CHAPITRE III :

Sédimentation



Chapitre III : Sédimentation

III.1 Définition :

On parle de sédimentation ou décantation lorsqu'un solide est séparé d'un liquide par l'effet de la gravité seule. Lorsqu'un élément filtrant est utilisé, voir filtration. Lorsque la force centrifuge est utilisée, voir centrifugation, décantation centrifuge, ou hydrocyclone.

La sédimentation correspond au dépôt des particules solides en suspension dans un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un champ de forces : gravité, force centrifuge ou champ électrique. Lorsque la séparation d'un solide et d'un liquide se fait uniquement par l'action de la gravité, on parle de décantation (ou sédimentation gravimétrique). Si l'on utilise la force centrifuge, il s'agit de décantation centrifuge (centrifugation, hydrocyclone, etc.).

La décantation, parfois aussi appelée précipitation, est une opération unitaire de séparation liquide–solide fondée sur la sédimentation. Elle vise à séparer les particules en suspension dans un liquide en les laissant se déposer, soit sous l'action de leur poids (décantation gravimétrique), soit sous l'effet d'une accélération centrifuge (décantation centrifuge).

Cette opération permet, selon l'objectif recherché :

- D'obtenir une boue plus concentrée à partir d'une suspension initialement diluée (épaississement).
- Ou, au contraire, de produire un liquide clarifié à partir d'une suspension faiblement chargée en solides (clarification).

Un système où une phase est dispersée dans une phase fluide est appelé :

- Suspension (ou pulpe) lorsque la phase dispersée est un solide.
- Émulsion lorsque la phase dispersée est un liquide dans un autre liquide.

Le fluide qui porte la dispersion est nommé phase continue.

- Dans le cas d'une émulsion de deux liquides, on peut, en théorie, obtenir une séparation complète des deux phases : on distingue alors une phase lourde et une phase légère, séparées par décantation.

III.2 Termes liés à la sédimentation ou à la centrifugation :

- **Suspension :** système constitué par une phase solide dispersée dans une phase fluide.
- **Emulsion :** système constitué par une phase liquide dispersée dans une autre phase liquide.
- **Phase continue :** phase fluide dans laquelle s'effectue la dispersion.
- **Sédimentation :** séparation sous l'influence de la gravité d'une phase dispersée solide ayant une densité plus grande que la phase fluide continue qui la contient.
- **Epaississement :** terme employé en sédimentation lorsque l'on s'intéresse spécifiquement à la phase solide (boues).
- **Clarification :** terme employé en sédimentation lorsque l'on s'intéresse spécifiquement à la phase liquide (liquide clarifié ou liquide clair).
- **Décantation :** terme utilisé en remplacement de sédimentation lorsqu'il s'agit d'une émulsion, ou plus généralement pour la séparation de 2 phases liquides non miscibles (voir extraction liquide-liquide).

- **Floculation :** association de particules solides en flocs, de plus grosse taille que les particules initiales et sédimentant à une vitesse supérieure. La floculation est en général provoquée par l'addition d'agents floculants.
- **Flottation :** procédé qui consiste à enrober les particules solides d'une couche d'air, ce qui conduit à une densité moyenne particule-air plus faible que le liquide, et au phénomène inverse de la sédimentation.
- **Force centrifuge :** si r est la distance par rapport à l'axe de rotation et ω la vitesse de rotation en rad.s^{-1}, une masse m est soumise à une accélération $r\omega^2$ et à une force $mr\omega^2$ analogue à g, accélération de la pesanteur et mg, poids. Le nombre de g s'exprime par ω^2/g.
- **Temps de séjour :** temps moyen que met le fluide pour traverser l'appareil concerné. Exemple : un réacteur contenant un volume de liquide de 5 m^3 et alimenté à raison de 1 $m^3.h^{-1}$ présente un temps de séjour moyen de 5 h. Le temps de séjour d'une particule de fluide quelconque est proche du temps de séjour moyen dans le cas d'un écoulement piston avec profil de vitesse plat. Le temps de séjour d'une particule de fluide quelconque, peut être très différent du temps de séjour moyen dans le cas d'un profil de vitesse parabolique (régime laminaire), ou d'un réacteur parfaitement agité. On parle alors de distribution de temps de séjour.

III.3 Principe de la décantation :

Le phénomène de sédimentation varie selon plusieurs facteurs : la concentration de la suspension, les propriétés des particules (taille, forme, densité), ainsi que les interactions possibles entre elles (attractions, collisions, floculation).

On distingue généralement deux grandes catégories de matières décantables :

- **Les particules grenues** : ce sont des particules relativement grossières qui se déposent individuellement, sans influence notable les unes sur les autres. Leur chute se fait avec une vitesse de sédimentation quasi constante.
- **Les particules floculées (plus ou moins)** : elles proviennent de l'agglomération de particules fines ou colloïdales, soit de manière naturelle, soit par floculation provoquée (ajout de réactifs). Les particules sédimentent alors sous forme de flocs, avec un comportement de dépôt différent de celui des particules isolées.

Lors de la sédimentation de particules solides de masse m, de diamètre d et de masse volumique ρ_S dans un milieu fluide de masse volumique $\rho_L$et de viscosité μ, à priori au repos, les particules sont soumises à l'action de trois forces :

- Le poids, mg dirigé vers le bas,
- La poussée d'Archimède, fonction de la différence de masse volumique entre la particule et le milieu fluide et dirigée vers le haut,
- Les forces de frottement exercées sur la particule par le fluide, du fait de sa viscosité (ces frottements croissent avec le carré de la vitesse relative particule-fluide).

Lorsque les forces de frottement visqueux équilibrent la résultante du poids et de la poussée d'Archimède, la particule se déplace alors à une vitesse constante appelée vitesse de sédimentation, que l'on peut déterminer dans les deux cas suivants :

- En régime laminaire, loi de Stokes, $V = \frac{d^2\,(\rho_S - \rho_l)g}{18\,\mu}$
- En régime turbulent, loi de Newton, $V = \left(\frac{3\,g\,d\,(\rho_S - \rho_l)g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{2}}$

En conséquence, la vitesse de sédimentation augmente avec la différence de masse volumique particule-fluide $\rho_S - \rho_L$, l'accélération de la pesanteur g (ou centrifuge $r\omega^2$), le diamètre de la particule (son carré en régime laminaire). La vitesse de sédimentation diminue lorsque la viscosité du milieu augmente, ou le diamètre des particules diminue. Les particules de plus gros diamètre sédimentent plus

rapidement que les particules de petit diamètre, ce qui donne lieu à une méthode de classement, mais conduit également à un seuil de coupure d'un décanteur.

Les facteurs clefs de la sédimentation sont la différence de masse volumique entre le solide et le liquide, la taille des particules et la viscosité du fluide. Pour des particules de quelques microns, la vitesse de sédimentation devient trop faible.

On utilise alors des adjuvants de floculation pour agglomérer les particules entre elles et augmenter ainsi leur vitesse limite de chute.

III.4 Facteurs régissant la séparation :

Parmi les paramètres les plus déterminants, on peut retenir :

- **La suspension** : la concentration en solides (rapport solide/liquide), le débit, la température, ainsi que les conditions et la durée de préparation (ou de formation) de la suspension.
- **La phase liquide** : sa nature, sa densité, sa viscosité, et sa teneur en électrolytes (qui influence notamment la stabilité et la floculation).
- **La phase solide** : sa nature (notamment sa solubilité), sa densité, sa granulométrie, sa structure (grains, fibres, colloïdes) et sa tendance à l'agglomération.
- **L'opération de décantation** : la vitesse et la courbe de sédimentation, le temps de sédimentation, le type d'appareil utilisé, le mode de fonctionnement, ainsi que l'éventuel ajout d'adjuvants (coagulants/floculants).
- **Les produits obtenus** : la proportion de liquide retenu dans le sédiment (teneur en eau de la boue) et la concentration résiduelle en solides dans la surverse (clarté du liquide).

III.5 Types de décantation :

Le phénomène de sédimentation peut se manifester différemment selon la concentration de la suspension, les caractéristiques propres des particules et les interactions possibles entre elles. On distingue plusieurs types de matières décantables (figure III.1) :

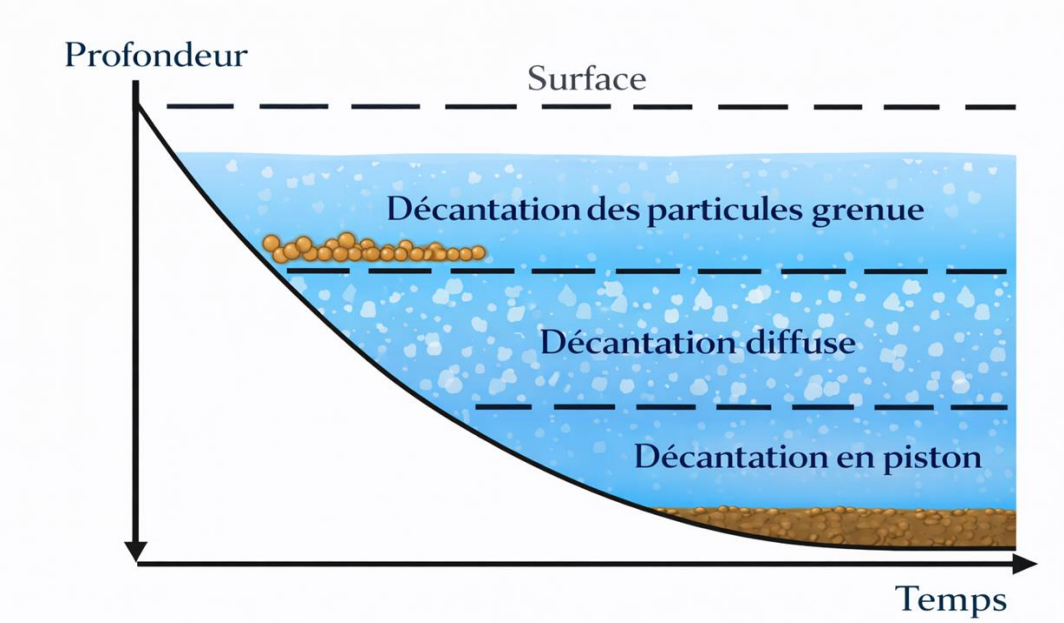


Figure III.1 : Différents types de matières décantables.

