potentiel zêta),

x la distance,

K facteur lié à l'épaisseur de la double couche.

Le colloïde est caractérisé par deux potentiels :

— potentiel thermodynamique à la surface du colloïde E_0 ;

— potentiel zêta au plan de cisaillement Z , c'est-à-dire pratiquement à l'interface des couches.

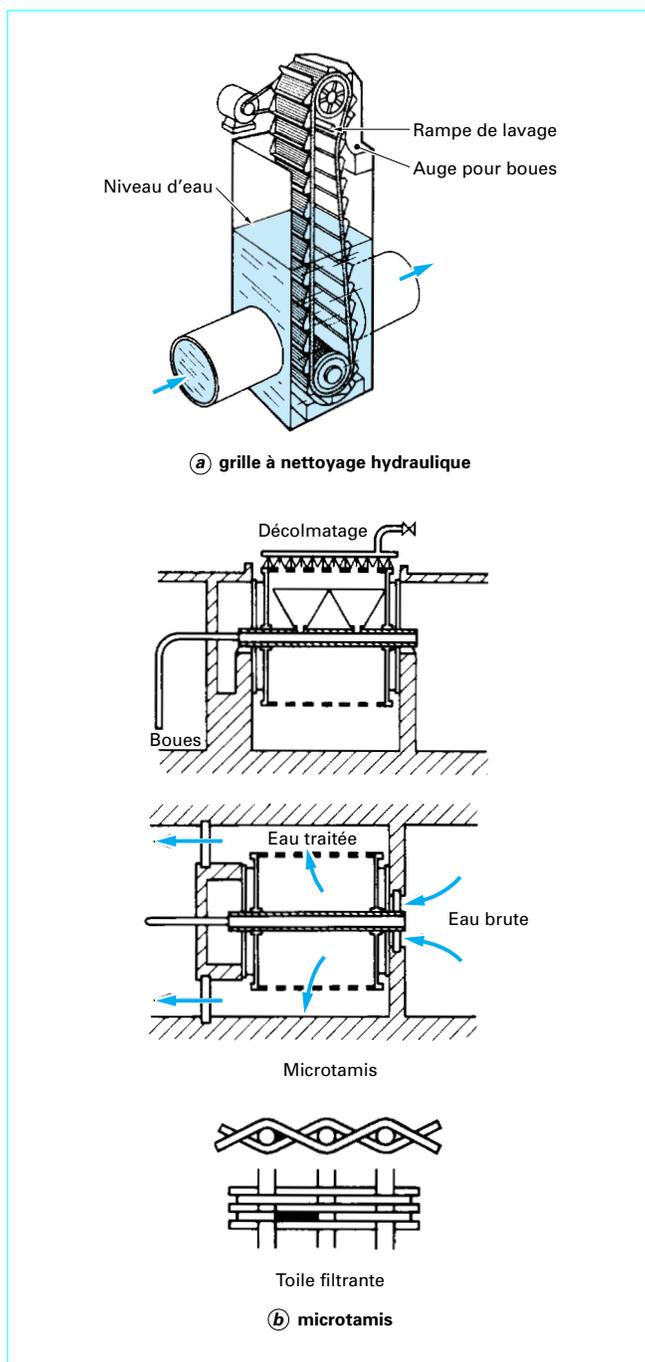


Figure 2 – Microtamisage (d'après doc. Baudrey)

Il y a coagulation lorsque les forces ont été équilibrées de façon à annuler le potentiel zéta. Ainsi les coagulants sont le plus souvent des sels de métal trivalent (fer, aluminium) qui apportent beaucoup d'ions positifs (cations). C'est la coagulation par adsorption. On peut la distinguer de la simple coagulation électrostatique, par diminution des forces de répulsion, et de la coagulation par entraînement (captation de particules d'une suspension diluée).

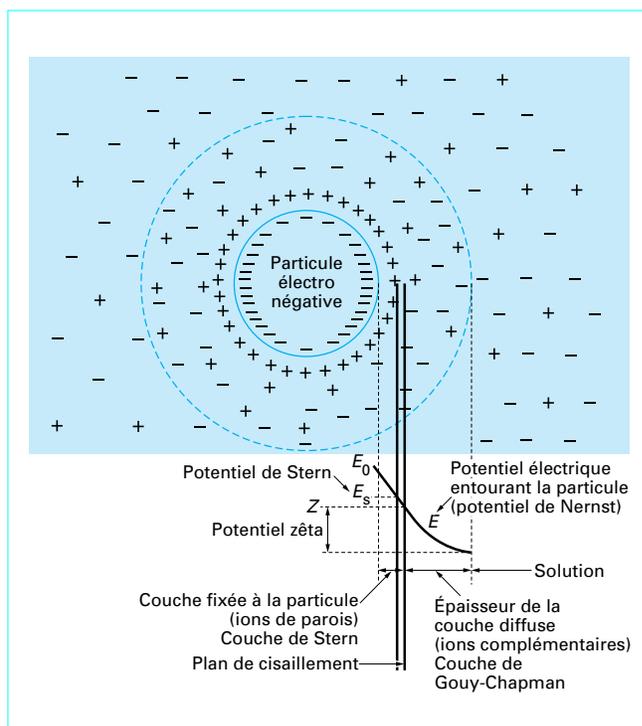


Figure 3 – Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électro-négative

2.2 Réactifs coagulants

Les coagulants utilisés pour le traitement des eaux destinées à l'alimentation humaine doivent :

- être peu coûteux ;
- être totalement inoffensifs par eux-mêmes et par les produits qu'ils forment ;
- pouvoir être mis en œuvre aisément ;
- pouvoir être dispersés sans difficultés ;
- avoir un pouvoir déstabilisant et rassemblant vis-à-vis des colloïdes hydrophiles ;
- avoir, par eux-mêmes ou leurs produits, un pouvoir agglomérant (collant) vis-à-vis des autres particules en suspension, et de préférence adsorbant vis-à-vis des matières organiques ;
- permettre la formation d'agglomérats lourds suffisamment cohérents pour résister sans être détruits à la turbulence résultant de l'écoulement des eaux dans les ouvrages de traitement.

Peu de corps répondent simultanément à toutes ces conditions. Ils sont présentés dans l'encadré 1.

Dans tous les cas, le coagulant, qui doit être très rapidement dispersé dans l'eau à traiter, réagit avec les bicarbonates, contenus dans l'eau (alcalinité) pour former un flocculat d'hydroxydes métalliques de structure complexe résultant de leur tendance à la polymérisation.

L'alcalinité de l'eau doit, par conséquent, être suffisante pour provoquer la décomposition du coagulant. Dans le cas contraire, on ajoute simultanément de la chaux ou, plus rarement, du carbonate de sodium.

En laboratoire, le choix par comparaison entre les coagulants et la détermination du taux de traitement optimal se fait au moyen de l'essai dit de « jar test » ou essai en flacons.

Encadré 1 – Réactifs coagulants

1. Les sels d'acides forts et de bases faibles :

- polychlorures basiques d'aluminium $Al_n(OH)_m Cl_{(3n-m)}$;
- polychlorosulfates basiques d'aluminium (WAC, WAC HB...) $Al_n(OH)_m (SO_4)_k Cl_{(3n-m-2k)}$;
- polyhydroxychlorosulfates (ou silicates) d'aluminium, etc. ;

- sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3, 18H_2O$;

- chlorure ferrique (trichlorure de fer) $FeCl_3$.

Les sels suivants sont essentiellement utilisés pour les eaux usées :

- sulfate ferrique $Fe_2(SO_4)_3$;

- sulfate de cuivre $CuSO_4$;

- chlorosulfate de fer $Fe_2(SO_4)_3 FeCl_3, 18H_2O$.

2. Les sels de bases fortes et d'acides faibles : l'aluminate de sodium $NaAlO_2 nH_2O$ n'est guère cité que pour la théorie.

Cet essai s'effectue à l'aide d'un appareillage comprenant cinq (ou plus) récipients de 1 L environ (Jars) soumis, simultanément, à une agitation de rotation identique (figure 4). Cette agitation est d'abord rapide, de façon à disperser les réactifs testés au sein de l'eau étudiée, puis lente (40 à 20 tr/min), de façon à favoriser la **coalescence** des flocons formés.

Nota : **coalescence** : réunion par simple contact de petits amas neutres formés par la floculation des colloïdes pour former de plus gros flocons.

L'agitation terminée (15 à 20 min), on laisse les matières en suspension se déposer et l'on note le volume et l'aspect des flocons et des boues ainsi que la turbidité du liquide surnageant, en l'état et filtré sur papier.

Il faut procéder à une température voisine de celle de l'eau qui sera traitée en station.

Dans un premier essai, on recherche la dose optimale pour un coagulant donné (dosage échelonné croissant d'un récipient à l'autre), puis l'on compare l'efficacité de coagulants et adjuvants divers, tout en ajustant le pH optimal. La notion de pH optimal de coagulation-floculation est particulièrement importante ; pour être dans la zone des précipités d'hydroxydes métalliques, des pH acides sont requis, entre 4,5 et 6,5 selon les coagulants (figures 5 et 6). Le coagulant lui-même abaisse le pH proportionnellement à la dose introduite. Cela ne suffit pas toujours et il faut alors acidifier préalablement. Avec des eaux naturellement très acides, ce peut être le contraire. Tout cela doit être compatible avec l'alcalinité suffisante (déjà évoquée précédemment) pour permettre la décomposition du coagulant.

L'essai se prête aussi à l'étude de l'effet d'addition de microsable utilisé pour la décantation lestée.

2.3 Streaming current detector

Le *Streaming current detector* (SCD) est un appareil permettant d'ajuster automatiquement la dose de coagulant en fonction des variations de la qualité de l'eau brute.

