

IV. Procédés physico-chimiques

- Le traitement mécanique préliminaire (prétraitement) dont le but est d'éliminer la majorité des déchets grossiers grâce à l'utilisation de dégrilleurs et de tamis, peut éliminer jusqu'au 35% des éléments polluants.

IV. Procédés physico-chimiques

- Les eaux usées prétraitées vont passer vers des étapes plus avancées de traitement :
 - Traitements physico-chimiques (traitement primaire);
 - Traitements biologiques (traitement secondaire);
 - Traitement tertiaire et quaternaire (si nécessaire).

IV. Procédés physico-chimiques

● Les catégories d'impuretés dont l'élimination constitue l'objectif de ces traitements sont :

➔ **Matières en suspension** (sable, limons, plancton, débris organiques...);

➔ **Matières colloïdales** (argiles fines, kystes de protozoaires, bactéries, macromolécules...);

➔ **Matières dissoutes** (sels, gaz...)

Les deux premières sont responsables de la turbidité, les deux dernières de la couleur et la dernière de la salinité et de diverses autres caractéristiques des eaux.

IV. Procédés physico-chimiques

● Le traitement physico-chimique des eaux usées fait appel à des procédés physiques comme la **décantation**, éventuellement assortie de procédés physico-chimiques, tels que la **coagulation** et la **floculation**.

IV. Procédés physico-chimiques

- ❖ En traitements physico-chimiques, il est possible d'ajouter dans l'eau des agents coagulants et flocculants.
- ❖ On peut alors récupérer un grand nombre de particules en suspension par décantation, filtration, précipitation ou flottation (boues physico-chimiques).
- ❖ Cette étape permet d'éliminer environ 90% des particules et objets en suspension.

IV. Procédés physico-chimiques

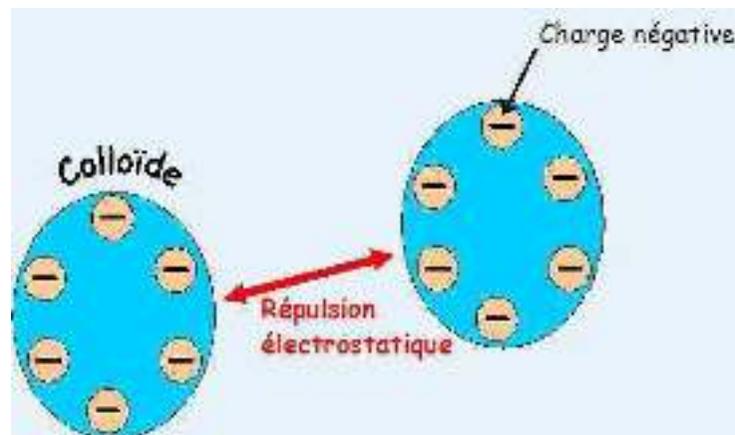
- ❖ Elle est commune à une très grande majorité des stations d'épuration. Mais il reste alors dans l'eau tout ce qui y est dissous : éléments azotés, phosphatés, composés actifs et des particules fines.
- ❖ Ces éléments sont éliminés ensuite par d'autres procédés de traitements.

IV. Procédés physico-chimiques

➤ En épuration des eaux usées, le traitement physico-chimique peut être utilisé pour des effluents présentant une pollution colloïdale ou émulsionnée importante (environ 40% de la pollution totale), ce qui permet d'alléger le poids du traitement biologique.

IV. Procédés physico-chimiques

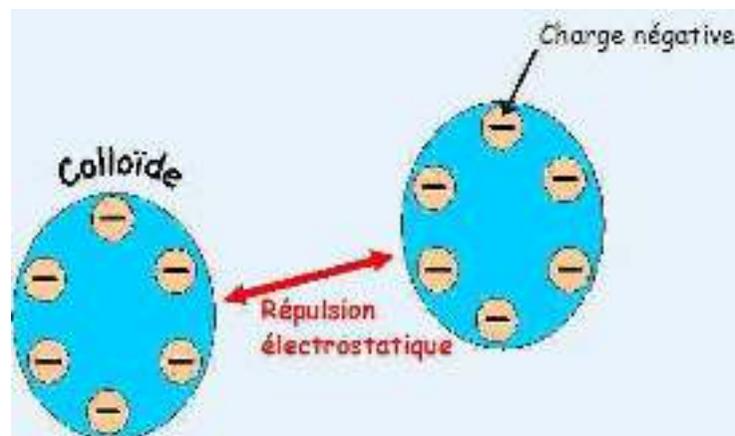
- Les colloïdes ou «solutions colloïdales» sont des mélanges (liquide, gel) qui contiennent des particules en suspension.
- Ces éléments ont un très faible diamètre et sont chargées électro-négativement.



Structure des colloïdales

IV. Procédés physico-chimiques

- D'après la définition officielle, leur taille est comprise entre un nanomètre (10^{-9} m) et une centaine de micromètres (soit 10^{-4} m).
- Leur vitesse de sédimentation est extrêmement faible, on procède donc à une coagulation-floculation pour les éliminer.



Structure des colloïdales

IV. Procédés physico-chimiques

Diamètre de particule mm	Type de pécule	Temps de décantation pour 1 m d'eau
10	Gravier	1 seconde
1	Sable	10 secondes
10^{-1}	Sable fin	2 minutes
10^{-2}	Argile	2 heures
10^{-3}	Bactérie	8 jours
10^{-4}	Colloïde	2 ans
10^{-5}	Colloïde	20 ans
10^{-6}	Colloïde	200 ans

Temps de sédimentation de différentes particules en suspension

IV. Procédés physico-chimiques

➤ Les argiles, oxydes métalliques, carbonates, ainsi que les acides humiques, les protéines de haute masse moléculaire et certains virus font partie de cette classe substances colloïdales.

IV. Procédés physico-chimiques

⊙ Dans le monde industriel, nombreuses sont les applications des traitements physico-chimiques.

⊙ Elles sont divisées grosso modo en deux temps, d'abord au niveau de l'état chimique des colloïdes qui sont déstabilisées, puis au niveau de la séparation liquide-solide.