Type 1 : décantation de particules discrètes dites grenues : ce type de décantation (dite discrète ou individuelle) est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité au cours de leur chute). La vitesse de chute est indépendante de la concentration en solide ; c'est pourquoi les lois classiques de Newton et de Stokes s'appliquent ici. On retrouve ce type de décantation dans les dessableurs.

Type 2 : Décantation de particules floculantes : Ce type est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leurs chutes. Les propriétés physiques de ces particules sont donc modifiées pendant le processus. On retrouve ce type de décantation dans les décanteurs des usines de traitement des eaux et dans les décanteurs secondaires des usines d'épuration.

Type 3 : Décantation freinée (en piston) : Ce type est caractérisé par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche de particules et, par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant. On retrouve ce type de décantation dans la partie profonde des décanteurs.

Type 4 : Décantation en compression de boue : Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures et dans cette zone, le phénomène de consolidation est relativement lent. On retrouve ce type de décantation dans les épaississeurs de boues par gravité.

III.6 Indices de la décantation :

Brouzes (1973) définit la décantation comme un ensemble de caractéristiques physiques qui déterminent la vitesse de chute et le tassement des matières en suspension. Cette caractéristique peut être évaluée en mesurant l'indice de Mohlman (IM) ou l'indice de boue (IB).

III.6.1 L'Indice de Mohlman :

L'Indice de Mohlman est défini comme étant la relation entre le volume occupé par les boues après 30 minutes de décantation divisé par la concentration de la matière en suspension et par le volume initial. Il s'agit donc du volume occupé par 1 g de boues après une demi-heure de décantation. Il est aussi connu sous le terme anglo-saxon de SVI (Sludge Volume Index). Il est donné par la formule suivante :

$$IM = \frac{V}{M} \quad \text{(ml/g)}$$

IM : Indice de Mohlman (en ml/g).
V : Volume de boue après 30 min de décantation (ml ou cm^3).
M : MES présentes dans ce volume (g).

- Si IM est inférieur à 50 ml/g : mauvaise décantation.
- Si IM est compris entre 80 ml/g et 150 ml/g : bonne décantation.
- Si IM est supérieure à 150 ml/g : phénomène de bulking (foisonnement de bactéries filamenteuses).

Selon le « Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater », l'Indice de Mohlman n'a pas de base dans la théorie de séparation solide-liquide, mais il a un fond empirique.

La vitesse de décantation est fonction principalement de la hauteur initiale dans la colonne (Ho), de son diamètre et de la concentration volumique initiale. Cependant, généralement, la hauteur initiale n'interfère pas dans les résultats. Mais il y a une limite de 30 cm à partir de laquelle un effet de profondeur perturbe la décantation des boues (Veselind et Dick, 1969).

Cho (1989) a vérifié cet effet en réalisant des essais avec des hauteurs de 30 et 60 cm. Il a observé que, plus la concentration de la boue était importante, plus les différences entre les vitesses mesurées sur un même échantillon augmentaient. Par contre, pour des hauteurs de 60 et 90 cm, la différence n'est pas significative. En théorie, on doit obtenir pour des hauteurs différentes des tangentes parallèles, donnant ainsi des vitesses égales, mais si on réalise des décantations successives ou des dilutions, la structure du floc peut changer et on obtient alors des valeurs différentes. Cho (1989) a réalisé des essais de sédimentation successifs sur des boues d'argile et des boues activées après remise en suspension par aération, afin de vérifier la reproductibilité des valeurs des paramètres de décantation. Il a observé des variations importantes (supérieures à 50%) sur les paramètres déterminés. Pour éviter des effets de paroi, le rapport entre le diamètre de la colonne et le diamètre de la particule doit être supérieur à 100.

L'inconvénient de cet indice est qu'il dépend très nettement de la concentration initiale de la boue. C'est pourquoi l'on a défini l'indice de boue qui est indépendant de ce dernier paramètre. L'indice de boue est caractéristique de l'état des boues de la station.

III.6.2 Indice de boue (Taux de boue) :

Le test de l'indice de boue est utilisé pour apprécier l'aptitude d'une boue à la décantation. Cet indice représente le volume occupé par un gramme de boue après 30 minutes de décantation statique dans une éprouvette d'un litre à paroi transparente graduée. Il est donné par la formule suivante :

$$IB = \frac{V}{M\,d} \quad \text{(ml/g)}$$

IB: Indice de boue (en ml/g).
V : Volume de boues après 30 min de décantation (ml ou cm^3).
M : MES présentes dans ce volume (g).
d : Taux de dilution (par exemple : 1/2 ou 1/4).

Lorsque l'Indice de Mohlman tel que défini ci-dessus ne peut être mesuré (boue trop concentrée, mauvaise décantation, etc.), il faut procéder à une série de dilutions. Ces dilutions sont réalisées avec de l'eau traitée désoxygénée. La dilution adéquate est retenue quand le volume de boue après 30 minutes de décantation est inférieur à 250 ml (l'indice de boue reste constant et n'est plus influencé par la concentration en boue de l'échantillon)

Le taux de boues peut être calculé pour l'exemple suivant en utilisant la formule précédente.

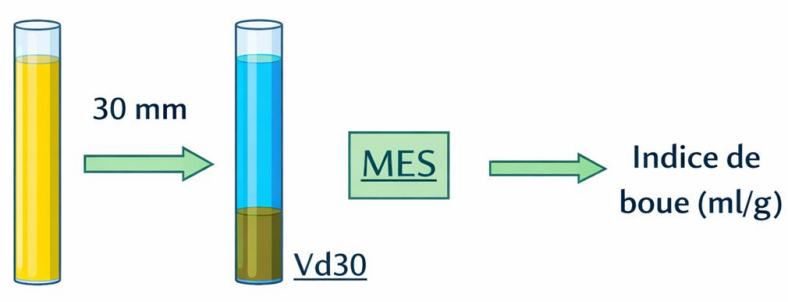


Figure III. 2 : Mesure de l'indice de boue (taux de boue).

Exemples d'application :

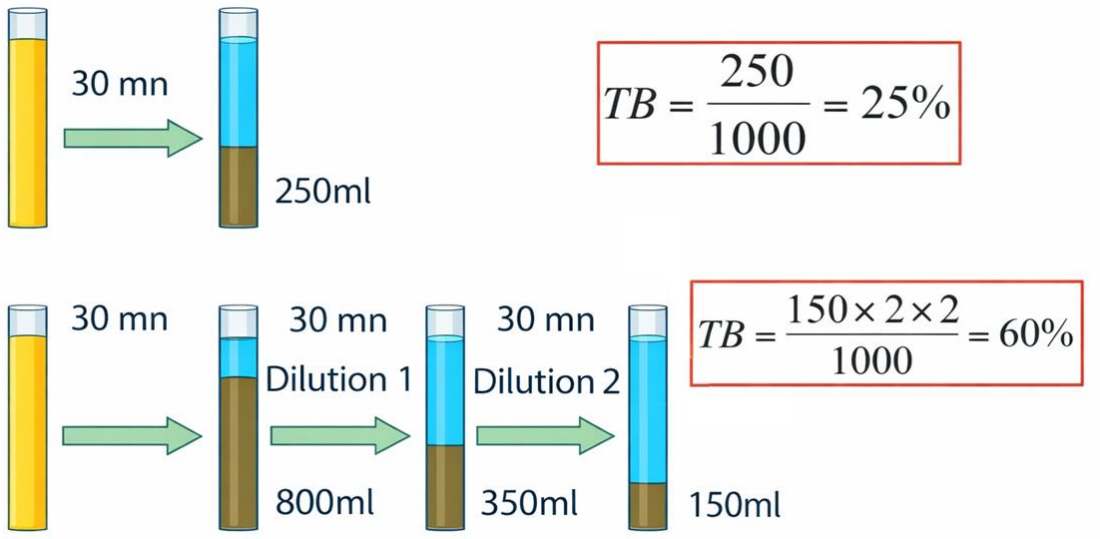


Figure III. 3 : Exemple de calcul de l'indice de boue.

III.7 Sédimentation des particules floculantes :

III.7.1 Floculation :

Les séparations liquide-solide telles que décantation, centrifugation, filtration, flottation deviennent inefficaces lorsque les particules solides sont trop divisées (dimension inférieure au micromètre). On est alors en présence de suspensions colloïdales qui ne peuvent être déstabilisées que par un prétraitement physico-chimique de coagulation ou de floculation. Ce prétraitement consiste à obtenir l'agrégation des particules, par exemple par addition de produits chimiques.

On réserve habituellement le terme de coagulation aux prétraitements réalisés avec des sels minéraux, dont le rôle est de réduire les forces électrostatiques répulsives existant entre particules. C'est par exemple le rôle du chlorure ferrique $FeCl_3$ dans le traitement des eaux.