Le principe est basé sur la théorie de la double couche. L'eau coagulée circule dans un espace annulaire entre un cylindre fixe et un piston en mouvement, dans un champ électrique délimité par deux électrodes. Les colloïdes coagulés s'adsorbent alors sur les parois du cylindre et du piston. Le mouvement alternatif du piston (environ 500 fois par minute) arrache les ions de la couche diffuse des colloïdes et crée un courant alternatif de quelques microampères. C'est ce courant dit « cinétique » qu'il faut rendre minimal pour optimiser la coagulation (figure 7).

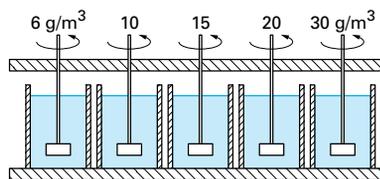


Figure 4 – Appareil pour jar test

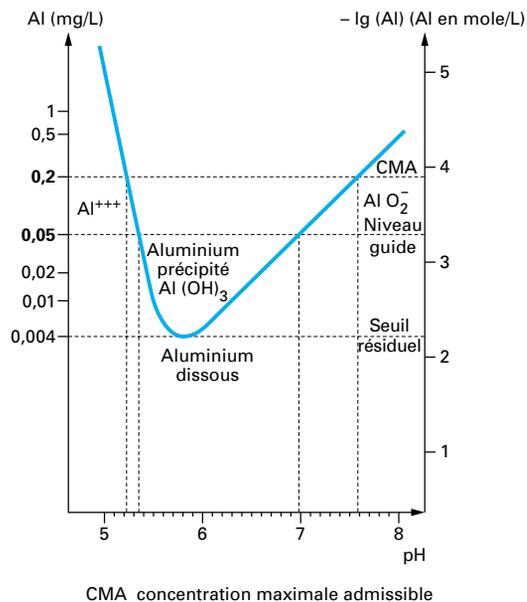


Figure 5 – Diagramme de solubilité de l'aluminium

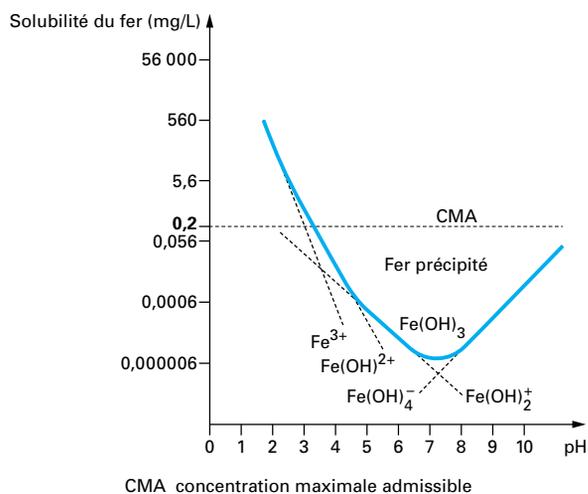


Figure 6 – Diagramme de solubilité du fer

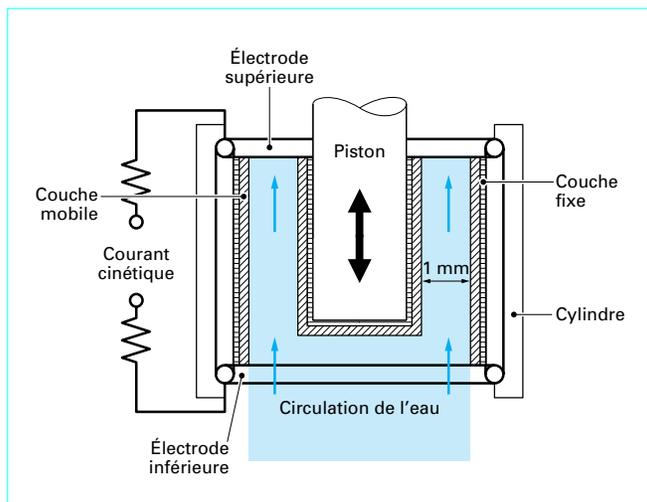


Figure 7 – Streaming current detector

2.4 Adjuvants

Pour améliorer l'effet des coagulants vis-à-vis de l'agglomération des particules en suspension, ou encore pour améliorer, d'une part, la résistance mécanique des agglomérats obtenus et pour, d'autre part, accroître leur pouvoir d'adhésion au sable des filtres ou au micro-sable fluidisé, on utilise des adjuvants à dose faible. Ces adjuvants jouent également un rôle pour améliorer la floculation : on les appelle tantôt *adjuvants de coagulation*, tantôt *adjuvants de floculation*. Le plus ancien est minéral : c'est la silice activée (silicate de sodium neutralisé par addition d'un corps fournissant des ions acides, comme CO_2 ; la structure du produit est celle d'un polysilicate, dont le comportement peut être assimilé à celui d'un polyélectrolyte anionique). Les plus récents et les plus efficaces sont des polyélectrolytes organiques formant de longues chaînes qui jouent le rôle d'armature au sein des agglomérats et qui, par ailleurs, rendent plus adhésives les surfaces des grains des filtres. Amidons de pomme de terre et de tapioca sont de tels polymères non ioniques. De nombreux polyélectrolytes de synthèse sont utilisés dans divers pays étrangers. En France, les autorités sanitaires, n'autorisent à ce jour que les hétéropolysaccharides anioniques, les alginates de sodium et les polyacrylamines. Ces produits sont, en pratique courante, appliqués dans les stations de traitement d'eau potable en France à des doses de quelques grammes ou fractions de grammes par mètre cube. Le taux est déterminé par *jar test*. On emploie également comme adjuvant naturel une argile négative appelée *bentonite*.

3. Floculation

Pour favoriser la dispersion des réactifs dans l'eau à traiter et la formation consécutive de gros agglomérats, on introduit les coagulants et adjuvants en des endroits où règne une forte turbulence (chute, remous, agitation mécanique rapide, etc.) ; on parle de *flash mixing* ou de *flash mélange* et la durée de séjour ne doit pas y excéder 2 min ; la notion d'énergie de dispersion est très importante.

On introduit ensuite l'eau dans un ouvrage où règne une turbulence faible mais non négligeable. Les microflocons formés au stade de l'agitation rapide voient leur dimension croître considérablement par effet de pontage notamment. En fait la floculation est

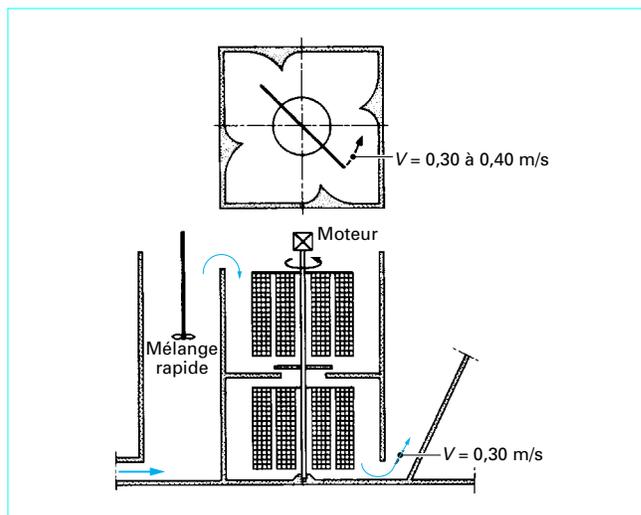


Figure 8 – Flocculateur (d'après doc. Vivendi)

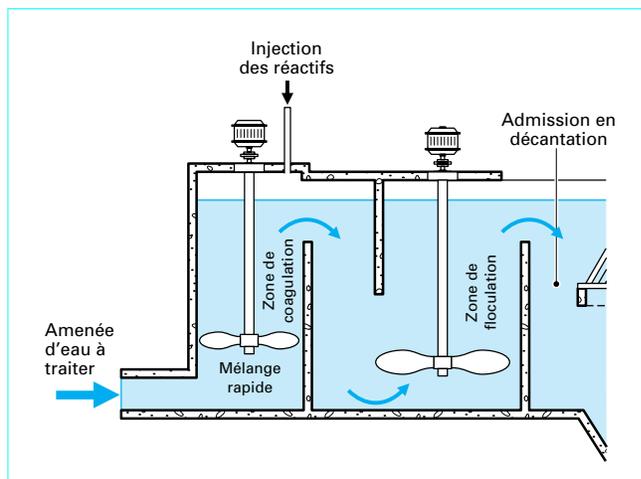


Figure 9 – Flocculateur à pales

un cas particulier de coagulation par adsorption ; on distingue usuellement la floculation péricinétique (mouvement brownien des particules) et la floculation orthocinétique (liée au déplacement du fluide). L'ouvrage où se produit l'opération s'appelle un flocculateur (figures 8 et 9) ; il existe des flocculateurs statiques, du type à chicanes (section fixe ou croissante) et des flocculateurs dynamiques, les plus fréquents actuellement, à pales ou à équipages tournants, à un ou deux compartiments verticaux ou horizontaux. Les quatre notions de base à retenir pour une bonne floculation sont :

- le brassage ne doit pas avoir d'effet destructif ;
- le temps de floculation qui doit se situer entre 10 et 30 min ;
- le gradient d'écoulement :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu}}$$

avec μ viscosité dynamique,

P puissance dissipée par unité de volume (frottements) ;

- une totale absence de courts circuits hydrauliques.

La cohésion du floc peut être augmentée de deux façons :

— en introduisant dans la masse de flocons une partie des flocons constituant les boues en excès extraites lors de la décantation ;

— en maintenant une masse de flocons en expansion, que l'eau chargée de flocons, plus ou moins développés, traverse de bas en haut.