IV. Procédés physico-chimiques

IV.1. Coagulation

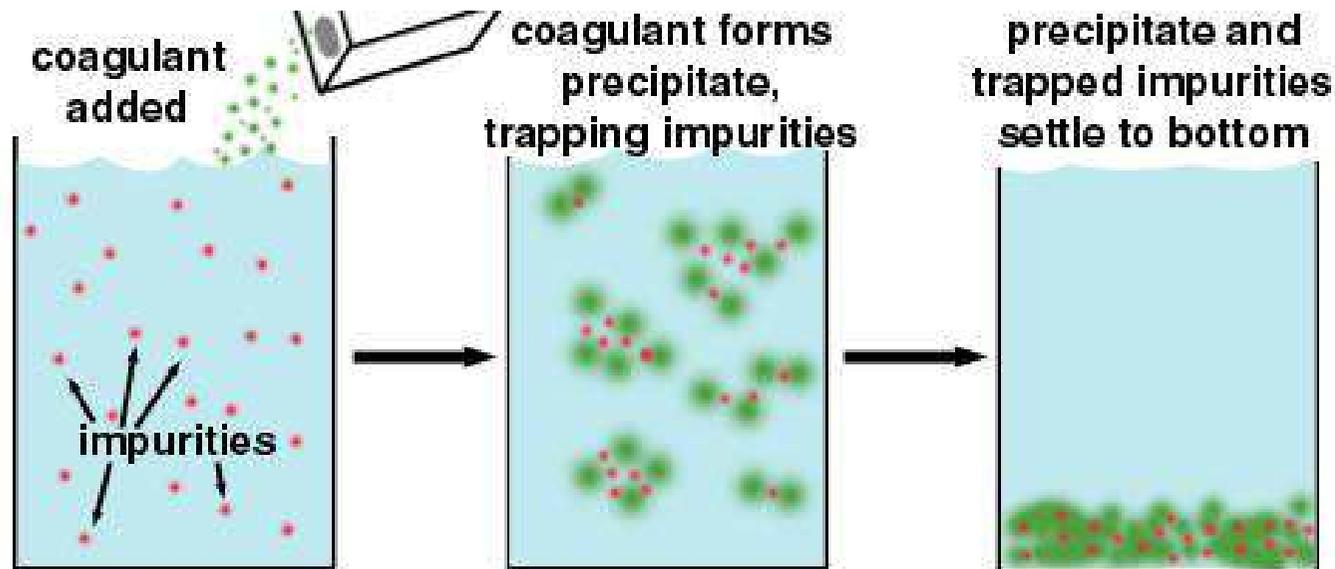
✚ La coagulation est toujours la première étape d'un traitement physico-chimique. Elle précède souvent d'autres procédés comme la floculation/décantation/filtration..

✚ Ce traitement consiste à ajouter aux eaux à traiter des produits chimiques ou des **coagulants**.

IV. Procédés physico-chimiques

IV.1. Coagulation

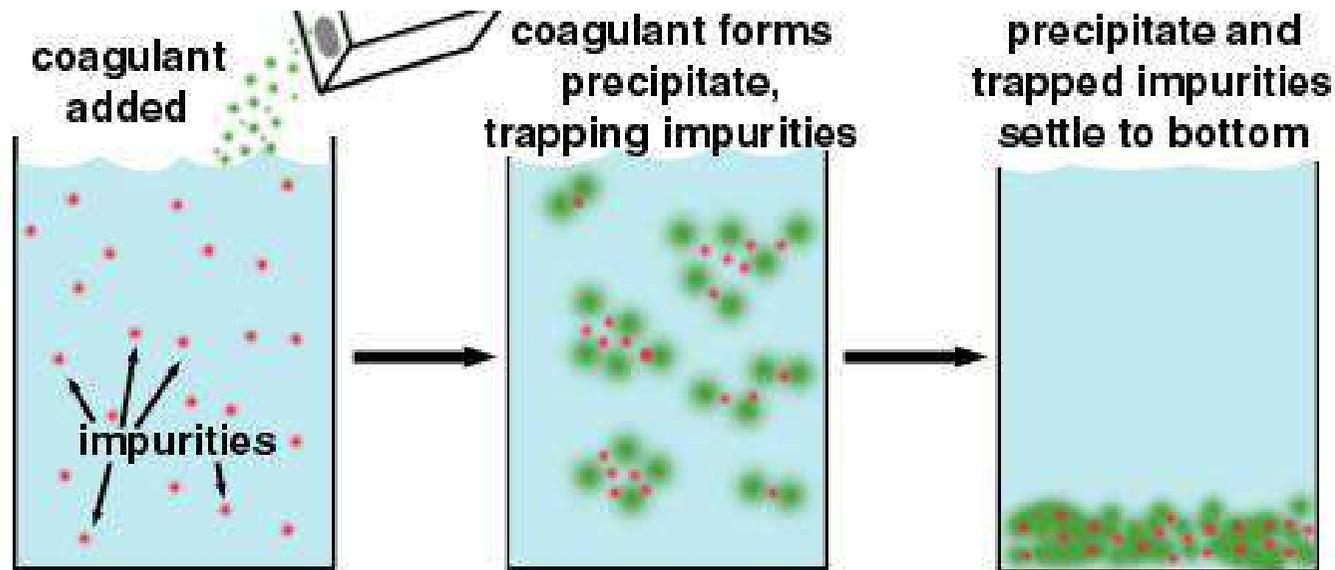
✚ Grace à leur charge positive, les coagulants sont capables de neutraliser la charge négative de la surface des matières colloïdales et d'annuler par conséquent les forces répulsives de ces dernières.



IV. Procédés physico-chimiques

IV.1. Coagulation

✚ Quand cette réaction se produit les particules se lient et forment des **petits flocs** qui se séparent lentement de l'eau. Ces agglomérations en **flocons** sont récupérables par des traitements postérieurs.



IV.1. Coagulation

✚ Le coagulant peut être introduit dans un bassin de coagulation adéquat assurant une violente agitation au point d'injection.

✚ Les coagulants les plus utilisés sont des sels métalliques (généralement de fer ou d'aluminium):

- Les sulfates d'aluminium, $Al_2(SO_4)_3$
- Le chlorure ferrique, $FeCl_3$

✚ Lorsque l'eau est froide ou lent à coaguler, l'emploi d'un initiateur de floc tel que l'aluminate de sodium est souvent intéressant.

IV.1. Coagulation

✚ Le temps de rétention hydraulique du bassin de coagulation doit être conforme aux recommandations du fournisseur et être d'au moins 1 à 2 minutes.

➔ En eau froide, il peut être parfois préférable de prolonger la rétention pour permettre un contact efficace entre l'eau et le coagulant.