La floculation quant à elle fait appel aux mécanismes d'adsorption. Elle constitue même, dans le cas où il y a coagulation, la phase finale de la formation des flocs, c'est à dire des agrégats suffisamment gros pour être décantés ou filtrés rapidement.

Le phénomène de floculation est la possibilité, par une chaîne assez longue, de capter plusieurs particules, donc de constituer des flocs denses et qui décantent mieux. Pour cela, il faut que le floculant soit étiré plutôt qu'enroulé. Ceci est obtenu en introduisant dans la chaîne des groupes dont la charge chimique provoque des effets de répulsion qui empêchent l'enroulement du floculant.

On distingue 3 types de floculants :

- Les floculants non ioniques à très longue chaîne
- Les floculants anioniques à longue chaîne
- Les floculants à chaîne cationique à chaîne plus courte

Ce sont des produits d'origine organique. Ils sont efficaces à faible concentration, mais d'un coût élevé, ce qui influe sur les frais d'exploitation. Leur efficacité dépend des caractéristiques de la suspension, et notamment de son pH.

Un ensemble de particules floculées est un équilibre souvent fragile. Si l'on souhaite réaliser une filtration consécutivement à la décantation, il faudra limiter au maximum le cisaillement dans la solution de façon à conserver les flocs intacts. On évitera par exemple l'emploi d'un pompe centrifuge dans ce cas.

III.7.2 Vitesse de sédimentation :

On considère que chaque particule est suffisamment (le cas d'une suspension diluée), éloignée de sa voisine, et que par conséquent chacune d'entre elles sédimente comme une particule isolée. Une seule particule de phase solide dispersée dans un liquide immobile est soumise, d'une part à la force de la pesanteur, d'autre part à la poussée d'Archimède qui lui est opposée.

Dans le cas où la masse volumique est différente de celle du liquide, implique que ces deux forces sont aussi différentes, et la particule se déplace par rapport au fluide avec une certaine vitesse wo que l'on appelle vitesse de sédimentation. Cette vitesse est nulle au départ et augmente rapidement puisque, la force résultant de la différence entre la pesanteur et la poussée d'Archimède étant constante, le mouvement est uniformément accéléré. Mais une troisième force apparaît rapidement : c'est la résistance que le fluide oppose au mouvement de la particule du fait de sa viscosité.

Cette force croît approximativement avec le carré de la vitesse. Il arrive donc un moment ou cette troisième force équilibre la résultante des deux autres : la vitesse de sédimentation devient alors constante.

La vitesse atteinte s'appelle vitesse limite de chute d'une particule (appelée aussi vitesse terminale). En appelant ρs et ρ_L les masses volumiques respectives du solide et du liquide et dp le diamètre de la particule, la condition d'équilibre s'écrit :

$$\frac{1}{6}\pi g d_P^3 (\rho_S - \rho_l) = \frac{1}{4}\frac{\xi \omega_0^2}{2}\rho_l \pi d_P^2$$

Où ξ, est le coefficient de résistance.

Cette relation permet de calculer w_o :

$$\omega_0 = \left[\frac{4 g d_P (\rho_S - \rho_l)}{3 \xi \rho_l}\right]^{1/2}$$

ξ est connu et qui dépend toujours du nombre de Reynolds, défini par ailleurs par :

$$R_e = \frac{\rho_l \omega_0 d_P}{\mu}$$

On aboutit donc à une relation implicite dans laquelle ξ dépend de w_o par l'intermédiaire de Re. Il est cependant possible de déterminer le diamètre maximal des particules déposées par sédimentation selon la loi de Stokes et le diamètre minimal des particules qui se déposent conformément à la loi de Newton portent les noms de diamètres critiques :

$$d_P = C\left[\frac{\mu^2}{(\rho_S - \rho_l)\rho_l}\right]^{1/3}$$

Où C, est une constante : C = 2.62 pour Re ≤ 1 et C = 69.1 pour Re ≥ 1 000.

Lorsque les forces de frottement visqueux équilibrent la résultante du poids et de la poussée d'Archimède, la particule se déplace alors à une vitesse constante appelée vitesse de sédimentation, que l'on peut déterminer dans les deux cas suivants :

- En régime laminaire, loi de Stokes :

$$V = \frac{d_P^2 (\rho_S - \rho_l) g}{18 \mu}$$

- En régime turbulent, loi de Newton :

$$V = \left[\frac{3 g\, d_P (\rho_S - \rho_l)}{\rho_l}\right]^{1/2}$$

Remarque :

Pour le cas des phénomènes de décantation, de sédimentation, où interviennent un grand nombre de particules, les relations précédentes sont encore valables tant que la concentration en particules n'est pas trop élevée ; on compte habituellement une distance minimale de 10 fois le diamètre entre chaque particule. Dans le cas contraire, les calculs doivent être menés avec la masse volumique et la viscosité non plus du fluide pur, mais du mélange fluide – particule (la suspension). Les valeurs de ρ et μ ne sont plus constantes, mais évoluent dans le temps au cours du déplacement des particules.

Deux cas de figures peuvent se présenter selon que la concentration de la suspension est forte ou faible.

III.7.2.1 Cas de suspension diluée (faible concentration) :

Dans le cas d'une suspension diluée (concentration en volume des solides en suspension inférieure à 0.5%), on considère que chaque particule est suffisamment éloignée de sa voisine, et que par conséquent chacune d'entre elles sédimente comme une particule isolée.

Une seule particule de phase solide dispersée dans un liquide immobile est soumise d'une part, à la force de la pesanteur et d'autre part, à la poussée d'Archimède qui lui est opposée (figure III.4). Si sa masse volumique est différente de celle du liquide, ces deux forces sont aussi différentes et la particule se déplace par rapport au fluide avec une certaine vitesse Vc que l'on appelle vitesse de sédimentation. Cette vitesse, nulle au départ, augmente rapidement car la force résultant de la différence entre la pesanteur et la poussée d'Archimède est constante ; le mouvement est uniformément accéléré. Mais une troisième force apparaît rapidement : c'est la résistance que le fluide oppose au mouvement de la particule du fait de sa viscosité. Cette force croît approximativement avec le carré de la vitesse. Il arrive donc un moment ou cette troisième force équilibre la résultante des deux autres : la vitesse de sédimentation devient alors constante. En pratique, cette limite est atteinte très rapidement pour les fines particules qui seules nous intéressent ici. La vitesse atteinte s'appelle vitesse limite de chute d'une particule appelée aussi vitesse terminale ou critique.

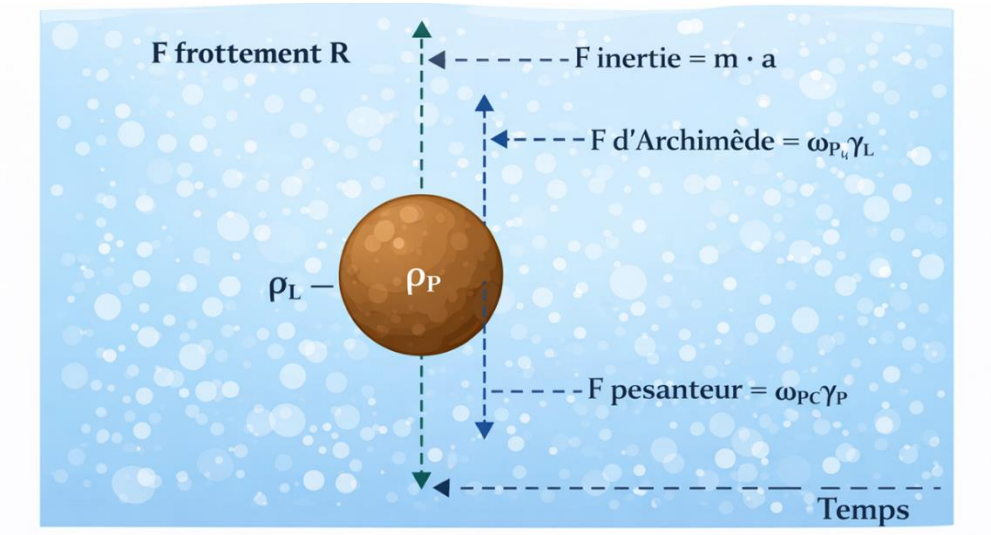


Figure III.4 : Forces agissant sur une particule dans eau.

- La force de pesanteur : $F_{pesanteur} = \omega_P . \rho_P . g = \omega_P . \gamma_P$
- La poussée d'Archimède : $F_{Archimède} = \omega_P . \rho_L . g = \omega_P . \gamma_L$
- La force d'inertie : $F_{inertie} = m\,a = \omega_P\,\rho_P\,\frac{dV_C}{dt}$
- La résistance à l'avancement : $R = \frac{C_D}{2} = S_P\,\rho_L\,V_C^2$

Avec :

- γ_P et γ_L : Masses volumiques de la particule et du fluide.
- ρ_P et ρL : Masse volumique de la particule et du fluide.
- ω_P, S_P et d : Masse, surface, diamètre de la particule.
- V_C : Vitesse de décantation de la particule.
- g : Accélération de la pesanteur.
- C_D : Coefficient de traînée (adimensionnel). Il dépend du nombre de Reynolds : $Re = \frac{V_C\,d}{\upsilon}$

Avec : υ viscosité cinématique du liquide $\upsilon = \frac{\eta}{\rho_L}$, η Viscosité dynamique du liquide.