Dans certaines filières, dites compactes, le flocculateur peut ne pas exister séparément, mais le stade de la floculation est toujours ménagé, par exemple dans la partie inférieure d'un lit de boue ou d'un lit de microsable fluidisé ; dans ces derniers ouvrages, la floculation est accélérée et le temps de séjour réduit à quelques minutes. En effet, la grande surface développée, que présentent les grains de microsable, crée une zone importante de réactivité ; la cinétique de floculation est également plus élevée.

4. Décantation

4.1 Généralités

C'est la phase au cours de laquelle les gros agglomérats sont séparés de l'eau traitée. On peut distinguer trois types d'appareils :

— ceux où la séparation est acquise par chute des agglomérats jusqu'au contact d'une surface fixe ;

— ceux où la séparation s'obtient par contact avec un lit fluidisé de boues préformées ;

— et, dans les appareillages les plus récents, ceux où la décantation est accélérée par un lest de microsable.

Nota : on emploie plutôt le terme de décantation en traitement de l'eau que sédimentation à connotation plus géologique ou médicale. *A contrario*, on parlera plutôt de sédimentation dans une retenue naturelle ou artificielle.

4.2 Théorie

4.2.1 Loi de Stokes

Loi de Stokes permet de définir la vitesse relative de chute d'une particule sphérique donnée dans un fluide immobile donné (ici l'eau) :

$$V_S = \frac{2g}{9} \frac{(\rho - 1)R^2}{M}$$

avec V_S vitesse de Stokes,
 ρ masse volumique de la particule,
 R rayon de la particule,
 M viscosité du milieu,
 g accélération due à la pesanteur.

V_S est donc avant tout une caractéristique de la particule.

Pour augmenter la vitesse de Stokes, donc de chute des particules présentes dans l'eau brute (en suspension, colloïdes...), il y a deux possibilités :

— augmenter le rayon des particules (floculation, polymères...) ;
 — augmenter la masse volumique de ces particules (polymères, microsables). La masse volumique moyenne du floc est d'environ $1,03 \text{ kg/dm}^3$; celle du floc lesté par du microsable passe à environ $1,6 \text{ kg/dm}^3$, ce qui permet de multiplier la vitesse de chute par un facteur pouvant idéalement atteindre 20.

Par ailleurs, la vitesse de chute d'une particule est inversement proportionnelle à la viscosité du liquide, sur laquelle il n'est pas possible d'agir. Le fait que la viscosité varie en sens inverse de la température constitue une des raisons pour lesquelles la décantation est plus lente en hiver qu'en été.

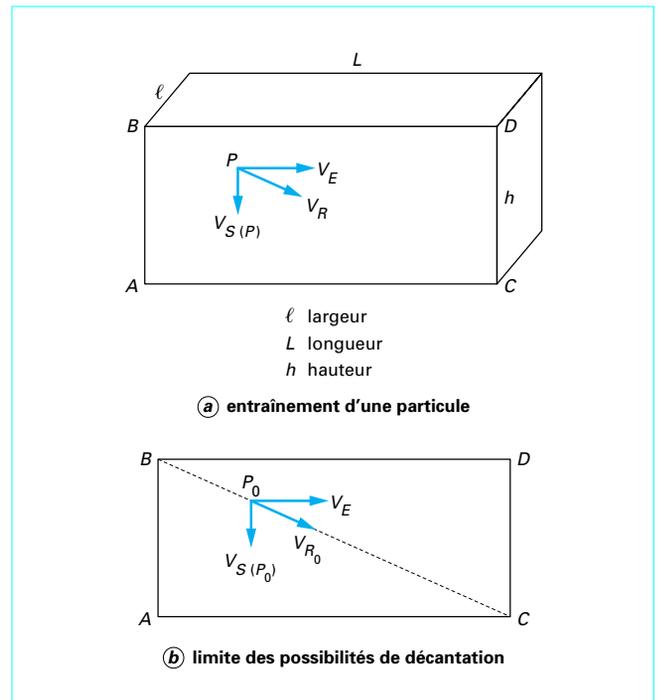


Figure 10 – Décantation horizontale

4.2.2 Théorie de la décantation horizontale et verticale. Vitesse de Hazen

Pour être retenue lors de la décantation, une particule doit atteindre le radier du décanteur (et y rester).

Or, cette particule est entraînée horizontalement (décanteur horizontal) ou verticalement vers le haut (décanteur vertical) sous l'effet du courant d'eau à traiter.

4.2.2.1 Décantation horizontale

Soit un décanteur horizontal simple (figure 10a), on appelle $S = L \times l$ la surface utile du radier.

■ Vitesse de Hazen

Une particule P est entraînée verticalement vers le fond du décanteur à la vitesse $V_{S(P)}$, vitesse de Stokes de la particule P dans l'eau.

La particule est également entraînée horizontalement par le courant d'eau (de débit Q), sous l'effet d'une vitesse d'écoulement V_E .

La vitesse résultante, notée V_R , dépend de $V_{S(P)}$ et de V_E ; si la droite qui porte cette vitesse V_R traverse le fond du décanteur avant son extrémité C , la particule peut décanter.

La limite des possibilités de décantation pour une particule P , entrée à la partie supérieure B de l'ouvrage, est de chuter le long de la diagonale BC .

Cela veut dire que la vitesse résultante de P_0 ; notée V_{R0} , est portée par la diagonale BC (figure 10b)

Les conditions s'écrivent :

$$\frac{V_{S(P_0)}}{V_E} = \frac{h}{L} \quad \text{et} \quad V_E = \frac{Q}{l \times h}$$

On en déduit :

$$V_{S(P_0)} = \frac{Q}{S}$$

L'expression Q/S , exprimée en m/h, a la dimension d'une vitesse. On l'appelle vitesse de Hazen, notée V_H . Elle représente l'efficacité intrinsèque d'un décanteur.

Plus la vitesse de Hazen V_H dans un décanteur est faible, plus un pourcentage élevé de particules présentes à l'entrée peut décanter.

4.2.2.2 Décantation verticale

Les mêmes notions s'appliquent à la décantation verticale.

Dans le décanteur vertical simple, la vitesse de Hazen est égale à la vitesse ascensionnelle.

La vitesse ascensionnelle est la vitesse de circulation de l'eau vers le haut dans la partie supérieure cylindrique de l'ouvrage.

La chute d'une particule obéit donc au schéma de la figure 11.

$$V_C = V_S - V_H$$

avec V_S vitesse de Stokes ou vitesse de chute théorique en statique,

V_H vitesse de Hazen dans l'ouvrage,

V_C vitesse de chute réelle.

Si $V_S > V_H \Rightarrow V_C$ entraîne la particule vers le bas.

Si $V_S < V_H \Rightarrow V_C$ entraîne la particule vers le haut.

4.2.2.3 Pratique

Quel que soit le type de décantation, son efficacité nécessite des vitesses de Stokes importantes, et une vitesse de Hazen faible.

La coagulation-floculation permet d'accroître la vitesse de Stokes des particules.

Pour réduire la vitesse de Hazen, on peut :

- pour un débit Q donné, augmenter la surface utile du radier ;
- pour un décanteur donné, diminuer le débit d'entrée.

Dans la pratique, on cherche à faire passer le plus grand débit possible dans l'ouvrage le plus compact possible, avec une faible vitesse de Hazen pour retenir le maximum de particules.

Il faut donc créer une surface de « radier pratique », à l'intérieur de l'ouvrage, plus grande que la surface représentée par l'emprise au sol.

Cela conduit, par exemple, à superposer des étages de décanteurs en décantation horizontale.

La technique la plus utilisée est celle des modules lamellaires. Dans cette technique, la surface utile est la surface développée totale des plaques de modules affectée d'un coefficient dépendant de l'écartement et de la pente des plaques. Cette surface est très nettement supérieure à celle de l'emprise au sol du décanteur. À vitesse de Hazen égale, un débit plus important peut donc passer.

4.2.2.4 Vitesse au miroir ou vitesse caractéristique du décanteur

Pour des ouvrages très performants, la vitesse de Hazen n'est pas parlante et son calcul devient vite complexe (fonction des « surfaces développées », angles d'inclinaison...).

Il est donc intéressant de trouver une expression des performances de l'ouvrage de décantation qui est appelée *vitesse au miroir* ou *vitesse caractéristique du décanteur*, parfois abusivement appelée vitesse de surverse. Cette vitesse correspond au quotient du débit par l'emprise au sol du décanteur.

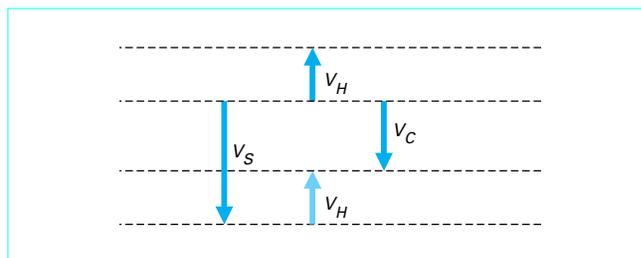


Figure 11 – Décantation verticale

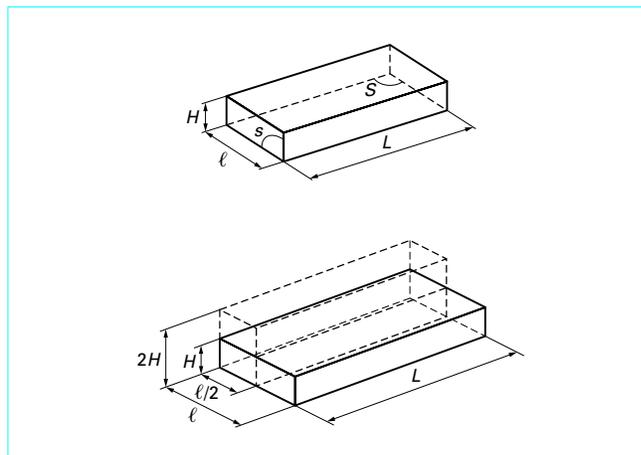


Figure 12 – Décanteur horizontal : principe

4.2.3 Décantation à contact de boue

Lorsqu'un floc rencontre de la boue déjà formée par accumulation de floc, le floc peut avoir tendance à être piégé par la boue ou à grossir à son contact.