➔ Le temps de rétention nécessaire peut également varier selon la vitesse de réaction du coagulant utilisé.

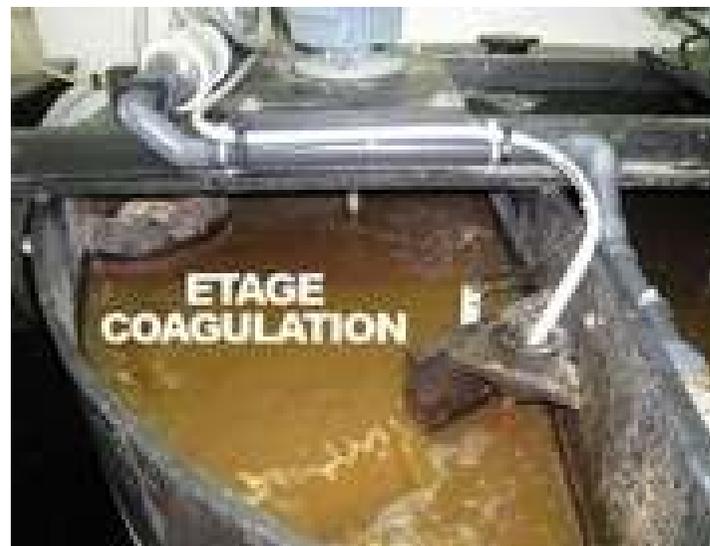
IV.1. Coagulation

- Le bassin de coagulation doit être équipé d'une unité mécanique de mélange rapide (**agitateur**): un dispositif mécanique de mélange rapide, souvent vertical à hélice.
- Il existe plusieurs types d'agitateurs dont le mélangeur statique est généralement le plus utilisé.
- Le temps de réaction du coagulant est court, soit de l'ordre de quelques minutes.



IV.1. Coagulation

- ✚ Le gradient de vitesse doit respecter les recommandations du fournisseur et être de l'ordre de 300 à 1500 s^{-1} selon les applications.
- ✚ Le choix et le dosage des coagulants doivent être déterminés au laboratoire par un jar test sur l'eau à traiter ou encore par des essais pilotes.



IV.1. Coagulation

- ✿ Le paramètre pH est important dans le processus de coagulation.
- ✿ Lorsque l'ajout d'un produit alcalin ou acide est nécessaire pour optimiser la coagulation, celui-ci devrait toujours être injecté soit en amont (de préférence), soit au même endroit que le coagulant afin que les conditions propices à la coagulation soient présentes au moment de l'introduction du coagulant.

IV.1. Coagulation

Le pH nécessaire pour la coagulation

Coagulant	pH optimum pour la coagulation
Al ³⁺	6.0 – 7.4
Fe ³⁺	> 5

IV. Procédés physico-chimiques

IV.2. Flocculation

- ❖ La flocculation est l'étape de traitement qui suit la coagulation.
- ❖ La taille des floccs déjà formés aux cours de la coagulation n'est pas suffisante pour la décantation, on injecte alors un **floculant** (l'**adjuvant de flocculation**) accompagné d'une agitation lente.



IV. Procédés physico-chimiques

IV.2. Flocculation

- ❖ Cette technique favorise le rassemblement des colloïdes et la croissance de floccs.
- ❖ Ainsi, l'agglomérat obtenu aura une taille satisfaisante pour être séparé de la phase liquide ou sédimenter dans le bassin pourvu d'une unité mécanique d'agitation.



IV.2. Flocculation

- ✓ Les plus petites particules en suspension ont les vitesses les plus élevées, d'où une plus grande probabilité de se rencontrer en raison des phénomènes diffusionnels. C'est le cas de la **flocculation péricinétique** (très lente).
- ✓ Lorsque le milieu est mécaniquement agité, l'efficacité de la formation des agrégats s'accroît: c'est la **flocculation orthocinétique**, engendrée par des gradients de vitesse. C'est la méthode la plus utilisée et qui permet d'obtenir des flocs volumineux.

IV.2. Flocculation

- Le choix d'adjuvant de flocculation optimal, communément appelé **polymère** fait l'objet, en général, de tests de laboratoire.
- Les flocculants peuvent être **minéraux** (silice activé), **organiques** et d'origine naturelle (alginates), **synthétiques** (polyélectrolytes, etc.). Ils existent sous forme solide ou en solution.

IV.2. Flocculation

- L'apparition de **polymères de synthèse** a fait évoluer considérablement les performances de la flocculation en permettant la formation de flocs plus gros et résistant mieux aux contraintes de cisaillement.
- Ces flocculants représentent généralement le deuxième poste budgétaire en coûts d'exploitation d'une station. Ils peuvent ainsi représenter environ 10% de ces coûts d'exploitation.

IV.2. Flocculation

- Les polymères les plus utilisés pour la flocculation sont souvent des polyélectrolytes organiques ou des hydroxydes métalliques du type $([\text{Fe}(\text{OH})_3])_n$ ou $([\text{Al}(\text{OH})_3])_n$.
- Les produits organiques introduits pour accélérer la flocculation sont des macromolécules dont le motif de base est souvent l'acrylamide.

IV.2. Flocculation

- Le temps à respecter entre les ajouts du coagulant et du flocculant est primordial : en effet, un flocculant n'est efficace que lorsque la phase de microfloculation est achevée.
- Ce temps est fonction de divers facteurs (composition de l'eau, température...) et doit être déterminé expérimentalement dans chaque cas.

IV.2. Flocculation

- Le flocculant est introduit au niveau de l'agitateur situé dans le réacteur, et le temps d'action est compris généralement entre **5 et 20 minutes**.
- La puissance d'agitation doit également être contrôlée afin d'optimiser la croissance des floccs qui est perturbée par des fortes turbulences.

IV.2. Flocculation

Le bassin, le système d'agitation et les équipements connexes doivent être conçus pour :

- Assurer le temps nécessaire pour la flocculation. Une flocculation trop longue conduit à la destruction progressive du floc;
- Permettre l'ajustement de l'intensité de mélange en équipant les agitateurs de variateurs de vitesse;
- Éviter le bris du floc (vitesse maximale d'inférieure à 0,6 et à 1,2 m/s respectivement pour un floc fragile et un floc fort)...