A l'équilibre : $F_{pesanteur} = F_{Archimède} + F_{inertie} + F_{frottement}$

$$\omega_P\,\rho_P\,g = \omega_P\,\rho_L\,g + \omega_P\,\rho_P\,\frac{dV_C}{dt} + \frac{C_D}{2}\,S_P\,\rho_L V_C^2$$

$$\omega_P\,\rho_P\,\frac{dV_C}{dt} = \omega_P\,g\,(\rho_P - \rho_L) - \frac{C_D}{2}\,S_P\,\rho_L\,V_C^2$$

La particule qui chute accélère jusqu'à ce que $\frac{dv}{dt} = 0$

D'où :

$$\omega_P \rho_P \frac{dV_C}{dt} = \omega_P g (\rho_P - \rho_L) - \frac{C_D}{2} S_P \rho_L V_C^2 = 0$$

$$V_C^2 = \frac{2 \omega_P g (\rho_P - \rho_L)}{C_D S_P \rho_L}$$

Sachant que : $\omega_P = \frac{\pi d^3}{6}$ et $S_P = \frac{\pi d^3}{4}$

Donc :

$$V_C^2 = \frac{4 g (\rho_P - \rho_L) d}{3 C_D \rho_L}$$

Le coefficient de frottement CD dépend du régime d'écoulement hydrodynamique (nombre de Reynolds Re) et de la forme de la particule (figure III.4). Ce coefficient peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$C_D = a R_e^{-n}$$

Avec a et n constantes présentées dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Coefficient de frottement CD = f (Re).

Re	Régime	a	n	C_0	Formule
10^{-4} < Re <1	Laminaire	24	1	24 Re^{-1}	Stokes
1 < Re < 10^3	Intermédiaire	18.5	0.6	18.5 $Re^{-0.6}$	Allen
10^3 < Re < 2 10^5	Turbulent	0.44	0	0.44	Newton

En régime laminaire et en utilisant $C_D = \frac{24}{R_e} = \frac{24 \eta}{\rho_L V_C d}$, on obtient l'expression de la loi de Stockes soit :

$$V_C = \frac{g}{18 \eta} (\rho_P - \rho_L) d^2$$

Si le nombre de Reynolds est compris entre 0.5 et 10^4, Fair-Geyer donne :

$$C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{3}{\sqrt{R_e}} + 0.34$$

Dans ce cas, pour calculer V_p, on remplace C_D dans la formule $V_C^2 = \frac{4 g (\rho_P - \rho_L) d}{3 C_D \rho_L}$.

Dans le Tableau III.2, tiré des résultats de nombreux travaux expérimentaux, la vitesse limite de chute des particules sphériques en fonction du nombre de Reynolds est présentée.

Avec g = 9.81 (accélération de pesanteur).

Tableau III.2 : Vitesse limite de chute des particules sphériques en fonction de Re.

Re	C0	U U_{lim}	Domaine
$< 10^{-4}$	La loi de Stokes ne s'applique pas, car le moment des particules est influencé par le mouvement brownien.		
10^{-4} à 1	24/Re	$0.545\ (\rho_S - \rho_L)\ \eta_L^{-1}\ d^2$	Régime laminaire
1 à 10 10 à 10^2 10^2 à 10^3	$26/Re^{0.77}$ $20/Re^{0.65}$ $4.92/Re^{0.346}$	$0.57\ (\rho_S - \rho_L)^{0.814}\ \eta_L^{-0.625}\ d^{1.439}$ $0.73\ (\rho_S - \rho_L)^{0.741}\ \eta_L^{-0.481}\ d^{1.222}$ $1.81\ (\rho_S - \rho_L)^{0.604}\ \eta_L^{-0.209}\ d^{0.813}$	Régime transitoire
10^3 à 10^5	0.44	$5.40\ (\rho_S - \rho_L)^{0.5}\ d^{0.5}$	Régime turbulent

La valeur inférieure du domaine de validité de la loi de Stokes Navier ($Re < 10^{-4}$) correspond à la distinction que font les exploitants de la décantation entre une « particule » et un « colloïde ».

III.7.2.2 Cas de suspension concentrée :

Si la concentration volumique en solides devient élevée (> 0.5%) donc en régime laminaire (Re <1) et en milieu Newtonien, on peut admettre que la viscosité cinématique équivalente d'une suspension (υ_m) et sa masse volumique (ρ_m) s'expriment approximativement à partir de celle du liquide (υ_L et ρL) comme suit :

$$\upsilon_m = \upsilon_L \frac{D + (\frac{1}{\rho_S})}{D - D_{lim}}$$

$$\rho_m = \frac{D\ \rho_L + 1}{D + (\frac{1}{\rho_S})}$$

Avec D et D_{lim} ; dilution (volume du liquide par unité de masse du solide) de la suspension et de la boue en fin de sédimentation (tassement), respectivement en remplaçant ρ_L par ρm et υ_L par υm dans l'équation de la loi de Stokes en régime laminaire (tableau III.2), on obtient la valeur approximative de la vitesse limite de chute des particules en suspension concentrée, soit :

$$V_{lim} = 0.545\ \frac{(\rho_S - \rho_L)\ (D - D_{lim})\ d^2}{\left|\left(\frac{1}{D}\right) + \rho_L\right|\ \lfloor D + (1 + \rho_S)\rfloor\ \upsilon_L}$$

Dans le cas des particules floculées, la valeur de V_{plim} est obtenue en remplaçant Dlim par D_C (dilution correspondant au début de compression) dans la relation donnant la valeur de v_m.

III.8 Théorie de Kynch :

Suite à l'étude des suspensions de concentrations élevées, Kynch (1952) pose que l'écoulement peut être perturbé par la proximité des grains (déposition entravée, ou "hindered settling"). Il pose alors l'hypothèse que la vitesse de déposition des grains ne dépend que de leur concentration locale.

Dans la décantation en piston (ou à forte concentration), les particules décantent en couches, chacune caractérisée par une concentration en matière en suspension. Kynch a supposé que la vitesse de sédimentation des particules dans une couche est uniquement fonction de la concentration de la couche dans laquelle elle se trouve. Les hypothèses de cette théorie sont :

- Il n'y a pas d'effet de parois.
- La concentration initiale est uniforme.
- La vitesse est identique pour toutes les particules de cette couche.
- La concentration en particules de la couche est constante.

L'hypothèse fondamentale de Kynch est que la vitesse de chute d'une particule ne dépend que de la concentration locale C en particules. Visuellement, quand on réalise une décantation en piston dans un tube de hauteur et de diamètre suffisants, au minimum une éprouvette d'un litre, on observe généralement l'apparition de quatre zones ; Le phénomène s'explique comme il est illustré sur la courbe de Kynch-Anderson (figure III.5) donnant l'évolution de la hauteur des interfaces en fonction du temps.

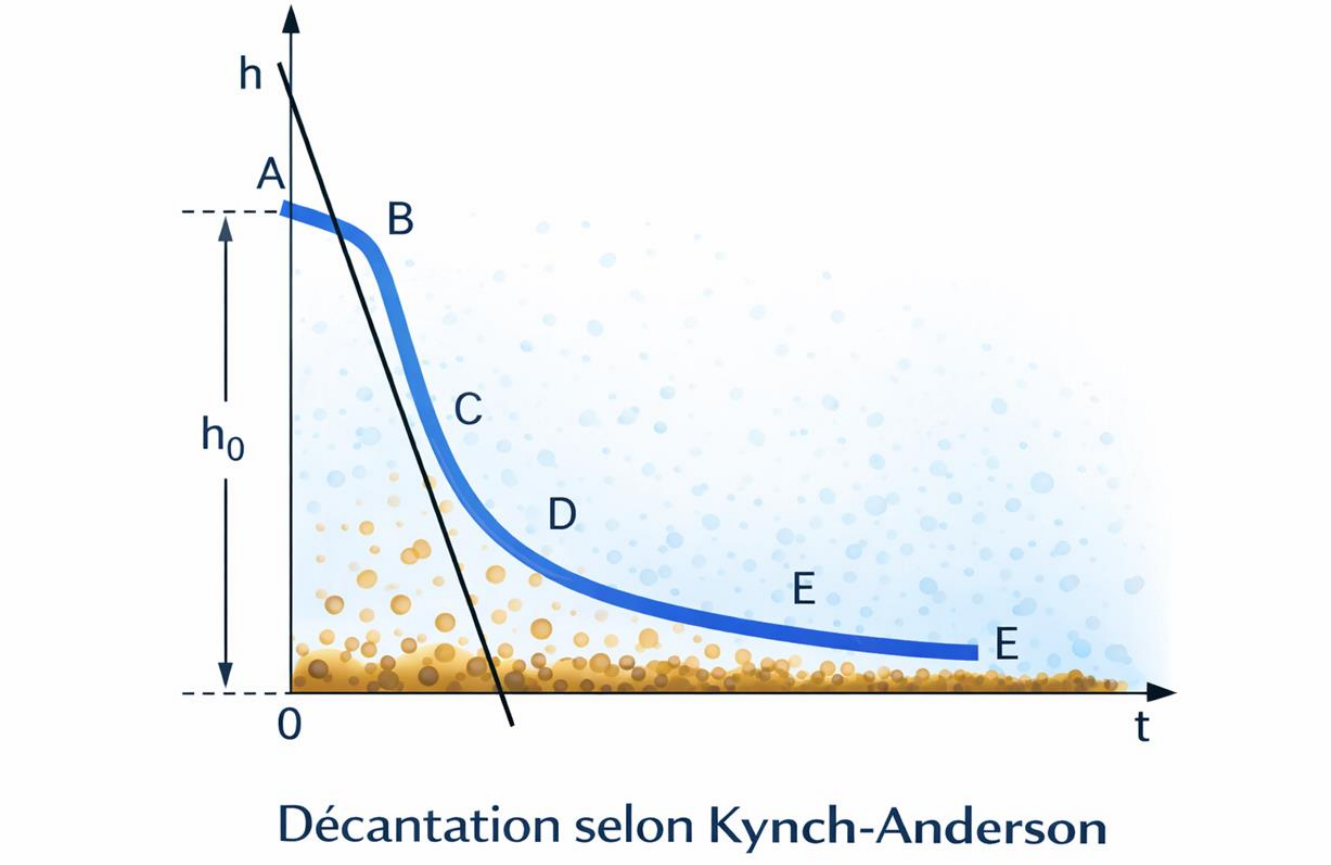


Figure III.5 : Courbe de kynch-Anderson : Evolution de la hauteur des interfaces en fonction du temps (Régimes de sédimentation).