Les deux phénomènes de séquestration qui permettent d'accroître la vitesse caractéristique de décantation d'un ouvrage sont :

- l'adsorption ;
- le grossissement.

4.3 Décanteurs à écoulement horizontal

Dans ces décanteurs, le pouvoir de coupure est déterminé par la surface horizontale offerte au dépôt (figure 12) comme on l'a vu dans l'exposé succinct de la théorie. Il y a toutefois des limites pratiques imposées par le non-entraînement des boues déposées qui les remettrait très vite en suspension. En corollaire, l'on voit qu'il est indispensable de limiter le dépôt de boues et donc d'extraire celles-ci en continu ; divers systèmes sont utilisés, les plus courants et les plus efficaces à présent étant des râcleurs de fond avec aspiration des boues. Cela n'empêche pas de vidanger périodiquement les ouvrages (figure 13).

4.4 Modules lamellaires

Une évolution logique a conduit aux décanteurs lamellaires où, sur le trajet de l'eau, on dispose des empilements parallèles de surfaces de dépôt. Pour éviter l'obstruction rapide de tels dispositifs,

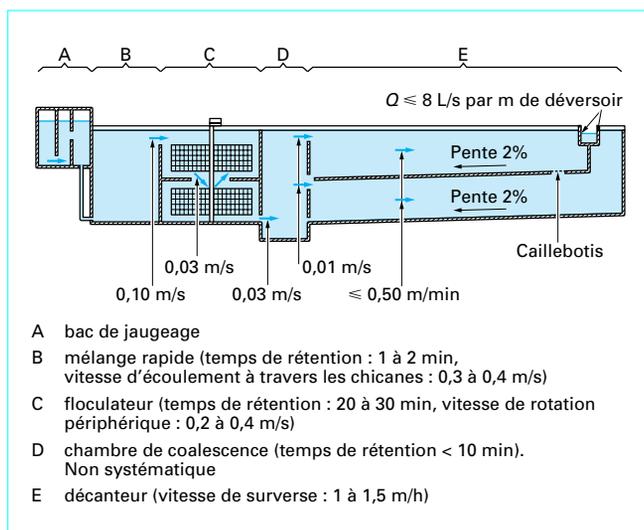


Figure 13 – Décanteur horizontal (d'après doc. Vivendi)

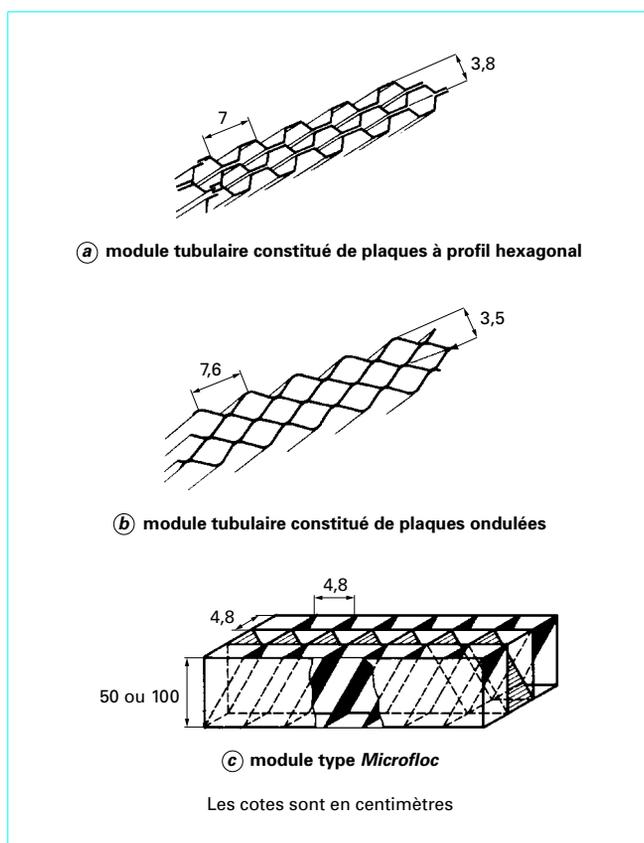


Figure 14 – Modules lamellaires

les lamelles, qui sont très rapprochées, sont inclinées sur l'horizontale (inclinaison d'autocurage : 52°). Les lamelles peuvent être remplacées par des empilements de tubes. Le passage de l'eau

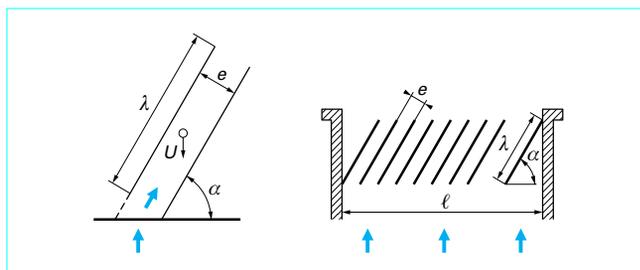


Figure 15 – Décantation lamellaire dans un flux vertical

entre les lamelles peut être à cocourant ou à contre-courant du glissement des boues déposées (figure 14), ou encore orthogonal.

Ces dispositifs peuvent faire l'objet d'ouvrages spécialement construits autour d'eux ou encore être ajoutés à des ouvrages à écoulement horizontal ou à écoulement vertical (décanteur à voile de boues, décanteur à lits fluidisés).

L'amélioration des performances découlant de l'utilisation des lamelles est :

— pour un écoulement horizontal, évacuation orthogonale des boues, de :

$$\frac{Q/S}{u} = \frac{H \cos \alpha}{e}$$

— pour un écoulement vertical (figure 15), de :

$$\frac{Q/S}{u} = \frac{\lambda \left(1 - \frac{\lambda}{\ell} \cos \alpha\right) \sin \alpha}{\frac{\ell}{\cos \alpha} + 20(p+1)}$$

avec e espacement entre deux surfaces de dépôt,
 ℓ largeur de l'ouvrage,
 p rapport de l'élément constitutif d'un module ($p = 1$ pour un tube de section carrée, $p = \infty$ pour des plaques parallèles),
 α angle d'inclinaison (autocurage pour $\alpha \geq 52^\circ$),
 λ longueur d'un élément constitutif (dans le sens du parcours de l'eau).

4.5 Décanteurs à écoulement vertical

Il faut distinguer les décanteurs verticaux à coagulation-floculation séparée de la zone même de décantation (figure 16), et les décanteurs à lit de boue mis périodiquement en suspension (figure 17), où la floculation s'effectue au travers et au contact du voile de boue.

Dans tous ces appareils, il se produit une accumulation des boues dans la partie inférieure. L'art des concepteurs est de calculer l'ouvrage, de le profiler, de mettre en œuvre des recirculations et soutirages de boues de telle sorte que l'on profite au mieux des flocons existants et des nouveaux pour optimiser le floc en taille, en qualité de rétention et en répartition spatio-temporelle, ce qui conduit à une qualité d'eau décantée également optimale. Les boues sont plus ou moins fluidisées (restent en suspension expansée), mais ne remontent pas à la surface du décanteur et ne sont donc pas évacuées par les goulottes de sortie avec l'eau claire (figure 17).

Le lit de boues possède un certain pouvoir d'arrêt sur les agglomérats nouvellement produits par l'application des coagulants à l'entrée des ouvrages. Il prendrait un volume de plus en plus grand si on n'en évacuait pas l'excès en permanence (à l'aide de concen-

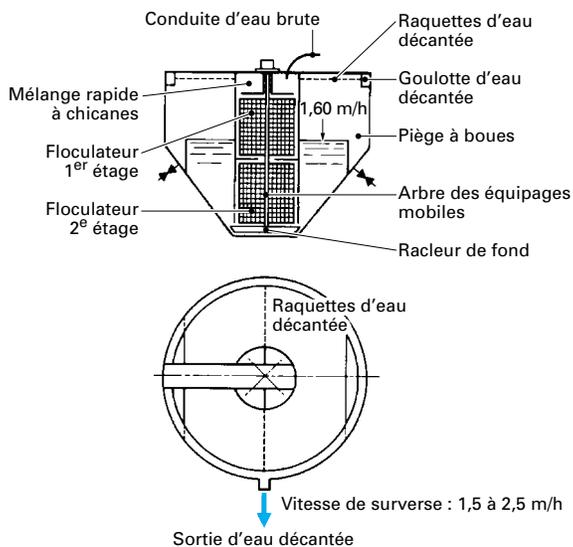


Figure 16 – Décanteur vertical (d'après doc. Vivendi)

trateurs purgés périodiquement). Encore plus que les décanteurs à écoulement horizontal, ces décanteurs verticaux ne fonctionnent vraiment bien que si l'équilibre dynamique se trouve obtenu en permanence. Leur avantage réside dans un pouvoir séparateur plus grand pour une même surface de radier que celui d'un décanteur horizontal monoétage (leur vitesse caractéristique est supérieure). Toutefois leur réglage est plus délicat ; ils sont notamment plus sensibles aux variations du débit admis en tête et aux variations du débit solide (matières en suspension, taux de coagulant).

4.6 Amélioration des décanteurs

Une amélioration sensible de la fiabilité et du pouvoir séparateur des décanteurs verticaux a été obtenue en disposant à la partie supérieure des modules lamellaires (figures 18 et 19).