IV.2. Flocculation

Coagulation et flocculation sont des processus souvent indissociables:

- ➔ La coagulation, en diminuant les forces de répulsion entre les particules, favorise la formation d'agrégats ;
- ➔ Et la flocculation, en permettant la croissance des agrégats, accélère la séparation des phases.



Coagulation-flocculation des eaux usées

IV. Procédés physico-chimiques

IV.3. Décantation

- La décantation consiste en une séparation des éléments liquides et des éléments solides sous l'effet de la pesanteur. Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé «décanteur» pour former les «boues primaires».
- Il s'agit d'un procédé de séparation solide/liquide basé sur la différence de densité des particules de l'eau traitée.
- Elle doit obligatoirement être précédée des étapes de coagulation-floculation (formation de floccs) et en plus d'être suivie d'une filtration.

IV.3. Décantation

- L'étape de décantation est nécessaire lorsque la charge de l'eau brute est trop élevée pour permettre l'usage d'une filtration sans provoquer le colmatage trop rapide des filtres.



Décanteur

IV.3. Décantation

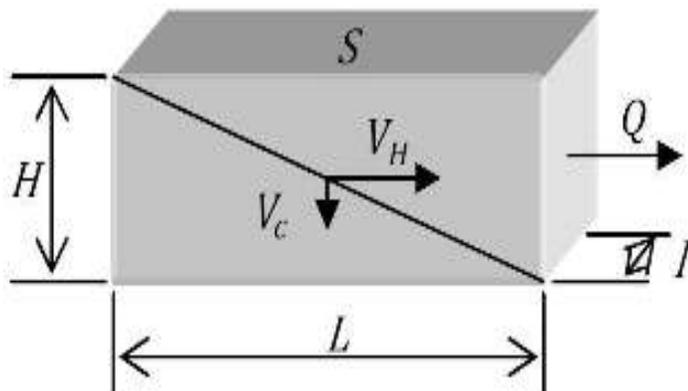
Divers types de matières décantables sont à distinguer :

- Les particules grenues qui décantent indépendamment les unes des autres avec chacune une vitesse de chute constante (limons);
- Les particules plus ou moins floculées ont des tailles et des vitesses de décantation variables.

IV.3. Décantation

- ✓ Pour que la décantation puisse se faire correctement, il faut que la vitesse de l'eau soit inférieure à la vitesse de sédimentation des particules (vitesse de chute : V_c).
- ✓ La vitesse de l'eau est appelée charge hydraulique superficielle ou vitesse de Hazen (V_H) et s'exprime en ($m^3/h/m^2$) : $V_H = Q / S$

La Particule est retenue dans un décanteur si: $V_c \geq V_H$



V_H : Vitesse de Hazen

V_c : Vitesse de chute de la particule

H : hauteur du bassin

L : Longueur du bassin

S : surface horizontale

Q : débit traversant le bassin.

IV.3. Décantation

IV.3.1. Différents types de décantation

- ➔ Selon le **type de décanteur**, deux catégories de décantations peuvent être distinguées:
 - **Décantation statique**
 - **Décantation lamellaire**

IV.3. Décantation

IV.3.1. Différents types de décantation

➤ Décantation statique



IV.3. Décantation

IV.3.1. Différents types de décantation

➤ Décantation statique

- ✚ Lors de la décantation, les particules, dont la densité est supérieure à l'eau, vont avoir tendance à s'accumuler au fond du bassin «**décanteur**» sous l'effet de la pesanteur.
- ✚ Dans ce type de décantation le paramètre de dimensionnement pour les ouvrages est essentiellement la vitesse ascensionnelle V .

IV.3. Décantation

➤ Décantation statique

➡ En pratique, V est comprise entre 1 et 2 m/h pour un débit Q du temps sec (hors période de pluie). À partir de cette vitesse ascensionnelle, la surface S des bassins est déterminée par :

$$S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/h)}}{v \text{ (m/h)}}$$

IV.3. Décantation

➤ Décantation statique

- Les particules décantées seront éliminées du fond du bassin périodiquement.
- L'eau clarifiée se situant à la surface du décanteur est ensuite redirigée vers un filtre (processus de filtration).

IV.3. Décantation

➤ Décantation statique

Avantages

- ❑ Fonctionnement efficace avec des eaux à traiter dont les matières en suspension ont une densité supérieure à l'eau (vitesse supérieure à l'eau);
- ❑ Exploitation simplifiée par , dans la majorité des cas, l'absence de mécanique, utilisation de la force gravitaire seulement...

IV.3. Décantation

➤ Décantation statique

Inconvénients

- ❑ En décantation statique les surfaces sont assez importantes pour obtenir de bons résultats;
- ❑ Inefficace lorsque les matières en suspension sont de densité inférieure ou égale à l'eau;
- ❑ L'extraction des décantats entraîne aussi de l'eau, ce qui augmente considérablement le volumes des boues collectées...

IV.3. Décantation

➤ Décantation lamellaire



IV.3. Décantation

➤ Décantation lamellaire

✚ De conception plus moderne où les ouvrages reposent sur le fait que la seule grandeur fondamentale est la surface horizontale de l'ouvrage.

- Pour ce cas, la rétention d'une particule est indépendante de la hauteur de l'ouvrage.

- Le principe de la décantation lamellaire consiste donc à utiliser des plaques proches les unes des autres pour accroître la surface de décantation disponible par volume d'ouvrage.

- Afin d'assurer l'évacuation des boues, les plaques sont inclinées par rapport à l'horizontale.

IV.3. Décantation

➤ Décantation lamellaire

✚ La surface disponible pour la décantation correspond alors à la surface totale projetée STP sur l'horizontale de l'ensemble des plaques :

$$STP = n S_p \cos \alpha$$

Avec : **n** : nombre de plaques,

S_p (m²) : surface unitaire de chaque plaque,

α : angle d'inclinaison des plaques par rapport à l'horizontale ; selon le modèle des lamelles, α est de 55° ou 60°.