III.8.1 Début de la décantation :

Au départ homogène, le mélange commence à se séparer en une phase claire, située au-dessus de l'interface et une phase concentrée. Dans cette étape, les particules en suspension ont commencé à couler, ce qui fait diminuer la concentration de la couche superficielle. La hauteur h de l'interface, initialement égale à la hauteur de la surface libre h_0, commence à diminuer.

III.8.2 Sédimentation en particules séparées :

La hauteur h diminue linéairement avec le temps (la courbe est assimilable à un segment de droite) : la vitesse de chute est constante car les particules chutent isolément et le phénomène peut être décrit par la relation suivante :

$$V_C = \frac{g}{18\,\eta}\,(\rho_P - \rho_L)\,d^2$$

Dans cette phase, la concentration au point C n'est pas encore suffisamment importante pour provoquer la floculation.

III.8.3 Zone de transition :

Elle se subdivise en deux sous-étapes :

- **Décantation en masse ou « sédimentation troublée » :** dans la phase mélangée, du fait de la diminution de h, et donc du volume du mélange, la concentration devient suffisamment élevée pour que les particules interagissent hydro dynamiquement pendant leurs chutes : la floculation commence à se produire, les particules grossissent et deviennent plus lourdes.

- **Ralentissement :** les particules, devenues plus volumineuses, se freinent mutuellement entraînant donc un ralentissement de la diminution de h.

III.8.4 Phase de compression (ou tassement) :

Les particules solides agglomérées acquièrent un poids suffisant pour exercer une compression du milieu. Les particules se compactent et la concentration devient plus élevée. Il n'y a plus décantation mais tassement. La théorie de Kynch s'applique aux tronçons BC et CD qui couvrent le domaine essentiel de la décantation des boues.

La théorie de Kynch nous permet d'obtenir le couple vitesse/concentration à partir de la courbe h en fonction de t. Tout d'abord on trace une tangente au point où l'on veut calculer le couple v/C ; à partir de la pente de la tangente on obtient la vitesse v et la concentration est calculée à partir de la hauteur initiale instantanée donnée par l'intersection de la tangente et l'axe vertical h.

Pour la vitesse de décantation dans la zone de chute libre (vitesse de chute libre) on fait une régression linéaire entre les points dans le segment AB. Le coefficient angulaire est la vitesse moyenne de chute et la concentration dans cet intervalle est considérée comme constante et égale à la concentration initiale.

Dans la zone de concentration variable, on mesure la vitesse en calculant la tangente à la courbe en chaque point et la concentration est obtenue par l'équation suivante :

$$C_i = C_0 \frac{h_0}{h_i}$$

Où C_o = concentration initiale, h_o = hauteur initiale, h_i =hauteur équivalente obtenue par l'intersection de la tangente.

III.9 Sédimentation - décantation :

III.9.1 Opération discontinue :

Lorsqu'on opère en discontinu, la suspension est laissée en repos dans un récipient. Dans de telles conditions, une suspension homogène de solides bien calibrés se sédimente progressivement. Au bout d'un moment apparaissent dans le récipient différentes couches, de hauteur variable avec le temps.

On observe ainsi de bas en haut :

- Une couche inférieure (1), riche en solide déposé.
- Une couche (2) dite de transition, de concentration intermédiaire entre celle de la couche précédente et celle de la suspension initiale.
- Une couche (3) de même concentration que la suspension initiale.
- Une couche supérieure (4) de liquide clair

La surface de séparation entre la couche de liquide claire (4) et le reste de la solution est en général très nette.

Tandis que l'épaisseur de la couche de transition reste constante, les hauteurs des couches extrêmes (solide et liquide clair) augmentent avec le temps. A un certain moment, dit point critique, apparaît un nouveau phénomène, appelé compression, correspondant à la disparition de couche de transition et à l'expulsion du liquide imprégnant la couche de sédiments. Après la compression, la sédimentation est terminée.

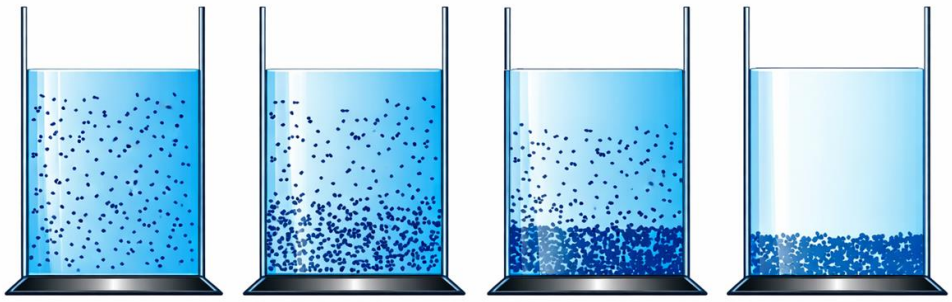


Figure III.6 : Sédimentation - décantation : opération discontinue.

III.9.2 Opération continue :

Lorsqu'on opère en continu, l'alimentation en pulpe et le soutirage du liquide clair s'effectuent sans interruption, l'évacuation du sédiment pouvant être intermittente ou continue. Dans ces conditions, on observe la formation de couches distinctes, comme en régime discontinu, mais tandis que dans ce dernier cas la hauteur de chacune de ces couches varie en fonction du temps, en sédimentation continue, les couches sont de hauteur invariable. Il s'établit un état permanent, avec :

- Une couche supérieure de liquide clarifié.
- Une couche intermédiaire où se produit la sédimentation
- Une couche inférieure de sédiment.

Les particules solides qui pénètrent dans la cuve de sédimentation sont soumises à leur poids apparent (comme en sédimentation discontinue) et à l'entraînement tenant au mouvement du liquide. Pour que les particules ne soient pas entraînées hors de la cuve par le courant de liquide, et qu'elles se déposent au fond du récipient, la durée de séjour du liquide dans l'appareil doit être supérieure à la durée de sédimentation.

D'une façon générale, le dimensionnement consistera à déterminer deux paramètres principaux :

- La surface du décanteur qui sera d'autant plus grande que les vitesses de sédimentation sont faibles.
- La profondeur du bassin qui déterminera le temps de séjour de la suspension dans le bassin. Ce temps devra être suffisant pour permettre la formation d'une boue au fond de l'appareil et la réduction adéquate de la concentration de la surverse. Elle dépendra du mode de sédimentation.

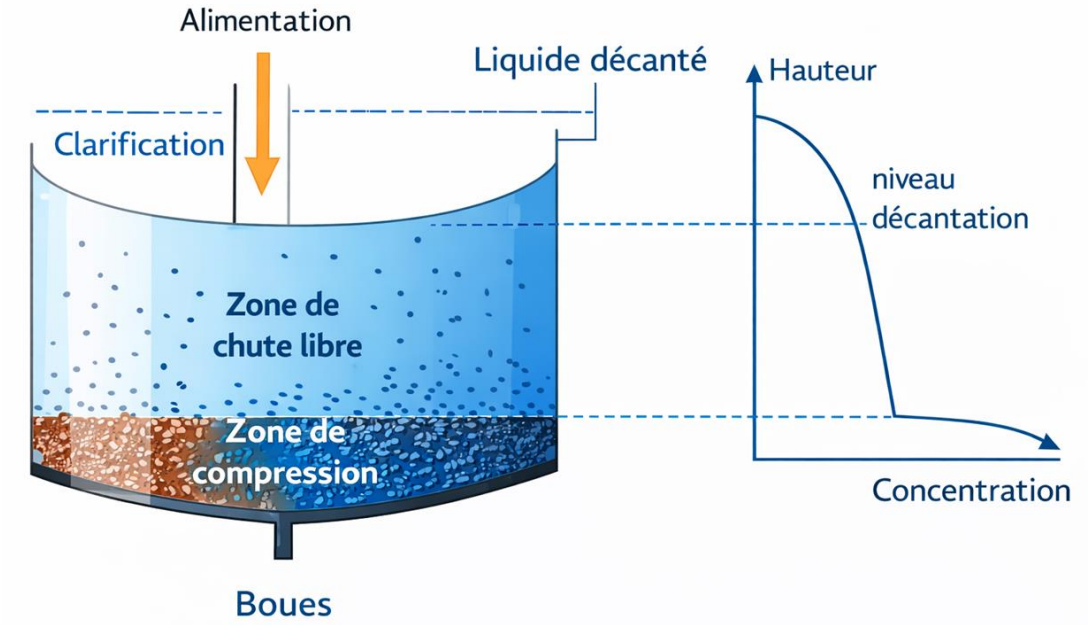


Figure III.7 : Sédimentation - décantation : opération continue.