Une autre voie de stabilisation et d'amélioration des performances a été le lestage des agglomérats à l'aide de micro-sable (25 à 100 μm) ; les flocons, dopés par un adjuvant polyélectrolyte, se fixent fortement sur des grains de micro-sable et le flocon composite est beaucoup plus dense ; il se sépare rapidement de l'eau traitée pour des vitesses verticales élevées.

Les boues lestées accumulées sur le radier sont évacuées par raclage et le micro-sable, séparé des boues dans un hydrocyclone, retourne dans le circuit de traitement (figure 20). Des performances doubles ou triples de celles des appareils à lit de boues classiques sont ainsi obtenues avec une stabilité de fonctionnement excellente.

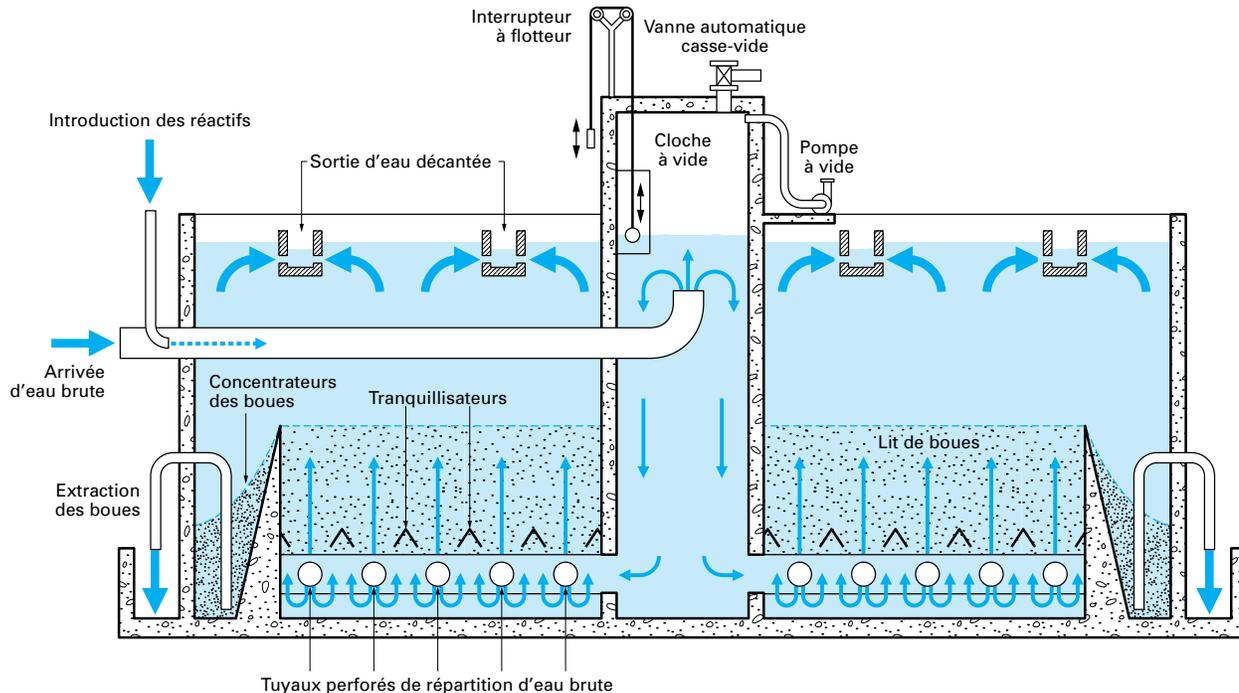


Figure 17 – Décanteur vertical à lit de boues Pulsator (d'après doc. Degrémont)

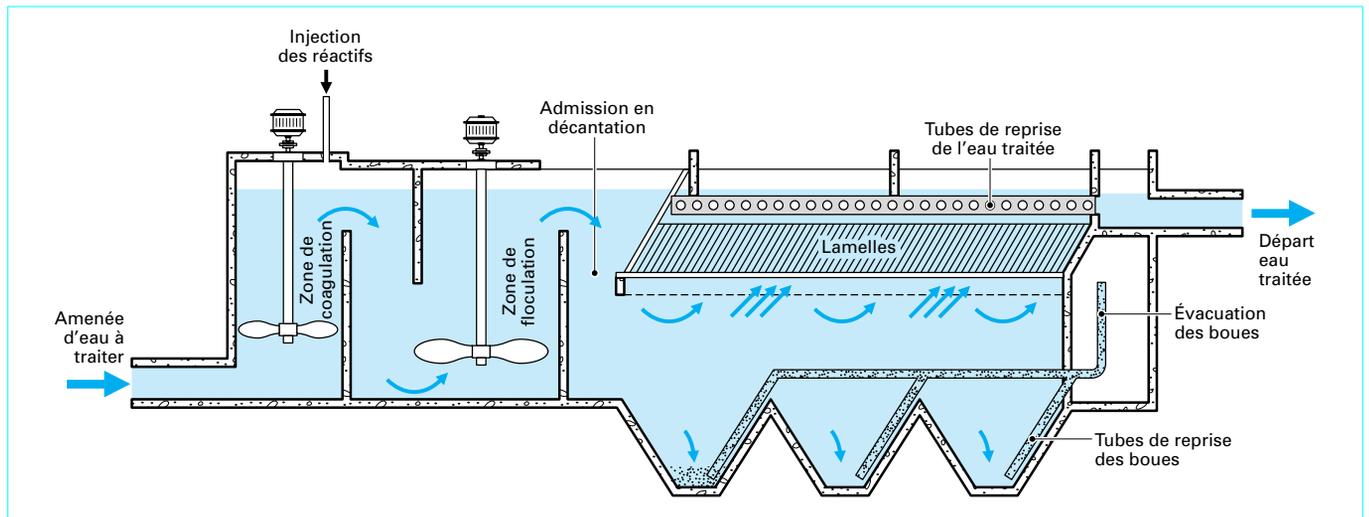


Figure 18 – Décanteur Multiflo (d'après doc. OTV)

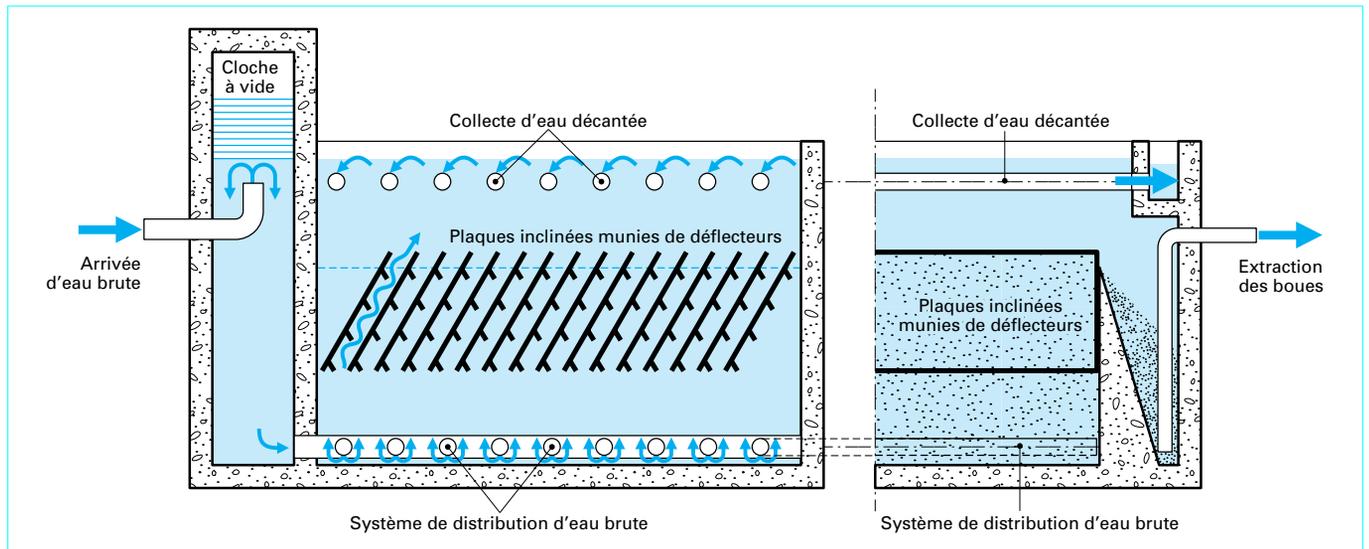


Figure 19 – Décanteur Pulsator avec lames (d'après doc. Degremont)

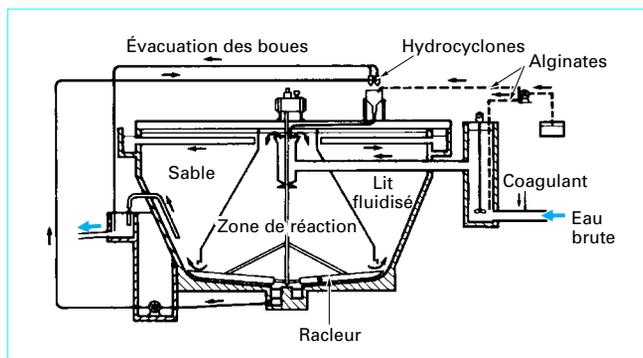


Figure 20 – Décanteur à lit de boues lestées Cyclofloc (d'après doc. OTV)

La synthèse de ces différents perfectionnements a été obtenue dans des appareils à lit de microsable fluidisé dont l'expansion est bloquée par l'utilisation de modules lamellaires disposés à la partie supérieure. Un lit de microsable activé par un adjuvant reçoit à sa partie inférieure l'eau chargée de réactifs de coagulation. Cette eau maintient le lit en fluidisation et le traverse en subissant une turbulence décroissante. Le lit fluidisé remplit les deux rôles de dispersion (agitation rapide) et de floculation (agitation réduite) ainsi qu'un troisième rôle, celui d'un filtre expansé ; les flocons finalement adhérent aux grains de microsable. Les grains saturés (qui se regroupent à la partie supérieure du lit) sont évacués à travers un concentrateur et sont séparés des boues dans un hydrocyclone. Les micrograins propres reçoivent une faible dose d'adjuvant et sont renvoyés au sein du lit. Les séparateurs lamellaires situés à la partie supérieure assurent un double rôle de finisseur de clarification et de stabilisateur vis-à-vis des variations du débit. Les performances d'un tel dispositif sont près de huit fois supérieures à celles d'un décanteur classique à écoulement horizontal.