✚ La vitesse ascensionnelle dans ce cas est :

$$v_h \text{ (m/h)} = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/h)}}{STP \text{ (m}^2\text{)}}$$

IV.3. Décantation

➤ **Décantation lamellaire**

L'efficacité d'un système lamellaire est liée à différents paramètres :

➤ **Répartition de l'eau dans les cellules de décantation**

Chaque cellule doit recevoir le même débit d'eau afin d'éviter les survitesses à l'origine d'une dégradation de la décantation;

➤ **Ecartement des lamelles**

Il doit être suffisant pour éviter le colmatage des lamelles par la boue décantée et pour permettre éventuellement leur nettoyage;

IV.3. Décantation

➤ Décantation lamellaire

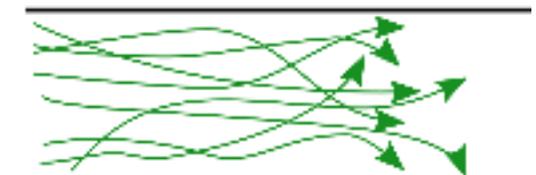
➤ Surface de décantation équivalente

Les plaques formant le décanteur lamellaire doivent avoir la même surface;

➤ Hydraulique

La forme des lamelles doit favoriser le passage du régime d'écoulement de turbulent (à l'entrée des lamelles) au régime laminaire (au sein des lamelles)..

Régime laminaire



Régime turbulent

IV.3. Décantation

IV.3.1. Différents types de décantation

➔ Selon la **concentration en solide** et la **nature des particules** (densité et forme), on distingue grosso modo :

- **Décantation des particules grenues (discrètes)**
- **Décantation de particules floculées**

IV.3. Décantation

IV.3.1. Différents types de décantation

➤ Décantation des particules grenues (discrètes)

Les particules conservent leurs propriétés initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est alors indépendante de la concentration en solide.

IV.3. Décantation

Différents types de décantation

➤ Décantation de particules floculées

- Ce type de décantation est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques de ces particules (forme, dimension, densité et vitesse de chute) sont donc modifiées pendant le processus.

Exp: La vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc s'accroissent par suite de rencontres avec d'autres particules.

- Ce processus se produit dès que la concentration en matières floculées est supérieure à environ 50 mg.l^{-1} .

IV.3. Décantation

Différents types de décantation

- Dans un décanteur, lorsque la concentration est faible, le floc formé est dispersé et chaque flocon décante comme s'il était seul : c'est la **décantation diffuse**.
- Pour des concentrations plus élevées, l'abondance des floes crée une décantation d'ensemble, le plus souvent caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant: c'est la **décantation en piston des particules floculées** ou **décantation à contact de boue** dont la vitesse est optimale dans une certaine zone de concentrations.

IV.3. Décantation

Différents types de décantation

- Une concentration élevée voir très élevée de particules 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 parle de **décantation freinée**.
- ➔ Ce phénomène est caractéristique des boues et suspensions flocculées dont la concentration est supérieure à environ $500 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

IV.3. Décantation

Différents types de décantation

- Lorsque les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures, on parle de : **décantation en compression de boues.**
- Des agents lestants (par exemple du microsable) peuvent être ajoutés aux eaux à décanter. Le floc se constitue autour du lest et l'ensemble possède alors une vitesse de décantation élevée: c'est le cas de **la décantation à floc lesté.** Dans ces conditions, les vitesses ascensionnelles dans les lamelles peuvent atteindre 100 m/h.

IV.3. Décantation

IV.3.2 .Principe de fonctionnement d'un bassin de décantation:

- ➔ Le but d'un décanteur est de permettre aux floccs de sédimenter au fond d'un bassin pour les éliminer des eaux. On récupère alors au fond des **boues primaires** qui seront traitées par la suite.
- ➔ Les particules, dont la densité est supérieure à l'eau, s'accumulent au fond du décanteur sous l'effet de la pesanteur et l'eau clarifiée se situant à la surface.

IV.3. Décantation

IV.3.2 .Principe de fonctionnement d'un bassin de décantation:

➡ Pour qu'une décantation soit efficace, l'écoulement de l'eau à l'intérieur du décanteur doit être laminaire. L'écoulement turbulent, est à proscrire.

IV.3. Décantation

IV.3.3. Différents types de décanteurs

- ➔ Il existe deux grands types de décanteurs :
 - ✓ **Décanteur statique (à flux horizontaux)**
 - ✓ **Décanteur lamellaire (à flux verticaux)**

IV.3. Décantation

Décanteur horizontal

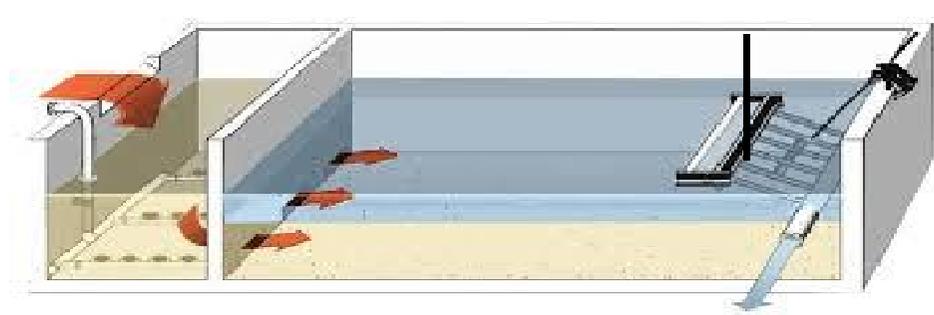
- ✓ Le décanteur horizontal est constitué d'une cuve parallélépipédique.
- ✓ L'eau chargée de matière en suspension pénètre à une extrémité et l'eau décantée ressort à l'autre suivant un écoulement horizontal.
- ✓ Elle nécessite une surface de bassin de décantation importante avec une vitesse de sédimentation généralement faible.



IV.3. Décantation

Décanteur horizontal

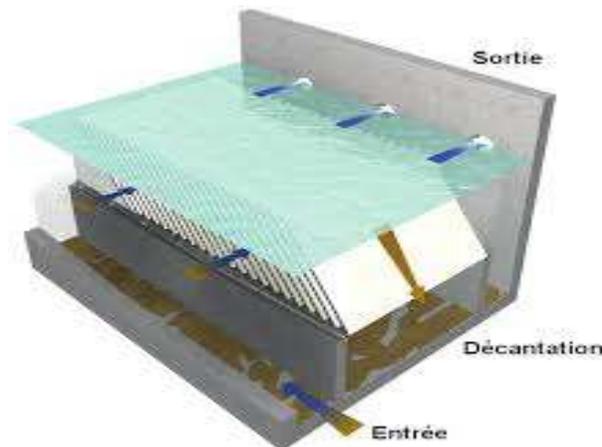
- ✓ Pour optimiser le rendement du décanteur, on le fait généralement précéder d'un compartiment de tranquillisation dans lequel une sensible diminution de la vitesse de transfert permet la décantation des particules les plus grosses et la coalescence des floccs les plus fins.