III.10 Types de décantation :

Généralement il y a trois grands modes de décantation sont proposés.

III.10.1 Décantation statique :

La décantation de particules solides dans un liquide (eau ou solution aqueuse) sous l'action des forces de la pesanteur définit la décantation statique. C'est une opération continue, si l'extraction des boues déposées, ainsi que du liquide clair se fait en permanence et séparément. Elle est réalisée dans des bassins rectangulaires ou circulaires avec ou sans raclage des boues (précédés par des floculateurs).

III.10.2 Décantation accélérée :

Elle est appliquée à des suspensions très diluées avec des solides finement divisés et qui exigent un traitement de **coagulation-floculation.**

Floculation : permet à la fois de grossir les plus fines particules solides et de coaguler les matières colloïdales en neutralisant tout ou partie des charges électriques dont ces colloïdes sont dotés à leur surface. Les particules peuvent s'agglutiner (coalescence), elles floculent et décantent avec une vitesse croissante.

III.10.3 Décantation lamellaire :

Dans le but d'obtenir des débits importants sans que les cuves atteignent des volumes considérables aux formes prohibitives (très faibles hauteurs et très grandes surfaces), on peut équiper la cuve avec des plaques inclinées de 60° et espacées de 10 à 15 cm, dont l'effet est de réduire le trajet accompli par les particules solides pour être captées par une paroi et ainsi séparées de la phase liquide. Les appareils sont donc conçus en exploitant le fait que le rendement de séparation des matières en suspension ne dépend que de la surface du décanteur.

La traversée de ce faisceau de plaques (figure III.8) peut se faire aussi bien à co-courant, à contre-courant, ou à courants croisés, en fonction du trajet des boues. Ces bassins permettent une importante économie de place. La décantation lamellaire pour des rendements d'élimination équivalant à la décantation classique fonctionne avec des charges hydrauliques superficielles très élevées (de 10 à 15 m^3/m^2h). Le temps de séjour de l'eau est réduit environ de 10 à 12 minutes contre 2 heures dans un décanteur ordinaire.

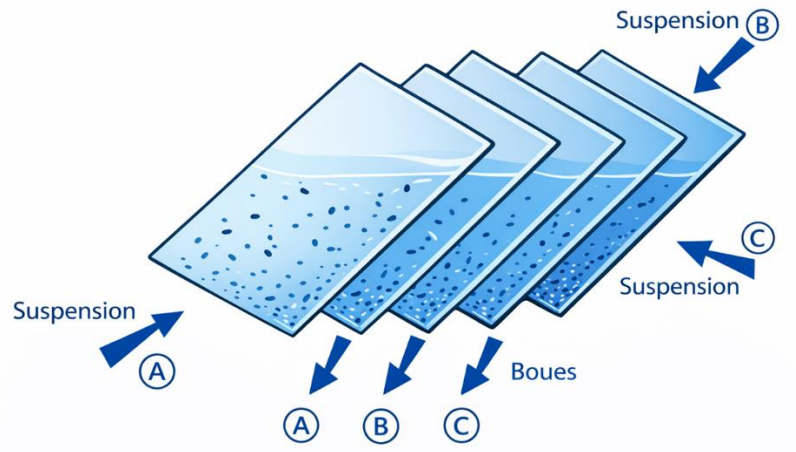


Figure III.8 : Décanteur à lames minces : a) co-courants, b) contre courants, c) courant croisés.

III.11 Appareillage et dimensionnement :

Les décanteurs sont des appareils qui servent à séparer un solide présent en suspension sous la forme de fines particules. Il s'agit de récipients (cuves) de forme et de taille variables dans lesquels la décantation s'opère avec le temps sous l'effet de la gravité. Chaque appareil comporte deux orifices de sortie, un dans la partie supérieure pour l'écoulement du liquide clair (surverse) et, l'autre dans la partie inférieure, pour l'évacuation de la matière épaissie (sous verse). La suspension à traiter est, le plus

souvent, introduite dans la cuve à un point situé au-dessous du niveau supérieur de départ du liquide et éloigné de celui-ci. La plupart des dispositifs actuels sont des appareils fonctionnant en continu ou en semi-continu.

Le processus de décantation dépend de plusieurs facteurs, tels que : la qualité de la suspension, la surface disponible, le débit, le temps de passage, la charge superficielle, le sens d'écoulement, etc. Dès lors, la construction des décanteurs est très diversifiée.

Il existe plusieurs types de décanteurs :

III.11.1 Décanteurs rectangulaires et décanteurs circulaires :

Le décanteur rectangulaire est constitué d'une cuve dans laquelle la section d'écoulement est beaucoup plus élevée que dans la conduite d'amenée. La boue se dépose sur le fond du bassin et est poussée par un racleur vers une fosse. L'eau clarifiée s'échappe par des ouvertures ménagées dans la paroi opposée à l'admission.

Les décanteurs circulaires sont les plus répandus dans la technique d'épuration ; leur conception dérive du type rectangulaire auquel on a fait faire une rotation de la section longitudinale Les dispositifs de raclage sont solidaires d'un pont mobile qui se déplace le long d'un chemin de roulement placé à la périphérie du bassin. La suspension à traiter est alimentée au centre du bassin, et le liquide clarifié s'écoule par des ouvertures prévues à la périphérie.

Le décanteur rectangulaire est constitué d'une cuve dans laquelle la section d'écoulement est beaucoup plus élevée que dans la conduite d'amenée. La boue se dépose sur le fond du bassin et est poussée par un racleur vers une fosse. L'eau clarifiée s'échappe par des ouvertures ménagées dans la paroi opposée à l'admission.

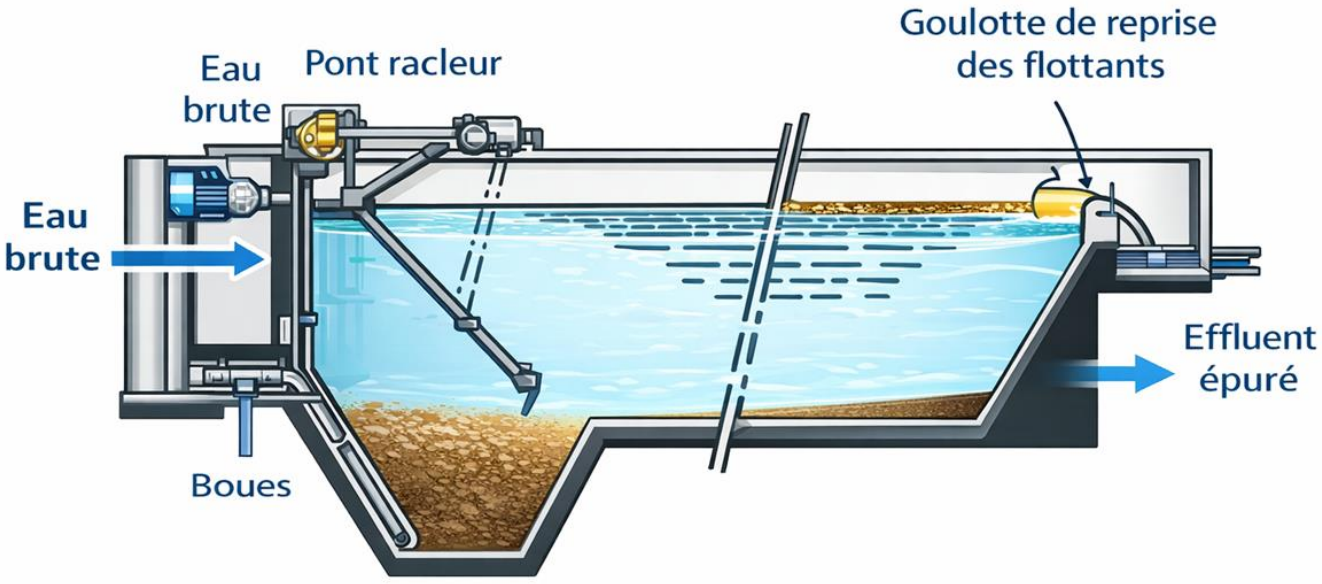


Figure III.9 : Décanteur rectangulaire à point.

Les décanteurs circulaires sont les plus répandus dans la technique d'épuration ; leur conception dérive du type rectangulaire auquel on a fait faire une rotation de la section longitudinale Les dispositifs de raclage sont solidaires d'un pont mobile qui se déplace le long d'un chemin de roulement placé à la périphérie du bassin. La suspension à traiter est alimentée au centre du bassin, et le liquide clarifié s'écoule par des ouvertures prévues à la périphérie.