4.7 Derniers développements

Les derniers décanteurs les plus performants sont en fait des ensembles de clarification mettant en œuvre des réacteurs de coagulation-floculation très soignés. Certains complètent le dispositif avec un réacteur décanteur-épaississeur avec recirculation de boues puis séparateur lamellaire. D'autres ont perfectionné les techniques de lestage du floc qui est introduit après maturation dans une zone de séparation lamellaire. Les derniers clarificateurs ainsi construits ont des vitesses caractéristiques bien supérieures à 30 m/h) (jusqu'à 60 m/h), au lieu de vitesses de l'ordre de 1 m/h pour les décanteurs horizontaux classiques (figure 21). Cela permet notamment des gains de place et de coûts de génie civil.

4.8 Flottation

La flottation est en quelque sorte une décantation à l'envers. Le procédé consiste à alléger à l'aide de très fines bulles d'air un floc

naturellement léger et fragile. Le floc dont la masse volumique est alors plus faible que celle de l'eau, est entraîné vers la surface de l'ouvrage où il s'accumule. L'eau clarifiée est collectée en partie basse du flottateur. Les boues de surface sont raclées vers une goulotte d'évacuation.

4.8.1 Production de bulles d'air

Les forces d'attachement des bulles d'air sont le résultat d'actions de surface caractéristiques des bulles d'air et des flocons. Ces forces sont d'autant plus grandes que la taille des bulles est faible.

Le meilleur moyen de produire des bulles de très petite taille est de dissoudre de l'air dans l'eau à une pression de quelques bars et de procéder ensuite à une détente de cette eau. La solubilité de l'air dans l'eau augmentant avec la pression, le retour à la pression atmosphérique normale s'accompagne du dégagement de l'excès d'air dissous sous forme de très fines bulles.

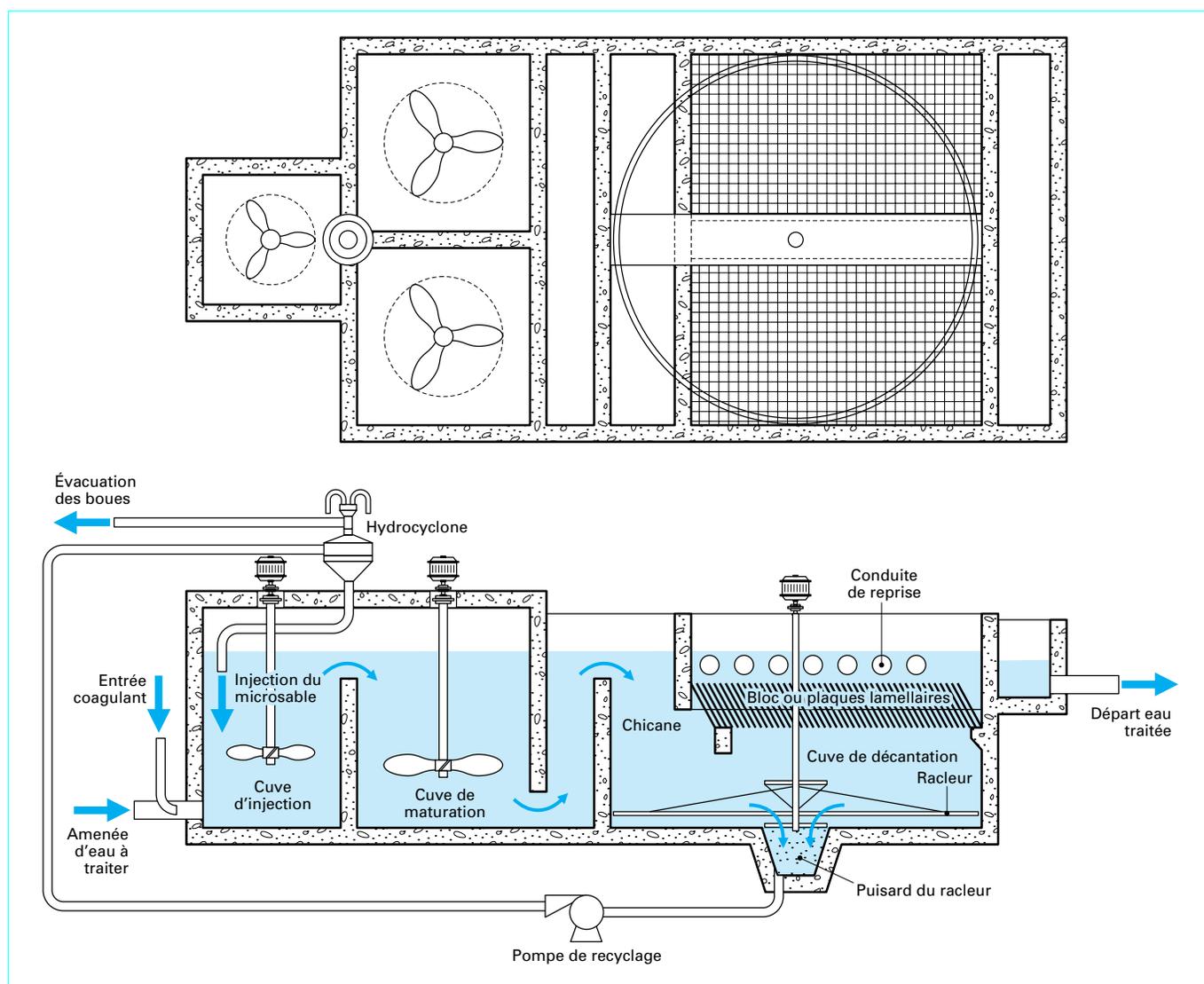


Figure 21 – Décanteur *Actiflo* (d'après doc. OTV)

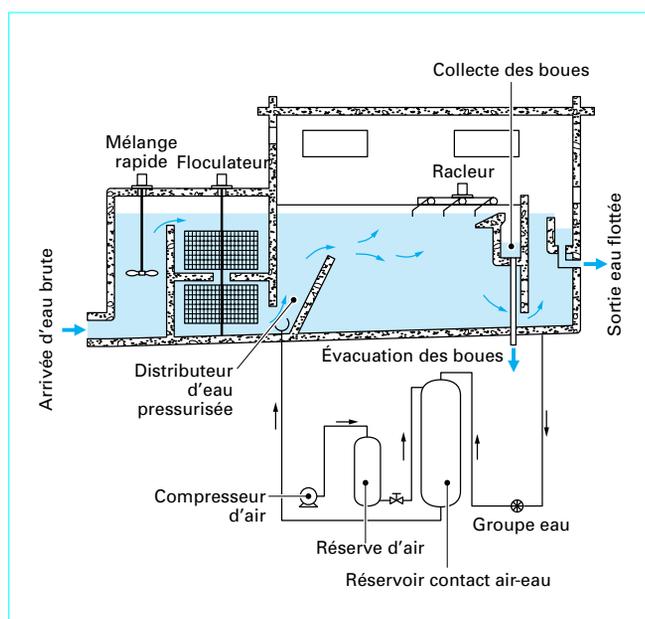


Figure 22 – Flottateur

4.8.2 Principe de fonctionnement

L'eau brute, préalablement floculée, pénètre à la partie basse de l'ouvrage dans une chambre de contact avec l'eau pressurisée (figure 22). L'eau pressurisée est distribuée uniformément sur la largeur de l'ouvrage à l'aide de « pots » de détente. Leur rôle est d'éviter la destruction du floc, par l'énergie libérée lors de la détente de l'eau pressurisée.

L'eau pressurisée est obtenue par contact air-eau dans un bidon sous une pression variant entre 5 et 6 bar. Le débit d'eau pressurisée représente 10 à 30 % du débit à traiter. La vitesse ascensionnelle du floc allégé est de l'ordre de 5 à 8 m/h.

L'eau clarifiée est collectée à l'aval de l'ouvrage sous une cloison siphonée.

La boue accumulée en surface est évacuée périodiquement par grattage vers une goutte.

L'ensemble du flottateur doit être couvert, afin que les boues ne soient pas désagrégées par le vent et la pluie.

Certains ouvrages sont équipés d'un racleur de fond. En effet, certaines particules peuvent ne pas être aptes à flotter, et il peut se produire un dépôt sur le radier pendant les arrêts.

5. Filtration

On se reportera aux articles *Filtration* du traité Génie des procédés.

5.1 Généralités

Dans la recherche d'une clarification, la filtration est le processus de finition par excellence. Parallèlement à ses propriétés de fixation des particules en suspension, la filtration peut agir par adsorption

et être le siège de processus biologiques. Un filtre est composé d'un lit de matières granuleuses qui est traversé par l'eau à traiter à des vitesses variables de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ à $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ($480 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) ; la hauteur du lit granuleux, la granulométrie et la nature du matériau sont adaptées aux conditions d'emploi.

5.2 Filtration lente

C'est la première application historique. On cherche à y reproduire les phénomènes spontanés de la filtration naturelle par le sol. Les filtres lents doivent subir une période préalable de maturation au cours de laquelle se forme une membrane superficielle, dite membrane biologique, où se développent des colonies de micro-organismes. L'action du filtre lent est double : on y obtient une clarification mécanique ainsi qu'une purification par dégradation biologique accompagnée d'une adsorption-absorption par le complexe biologique de la membrane.