IV.3. Décantation

Décanteur lamellaire (appelé vertical ou particulaire)

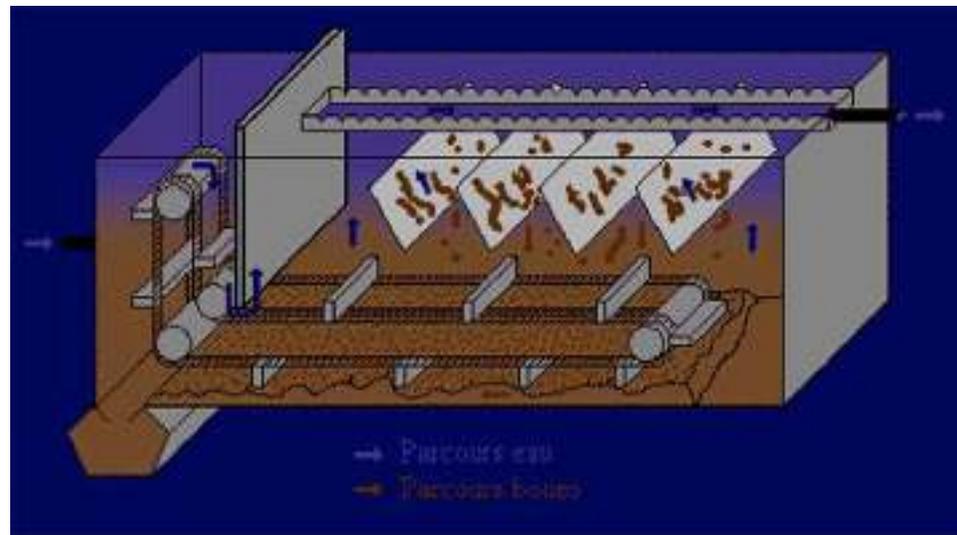
- ✓ Il s'agit d'un ouvrage de décantation dans lequel des lamelles parallèles inclinées permettent de multiplier la surface de décantation.
- ✓ Cette technique est utile tout en réduisant la surface au sol par rapport à un bassin de décantation classique à flux horizontal.



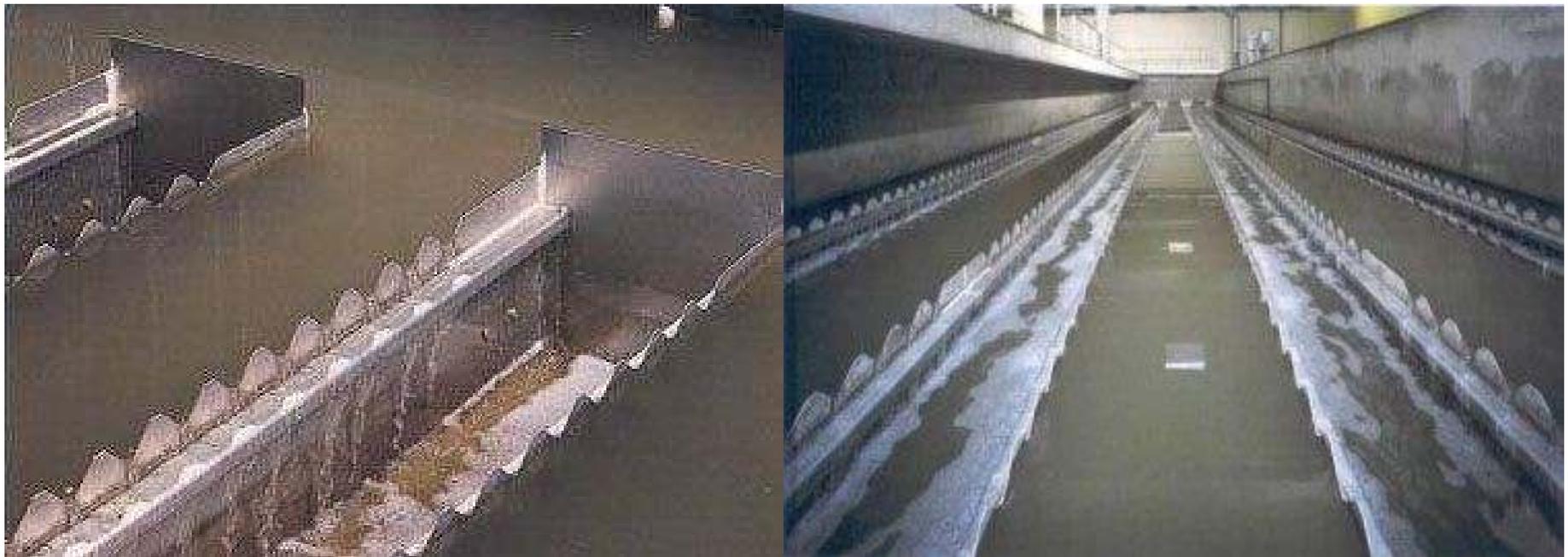
IV.3. Décantation

Décanteur lamellaire (appelé vertical ou particulaire)

- ✓ Les décanteurs lamellaires réalisent une décantation considérablement plus rapide que la décantation classique.



IV.3. Décantation



Décanteurs lamellaires

IV.3. Décantation

➔ Pour avoir une bonne qualité d'eau décantée, une sédimentation efficace et un épaissement correct des boues, différentes zones horizontales de l'ouvrage sont déterminées :

- Zone d'eau claire (en haut): est comprise entre 0,5 m et 1 m;
- Zone de sédimentation: qui est entre 1,5 m et 2,5 m;
- Zone d'épaississement: qui est entre 0,5 m et 1,5 m .

IV.3. Décantation

➔ Le raclage des boues s'effectue au moyen de racleurs formés d'une ou plusieurs lames poussant ces boues vers une ou plusieurs trémies.



IV. Procédés physico-chimiques

IV.4. Filtration

La filtration est un procédé de séparation qui utilise le passage d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (**filtre**) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (**filtrat**).

- Elle permet de retenir les matières en suspension qui n'ont pas été piégées lors des étapes précédentes.
- Elle est réalisée sur des matériaux classiques (sables) ou sur des membranes.

IV. Procédés physico-chimiques

IV.4. Filtration

- Cette technique est la barrière ultime et obligatoire des procédés de traitement des eaux dans la majeure partie des cas.
- Elle vise à réaliser ou à compléter, à travers un **lit filtrant**, la réduction des particules en suspension, des coliformes, des virus, des parasites ainsi que la turbidité.