Les Décanteurs circulaires raclés, de hauteurs comprises entre 2 et 3.5 m, sont limités à des diamètres de 50 à 60 m au maximum. Le fond des ouvrages a une très légère pente (4 à 8 %) vers le centre pour faciliter la collecte des boues. Le dispositif de raclage, fixé à une charpente métallique tournant autour de l'axe du bassin, possède une double fonction. Il permet, grâce à une lame continue ou à des raclettes disposées en jalousie, d'amener les boues déposées sur toute la surface du fond de

l'appareil vers une poche centrale d'où partent les tuyauteries d'extraction. Par ailleurs, un racleur de surface pousse les corps flottants vers un « pot à écumes » (figure III.10)

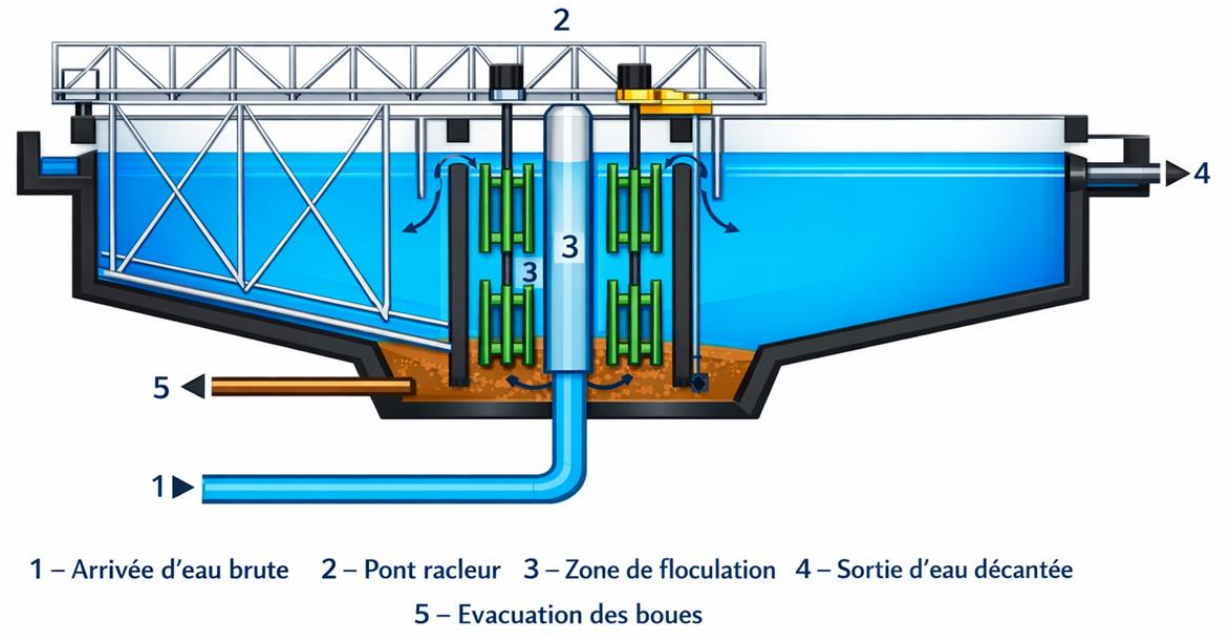


Figure III.10 : Décanteur circulaire raclé, à entraînement périphérique.

III.11.2 Décanteurs épaississeurs :

Ce type d'appareil est constitué essentiellement d'un pont support de mécanisme fixé sur le bord d'une cuve cylindrique. Le groupe d'entraînement, monté au milieu de ce support, entraîne le mécanisme de raclage constitué d'un arbre vertical et de deux bras munis de raclettes. La rotation de ces bras ramène les boues déposées sur le fond de la cuve vers le cône central de décharge.

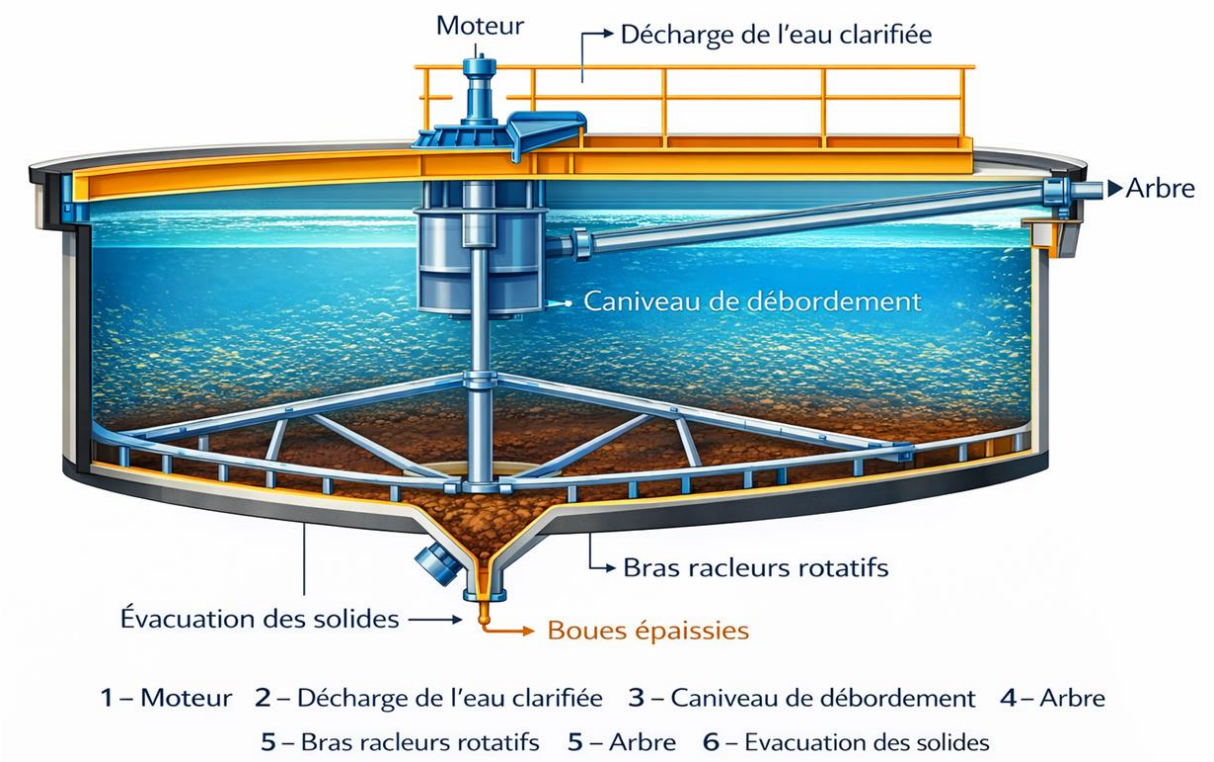


Figure III.11 : Décanteur épaississeurs Dorr-Oliver Type A.

Généralement, la tuyauterie d'alimentation de l'appareil débouche dans un cylindre suspendu au pont-support du mécanisme. Des dispositifs de relevage manuels ou motorisés permettent de sortir les bras de la boue sédimentée en cas de surcharge. Un indicateur de surcharge permet de surveiller les variations du couple résistant à la rotation du mécanisme. Différents modèles de mécanisme de raclage peuvent équiper les épaississeurs Dorr-Oliver type A selon le cas d'application. Ce type d'appareil existe dans la gamme de 2 à 45 m.



Figure III.12 : Décanteur clarificateur, type A, vitesse 1 tr/mn, avec mécanisme de relevage et couvercle, diamètre 16 m, pour le stockage et la clarification d'acide phosphorique.

Dans les épaississeurs type S (figure III.13 à l'inverse de ceux du type A, le groupe d'entraînement du mécanisme de raclage est monté sur la face supérieure de la colonne centrale de la cuve. Une cage fixée à la jante de la roue d'entraînement entoure la colonne centrale.

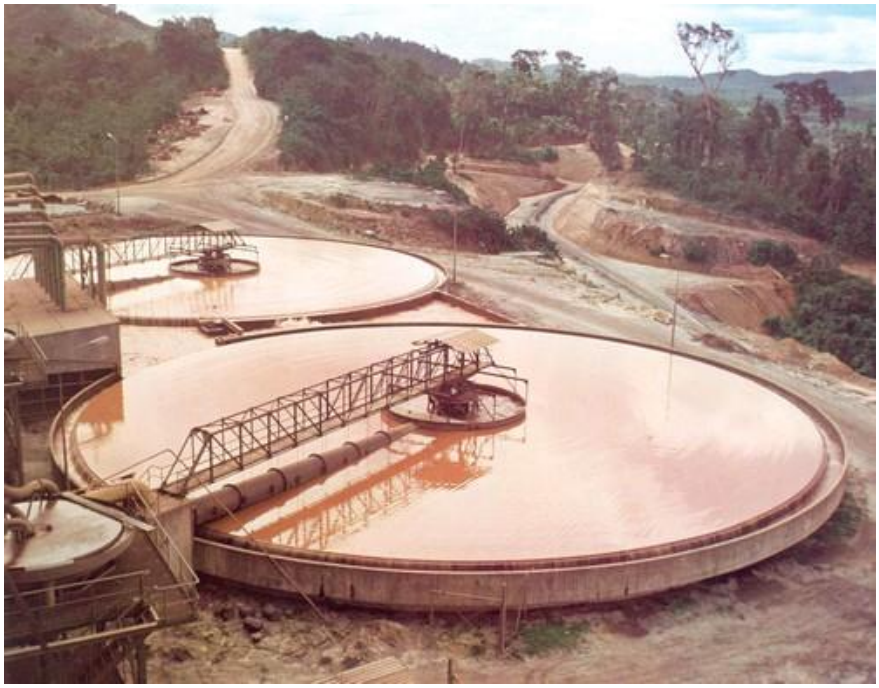


Figure III.13 : Décanteur épaississeur de type S. 45 m de diamètre, pour la clarification d'une pulpe de stériles dans une usine de traitement de minerai de fer.

A cette cage sont fixés les bras de raclage ainsi que les racleurs centraux du cône de décharge d'extraction des boues. Une passerelle reliant la colonne à la périphérie de la cuve permet l'accès au groupe d'entraînement ainsi que la fixation de la goulotte d'alimentation de l'appareil. Sur ces épaississeurs, il est également possible de monter un dispositif de relevage motorisé du mécanisme dont la course peut aller jusqu'à 900 mm. Comme dans le cas de ceux du type A, un indicateur de surcharge permet de surveiller les variations du couple résistant. Le dispositif d'alimentation et le mécanisme de raclage peuvent être réalisés de façons et de nuances de matériau différentes selon le cas d'application. La gamme des épaississeurs type 9 couvre les diamètres de 15 à 130 m.