Les filtres lents (quelques $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) donnent d'excellents résultats dans les cas où la pollution est naturelle (non toxique pour les micro-organismes) et la quantité de matières en suspension faible. Ils ne conviennent pas au traitement des eaux polluées par des rejets variables plus ou moins toxiques auxquels la vie des micro-organismes n'a pas le temps de s'adapter. En ce qui concerne les matières en suspension, les filtres lents doivent obligatoirement être précédés d'un prétraitement : décantation naturelle, dégrossisseurs à gravier, préfiltres à granulométrie élevée. Le sable de filtration est d'une granulométrie de 0,35 mm et l'épaisseur de couche filtrante est de l'ordre de 1 m. Les filtres lents doivent être nettoyés périodiquement par grattage de la couche supérieure quand le degré de colmatage est trop grand. Ils demandent de très grandes surfaces pour eux-mêmes comme pour les ouvrages de prétraitement qui doivent les précéder : 500 à 1 200 m^2 pour 10 000 habitants pour les filtres lents proprement dits, à multiplier par 2 pour tenir compte des prétraitements du stockage de sable de remplacement, de la circulation, etc. Les filtres lents exigent également, pour le nettoyage, un personnel nombreux. Si on y ajoute leur inadaptation à faire face à des pollutions d'origine industrielle des eaux de surface, on comprend pourquoi cette technique tombe maintenant en désuétude. On en retrouve cependant les caractéristiques dans les méthodes de prétraitement faisant appel à la filtration des eaux de rivière par les berges, à la réalimentation des nappes surexploitées qui se trouvent en amont des stations de traitement avec coagulation, sédimentation et filtration rapide.

5.3 Filtration rapide

5.3.1 Généralités

La filtration à travers un milieu granuleux [de l'ordre de quelques $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] présente un double phénomène de blocage dimensionnel et d'adhésion à la surface des grains du lit filtrant, qui est très différent de l'arrêt provoqué par un tamis, par exemple, où le vide des mailles est la caractéristique essentielle. Dans la filtration sur grains, le pouvoir d'arrêt est ainsi commandé par la surface totale des grains du lit qui elle-même, pour un lit donné, est une fonction inverse de la dimension caractéristique du grain moyen.

Le phénomène de filtration est varié en raison du colmatage inhérent à l'accumulation des impuretés sur la surface des grains qui réduit la dimension des canalicules ; il peut se produire également une détérioration du filtrat en raison de l'érosion des boues arrêtées, consécutive à l'accroissement de vitesse dans les canalicules. Nous appellerons pour la suite cette vitesse, *vitesse interstitielle*.

L'optimisation technico-économique d'un filtre consiste à obtenir, avec des durées de vie suffisamment longues entre deux

décolmatages successifs, un filtrat de qualité acceptable. Pour résumer, on peut dire que le pouvoir d'arrêt est lié à une fonction :

$$f(h, 1/d, V)$$

avec h hauteur du lit,
 d diamètre caractéristique de la granulométrie,
 V la vitesse de filtration ($V = Q/S$ avec Q débit, S surface du radier du filtre).

Des études plus fines, menées notamment par Mintz et par Ives, ont conduit aux relations ci-après :

$$-\frac{\partial C}{\partial h} = kC \quad \text{et} \quad -\frac{\partial C}{\partial h} = \frac{1}{V} \frac{d\sigma}{dt}$$

avec C concentration en matières en suspension du filtrat,
 k coefficient caractérisant le pouvoir d'arrêt du filtre vis-à-vis des matières en suspension et qui est lié au traitement de coagulation précédant la filtration,
 h cote du point du filtre considéré,
 V vitesse de filtration,
 t temps,
 σ volume des matières en suspension arrêtées par unité de volume de filtre à la cote h et au temps t .

Par ailleurs, la perte de charge créée par la filtration est donnée par la relation :

$$\frac{\partial P}{\partial h} = 5v \frac{V(1-f)^2}{g f^3} \left(\frac{6}{d}\right)^2 + A\sigma$$

avec P perte de charge,
 v viscosité cinématique,
 f porosité du lit,
 g accélération due à la pesanteur,
 A coefficient ($A = A_0 V^\alpha/d^\beta$ avec α et β paramètres).

h et A_0 sont à déterminer en station pilote par l'expérimentation.

Exemple : pour un filtre de granulométrie homogène de 1 mm, de porosité 0,44, filtrant avec une vitesse de 3,6 m/h, on a obtenu, dans un système mm, s, g :

$$\begin{aligned} h_0 &= 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ (filtre propre)} \\ h &= 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ (filtre à mi-saturation)} \\ A_0 &= 8,21 \\ \alpha &= 0,9 \\ \beta &= 0,4. \end{aligned}$$

Le système d'équations différentielles peut être intégré par des méthodes de calcul numérique, ce qui conduit à optimiser la relation que l'on désire obtenir pendant la durée de la filtration entre la qualité du filtrat et la perte de charge limite.

5.3.2 Types de filtres

Cette latitude théorique dans le choix des caractéristiques d'un filtre est tempérée par l'expérience. En fait, les eaux admises sur les filtres, qu'elles soient brutes et légèrement coagulées ou au contraire prétraitées par coagulation et sédimentation, restent peu chargées en matières en suspension et, au fil du temps, deux types de filtres ouverts se sont trouvés définis :

- type américain de granulométrie fine (0,5 mm) et faible épaisseur (0,5 m) ;
- type européen de granulométrie moyenne (0,8 à 1,5 mm) et d'épaisseur plus élevée (0,9 à 1,2 m) (figures 23 et 24).

Pour ces deux types, la vitesse de filtration optimale est de l'ordre de 5 à 7 m/h (certains filtres américains ont, dans le passé, été définis pour des vitesses excessives ≥ 10 m/h). Il faut également noter que le type américain n'était décolmaté que par retour

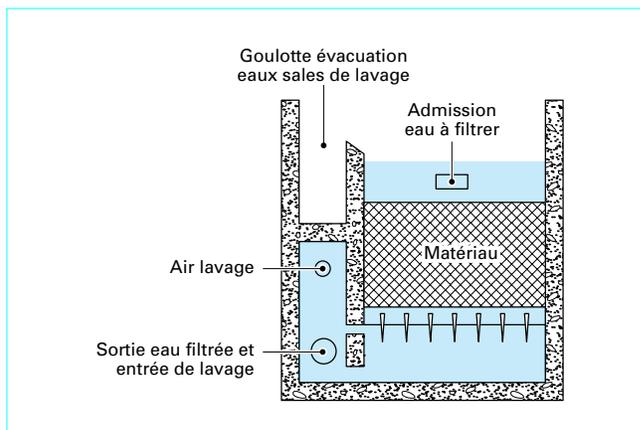


Figure 23 – Filtre classique (d'après doc. OTV)

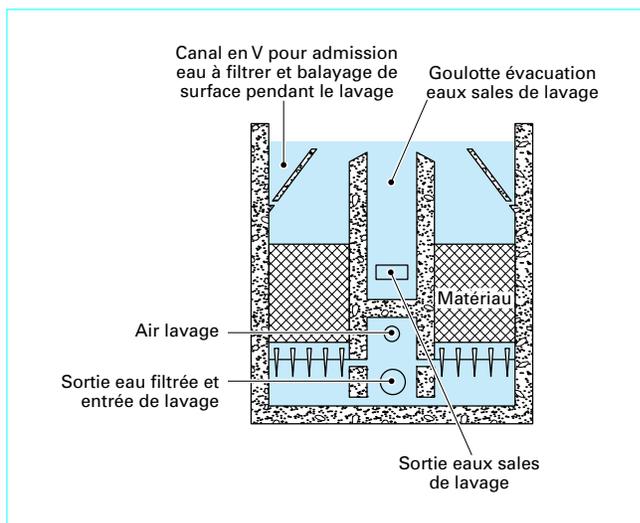


Figure 24 – Filtre à balayage de surface (d'après doc. OTV)

d'eau, alors que le filtre européen combine le décolmatage à contre-courant par l'eau et par l'air, alternativement et simultanément, à grand et petit débits. La séquence de lavage doit être adaptée au type de filtre, au matériau filtrant, et à la nature de l'eau à traiter. Le lavage doit décolmater à cœur, sans entraîner de perte de matériau.

On réalise également des **filtres bicouches (figure 25)** ou **multi-couches** dans lesquels le lit offre à l'eau, dans le sens de son écoulement, une granulométrie décroissante ; ainsi, les eaux les plus chargées (à l'entrée des filtres) doivent colmater moins rapidement les couches (supérieure parce que les canalicules sont plus importants, et inférieure parce que théoriquement protégée par le dégrossissage des couches supérieures) que dans le cas de granulométrie dite homogène où les matières fines se trouvent, après les opérations de lavage, concentrées dans la partie supérieure. Pour éviter le mélange des couches de granulométries différentes, on joue sur la densité du matériau : par exemple, houille pour les gros grains, quartz pour les moyens, grenat pour les plus fins. En fait l'intérêt peut-être principal des couches multiples est d'associer des matériaux aux propriétés différentes et complémentaires, comme le sable et l'antracite, et même le sable et le charbon actif en grains (qui agit directement sur les micropolluants).