IV.4. Filtration

IV.4.1. Matériaux des filtres

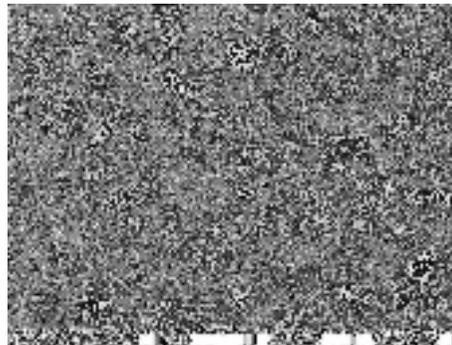
Selon le type de filtre adopté, on a recourt à divers matériaux filtrants, on utilise ainsi :

a) Des tissus de fibres, des toiles métalliques ou des pierres poreuses à interstices très fins.

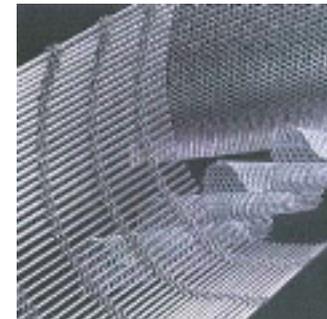
Ces matériaux retiennent les solides en surface. On les utilise rarement pour traiter des quantités d'eau importantes.



Tissus en fibres de carbone



Pierres poreuses



Toiles métalliques

IV.4. Filtration

IV.4.1. Matériaux des filtres

b) Des granules libres qui n'adhèrent pas les unes aux autres. Ces matériaux sont insolubles et inattaquables par le liquide filtré ou par les solides qui s'y déposent.

Le sable, l'antracite et l'ilménite sont couramment utilisés dans les usines de traitement des eaux.



L'antracite : roche sédimentaire.
Le plus propre le plus dur et le plus estimé des charbons.



Sable



L'ilménite : un minéral accessoire commun dans les roches magmatiques

IV.4. Filtration

IV.4.2. Filtre

✚ Le filtre peut jouer un double rôle suivant les conditions d'exploitation :

- D'une part, il retient les matières en suspension par filtration (formation de **gâteau**);
- D'autre part, il constitue un support bactérien permettant un traitement biologique, c'est à dire une consommation des matières organiques et de l'ammoniac, ou du fer et du manganèse, par les bactéries qui sont développées sur le sable.

✚ La hauteur du filtre est comprise généralement entre 0,8 et 1,5 mètre.

IV.4. Filtration

IV.4.2. Filtre

✚ La percolation de l'eau à travers le média filtrant entraîne un colmatage progressif lié aux matières en suspension retenues par le filtre et ralentit par conséquent le passage de l'eau.

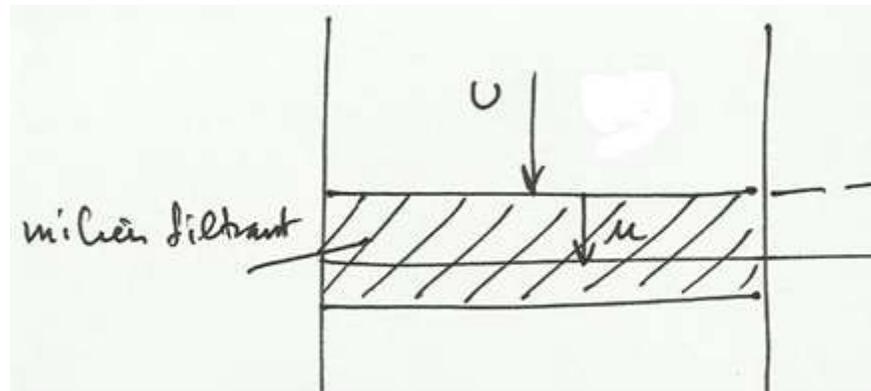
- Pour retrouver la capacité de filtration du filtre, il faut procéder régulièrement au décolmatage et au lavage du matériau.
- Pour s'affranchir de cette contrainte, certains fournisseurs proposent des filtres autonettoyants dans lesquels le lavage est réalisé en continu par injection d'air (système d'airlift).

IV.4. Filtration

IV.4.2. Filtre

✚ Un mélange à filtrer, situé au-dessus d'un milieu filtrant, s'écoule vers lui avec une vitesse d'écoulement U .

✚ Quand une particule, transportée à la vitesse U , rencontre le milieu filtrant, une fois à l'intérieur de lui sa vitesse change et devient ce que l'on appelle la **vitesse interstitielle u** . Si f est la porosité du filtre, u est définie par: **$u=U/f$**

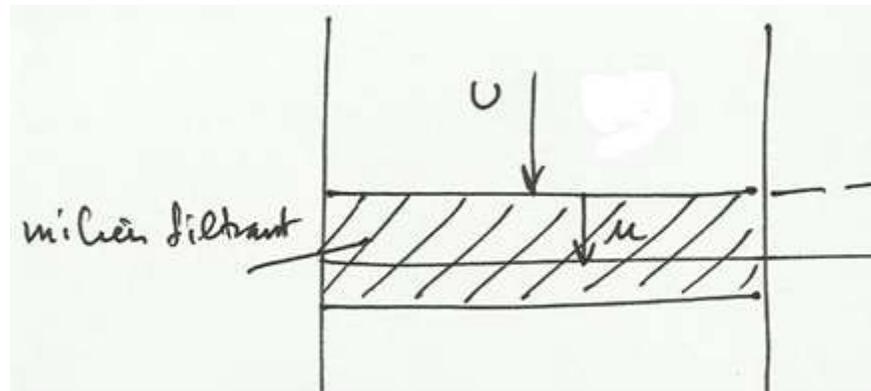


IV.4. Filtration

IV.4.2. Filtre

- Quand les particules progressent dans le milieu filtrant, une partie d'entre elles s'accumulent pour former un dépôt accumulé de masse q par unité de volume du filtre (kg/m^3) et de masse volumique p (kg/m^3).

La vitesse interstitielle devient: $u = U/f - q/p$



IV.4. Filtration

IV.4.3. Différents types de filtres

Il existe grosso modo deux types de filtres:

- Des filtres à sable lents
- Des filtres à sable rapides

Le **filtre à sable**, aussi appelé **lit filtrant** est formé d'un matériau (sable ou sable plus anthracite ou ilménite) de différentes granulométries .