L'épaississeur « Cabletorq » (figure III.14) apporte une innovation dans le domaine des épaississeurs. Il met en pratique une idée étonnamment simple. Le mécanisme est constitué par un bras diamétral fixé soit à l'arbre vertical (type A) soit à la cage centrale (type S), placé nettement au-dessus des boues alors que les bras de raclage des boues sont tirés à l'aide de câbles par le bras supérieur. Ces bras de raclage situés près du fond de cuve sont montés sur pivot, sur l'arbre vertical ou la cage centrale.

Les avantages essentiels de cet épaississeur « Cabletorq » sur les précédents types sont les suivants :

- En cas de surcharge, les bras de raclage peuvent se relever d'eux-mêmes puis redescendre quand celle-ci a disparu grâce au montage sur pivot. Un dispositif de relevage n'est plus nécessaire.
- Le bras transmettant la rotation, se trouvant au-dessus des boues, permet de réduire le couple moteur.
- Le bras de raclage de section tubulaire et de petite dimension évite l'accumulation des boues sur ce dernier et par suite, la formation de croûtes reste très faible.
- Les bras de raclage se relevant automatiquement l'épaississeur « Cabletorq » est à choisir de préférence aux autres pour obtenir des boues très épaisses.
- La construction en acier inox ou en acier caoutchouté si elle s'avère nécessaire, est particulièrement économique car seuls les bras de raclage sont à fabriquer dans la nuance de matériau nécessaire pour résister au milieu corrosif. Dans ce cas d'application, les bras transmettant le couple de rotation sont alors disposés au-dessus du plan d'eau.



Figure III.14 : Décanteur épaississeur Dorr-Oliver « CabIeTorq ».

Les avantages énumérés ci-dessus montrent que le « Cabletorq » convient parfaitement pour le traitement de suspensions thixotropiques, corrosives, incrustantes telles qu'on les rencontre dans l'industrie chimique et de l'alumine ainsi que pour les concentrés de minerais et le traitement des eaux usées. Le « Cabletorq » est livrable actuellement jusqu'à 30 m de diamètre en type A et 75 m en type S.

III.11.3 Décanteurs lamellaires :

- Le liquide à clarifier remonte entre des plaques parallèles inclinées, ou parfois à l'intérieur d'un empilement de tubes inclinés.
- Cette disposition augmente considérablement la surface de décantation, tout en assurant une bonne répartition du fluide dans l'appareil.
- Une inclinaison correcte des plaques ou des tubes permet aux sédiments de glisser vers le bas du décanteur, ou ils peuvent être récupérés sous forme de boues.

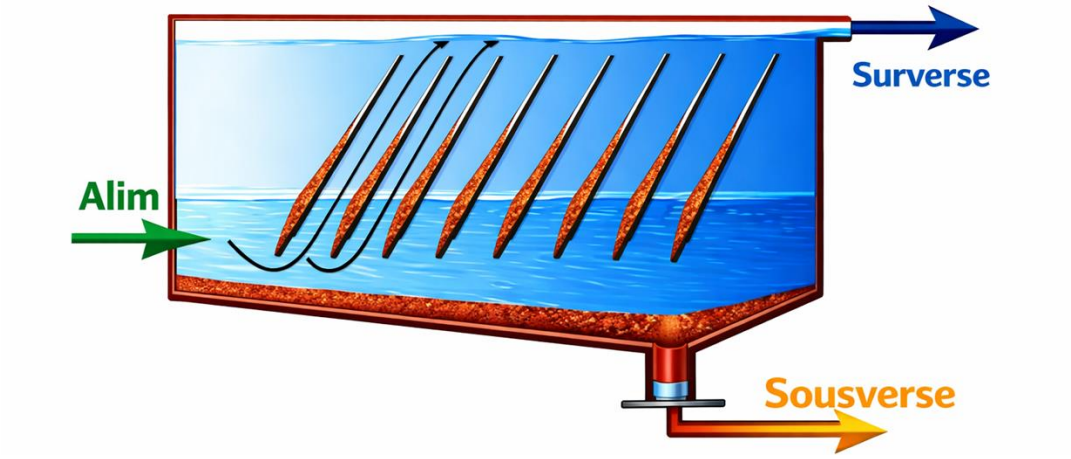


Figure III.15 : Décanteur lamellaire.

III.11.4 Décanteur rectangulaire à racloir :

Un couteau monté sur un chariot mobile procède au raclage des boues.

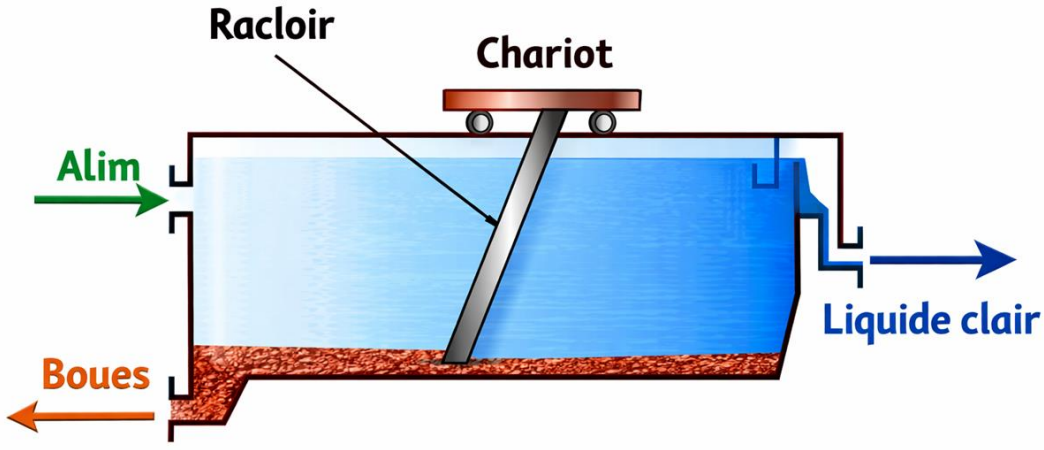


Figure III.16 : Décanteur rectangulaire à racloir.

III.11.5 Décanteur épaississeur à étage :

Le débit de traitement d'un décanteur épaississeur ne dépend pas de sa hauteur mais de son diamètre (ou de sa surface).

Pour diminuer la surface au sol, ou dans le cas du lavage à contre-courant, on réalise parfois un épaississeur à étages.

La cuve est divisée en un certain nombre de compartiments superposés par des plateaux coniques.

Lavage du solide : à la sortie de l'appareil, le solide est sous forme de boue imprégnée de liquide. Le lavage a pour but de récupérer au maximum l'une des deux phases afin d'augmenter le rendement. Cette opération peut être réalisée :

- En discontinu : remise en suspension du solide dans le liquide de lavage, nouvelle décantation et séparation
- En continu : la boue contenant le solide est véhiculée par pompe (par ex pompe à membrane) dans une batterie d'épaississeurs, avec alimentation du liquide de lavage en parallèle ou à contre-courant.

Le nombre de lavages en discontinu, ou le nombre d'épaississeurs continus est fonction de la pureté désirée.

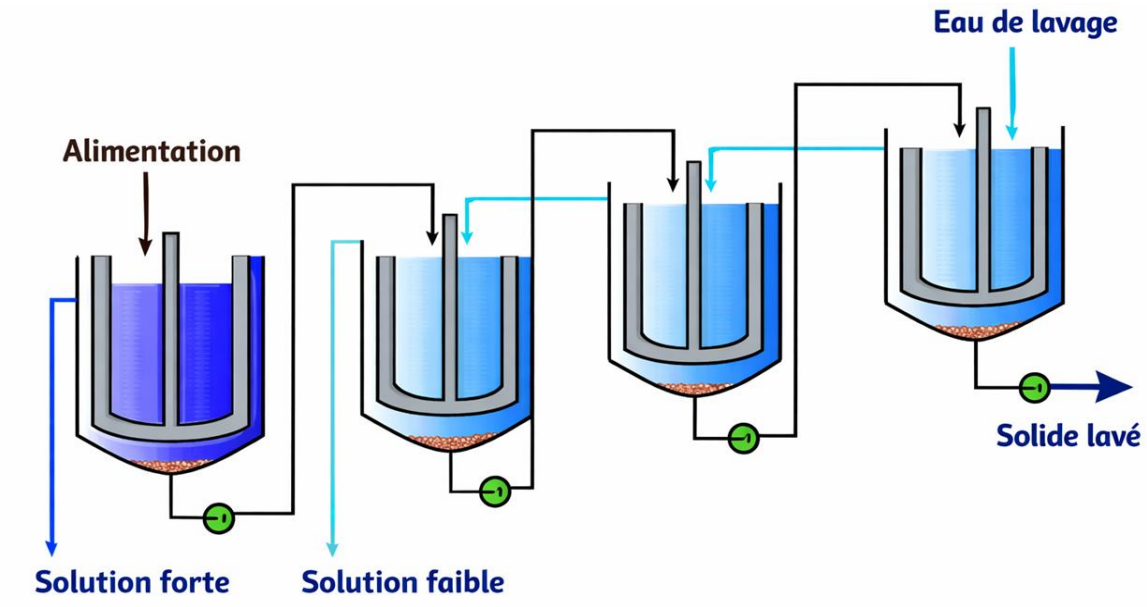


Figure III.17 : Décanteur épaississeur à étages.