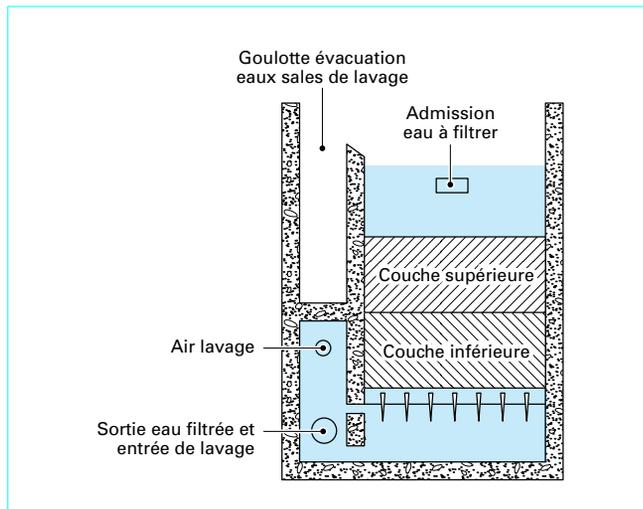


Figure 25 – Filtre bicouche (d'après doc. OTV)

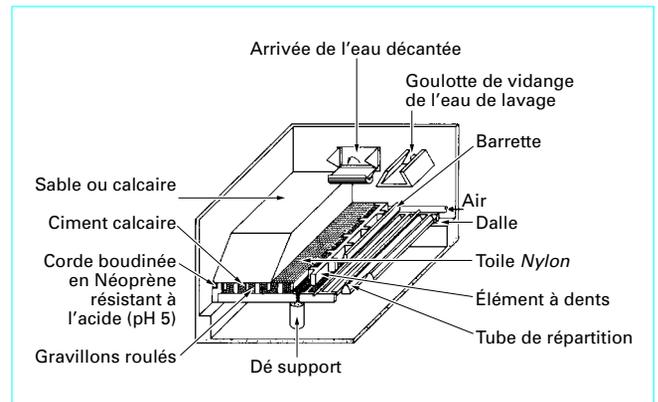


Figure 27 – Fond de filtre (d'après doc. CGE)

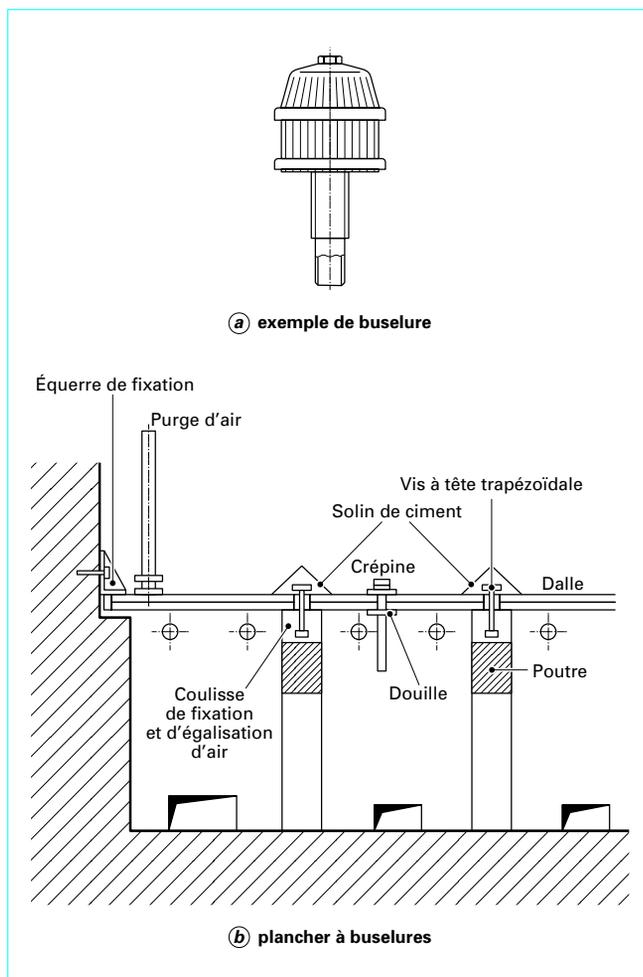


Figure 26 – Buselures

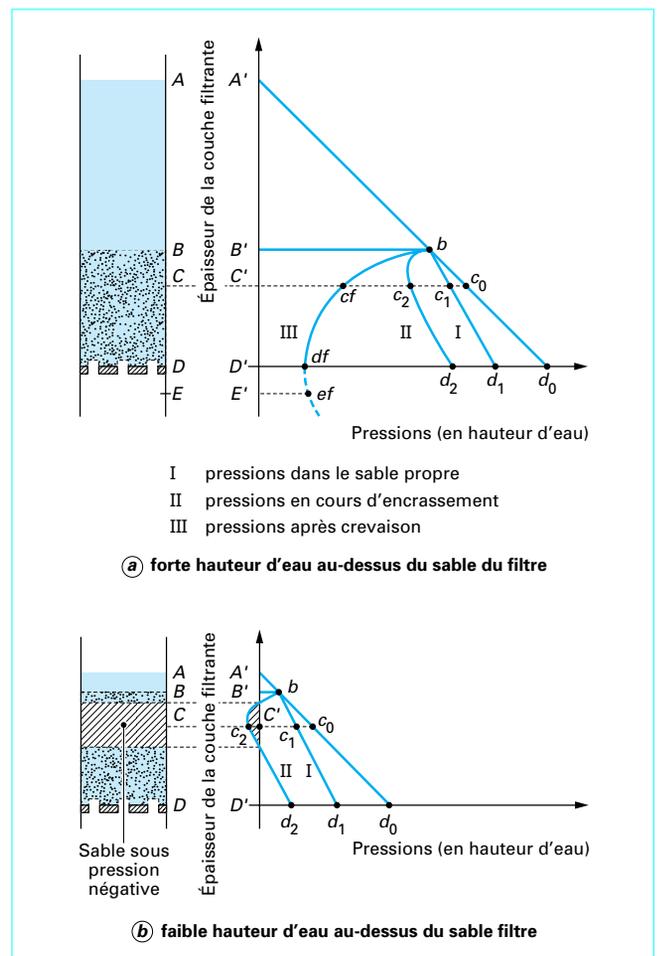


Figure 28 – Filtres. Intérêt des couches épaisses

Les fonds supports (ou planchers) des couches granuleuses sont constitués de plaques à buselures dont les têtes crépinées sont logées dans une couche de gravier (figure 26). On trouve encore d'anciens fonds constitués de graviers (figure 27) ou de dalles poreuses.

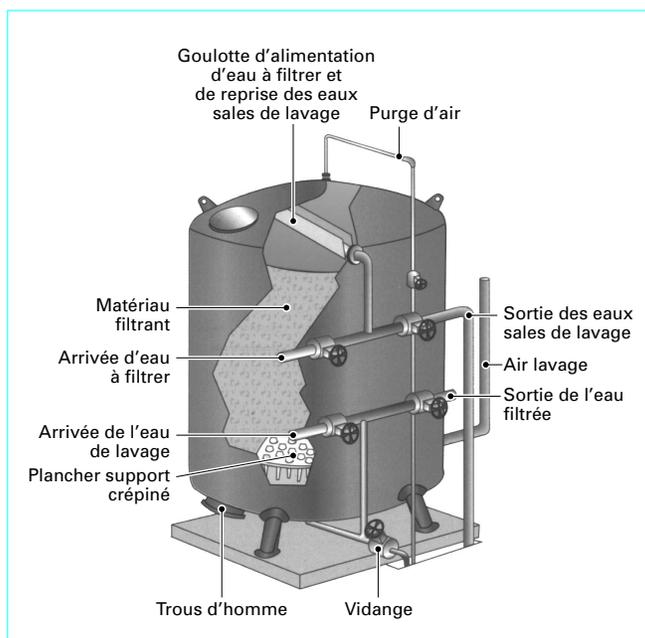


Figure 29 – Filtre fermé sous pression

Sur la figure 28 ont été représentés les diagrammes de pression au sein d'un filtre. Après un certain temps de fonctionnement, il peut apparaître une dépression dans une zone du lit filtrant du fait du colmatage plus accentué des couches superficielles du sable (conséquence de la loi $\delta C/\delta h = -kC$).

Pour y remédier, on augmente la hauteur d'eau au-dessus de la couche filtrante. La mise en dépression provoque un dégazage (embolie du filtre), une brutale augmentation de la perte de charge qui bloque l'écoulement ou, au contraire, favorise la crevaison, c'est-à-dire l'entraînement des boues arrêtées vers les couches inférieures du filtre et leur apparition dans l'eau filtrée.

L'équipement d'un filtre comprend :

- un régulateur de débit qui compense les variations de perte de charge ;
- un indicateur de perte de charge ;
- un point de prélèvement (pour analyse) du filtrat ;
- un débitmètre ;
- le système de vannes indispensable ;
- un pupitre de commande pour la mise en ou hors service des filtres et pour les opérations de lavage.

Nota : la régulation des filtres doit être très soignée. Les constructeurs ont rivalisé d'ingéniosité pour mettre en place des dispositifs efficaces, plus ou moins complexes. Tous doivent obéir au principe « perte de charge dans le filtre + perte de charge dans le régulateur = constante ». Les dispositifs les plus usuels font appel peu ou prou au siphon partialisé et à la vanne de régulation pilotée par l'état du plan d'eau. L'électronique remplace en outre les régulations oléopneumatiques ou autres.

Les filtres fermés avec une alimentation sous pression sont moins tributaires des pertes de charge et offrent une latitude d'optimisation plus étendue. Ils sont cependant plus onéreux que les filtres ouverts et ne sont utilisés que lorsque les conditions locales en rendent l'emploi particulièrement intéressant, notamment lorsqu'il s'agit de clarifier une eau peu chargée à l'aval d'une station de pompage (figure 29).

En dehors de leur effet clarificateur, les filtres peuvent être le siège de réactions biologiques, être spécialement conçus pour la neutralisation, la reminéralisation, la mise en équilibre carbonique d'une eau, tout en associant éventuellement une fonction de clarification. En ce qui concerne le charbon actif en grains (CAG), on utilise des ouvrages analogues qui servent de réacteurs d'adsorption, car il faut éviter d'utiliser le CAG comme matériau filtrant.