IV.4. Filtration

Filtres à sable lents

- ✓ Les filtres lents sont utilisés pour des eaux moyennement et fortement chargées en matières solides en suspension
- ✓ L'eau dans ce cas percole à travers le lit de sable disposé dans des grands bassins ouverts à l'air libre.
- ✓ La couche de sable est surmontée d'une couche d'eau de (0,7 m à 3 m), s'écoulant en traversant le sable sous l'action de la pesanteur.

IV.4. Filtration

Filtres à sable lents

- ✓ L'eau filtrée est recueillie au fond du bassin à l'aide d'un système de drainage.
- ✓ Le nom de "filtre lent" vient du fait que la vitesse de percolation est très faible, de l'ordre de 0,1 à 0,5 m/h.

IV.4. Filtration

Filtres à sable lents

- ✓ Les filtres à sable lents doivent être construits de telle sorte que l'eau traverse lentement une couche de sable fin et que les particules les plus grosses soient arrêtées près de la surface du sable.
- ✓ Ces particules forment une couche poreuse très fine, constituée de bactéries, d'algues et de protozoaires.
- ✓ La filtration lente combine donc les effets de processus physiques et de processus biologiques

IV.4. Filtration

Filtres à sable lents

❖ Avantages :

- ✓ Les matériaux de la construction de ces filtres , leur surveillance de leur fonctionnement sont simples.
- ✓ Ils éliminent bien les bactéries...

❖ Inconvénients :

- ✓ Ils exigent une installation de grandes dimensions et un volume de sable important.
- ✓ Leurs lavages requièrent de longues périodes de temps et leur utilisation est coûteuse lorsque la turbidité des eaux est élevée.
- ✓ Ils donnent de mauvais résultats lorsque les eaux sont riches en algues et qu'elles n'ont pas été préalablement traitées...

IV.4. Filtration

Filtres à sable rapides

- ✓ Le filtre à sable rapide est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation.
- ✓ Le nom de "filtres rapides" vient de l'importance des vitesses d'environ 20 à 50 fois plus élevées que celles des filtre à sable lents. Ces vitesses sont généralement de 2 à 25 m/h.
- ✓ Ces vitesses engendrent des durées de traversée du matériau filtrant trop courtes.

IV.4. Filtration

Filtres à sable rapides

- ✓ Ce type de filtres est utilisé pour des eaux faiblement chargées de matières solides en suspension,
- ✓ L'eau dans ce cas est envoyée sous pression à travers le lit de sable (nécessité d'utilisation des pompes).
- ✓ Lorsque le milieu filtrant est encrassé, on lave le filtre en inversant le sens de l'écoulement de l'eau (bas en haut) avec éventuellement injection d'air comprimé.
- ✓ Le lavage de ce filtre est fréquent et va de deux fois par jour à une fois par trois jours.

IV.4. Filtration

IV.4.4. Différentes formes de filtres

Il existe plusieurs de formes de filtres,
dont les plus utilisés sont:

Filtres à tambour



IV.4. Filtration

Filtres à tambour

- ✓ Le liquide est filtré à travers les parois périphériques du tambour, celui-ci tournant à petite vitesse.
- ✓ Grâce à la structure particulière du filtre, les particules sont soigneusement séparées du liquide. Les particules solides ainsi récupérées sont, après rinçage, collectées dans un bac et évacuées.
- ✓ Pour de gros débits, la filtration par disque est plus appropriée.

IV.4. Filtration

Filtres à disque



IV.4. Filtration

Filtres à disque

- ✓ La technologie des disques est particulièrement avantageuse lorsqu'une grande surface de filtrage est nécessaire.
- ✓ Grâce à la compacité élevée des filtres, la surface filtrante est 2 à 3 fois supérieure à celle d'un filtre à tambour de mêmes dimensions extérieures.
- ✓ Par effet de gravité, l'eau coule à travers les filtres et les particules solides sont séparées du liquide grâce aux toiles micro-filtrantes fixées sur les 2 faces des disques.

IV.4. Filtration

Filtres à cartouche



IV.4. Filtration

Filtres à cartouche

- Ce type de filtre est constitué d'une enveloppe sous pression contenant une ou plusieurs cartouches filtrantes destinées à retenir les impuretés.
- Les finesses de filtration sont variables, le plus souvent de 5 à 80 microns, selon la texture du matériau qui constitue la cartouche.
- Les cartouches doivent être remplacées régulièrement, en fonction de leur état d'encrassement qui font augmenter la perte de charge.

IV.4. Filtration

Filtres à charbon actif

- ✿ Ils ont le pouvoir de retenir à leur surface les substances dissoutes et les molécules organiques qui donnent à l'eau des odeurs et des saveurs désagréables.
- ✿ Le charbon actif se présente sous forme de poudre ou de grains :
 - Sous forme de poudre, il est utilisé dans des cartouches (filtres à cartouches) .
 - Sous forme de grains, il est utilisé dans des filtres classiques lavables (type filtre à sable).
- ✿ Lorsque la limite de capacité de filtration est atteinte, la cartouche ou la masse de charbon actif doit être remplacée.

IV.4. Filtration

Filtres bicouches et multicouches

- ❖ Dans les filtres **bicouches**, l'eau traverse d'abord l'antracite puis le sable. Ces filtres sont plus compacts et présentent un taux de filtration supérieur aux filtres formés d'une seule couche.
- ❖ Dans les filtres **multicouches** l'eau traverse d'abord l'antracite puis le sable et finalement le grenat ou l'ilménite. La densité de ces matériaux est croissante afin d'assurer un reclassement automatique des médias lors des lavages.

IV.4. Filtration

- ➔ Peu importe le type de filtre retenu, les équipements suivants sont exigés pour chaque filtre :
 - Un débit mètre avec totalisateur du débit;
 - Un dispositif de mesure de perte de charge;
 - Un système de contrôle de débit à la sortie de chaque filtre;
- ➔ Des robinets d'échantillonnage pour l'eau brute et l'eau filtrée;
- ➔ Un turbidimètre en continu sur chaque filtre avec enregistreur et alarme.

IV.4. Filtration

IV.4.5. Mécanismes de filtration

- 1- Le transport (capture):** il s'agit de la rétention des particules plus grosses que la maille du filtre;
- 2- La fixation :** Les mécanismes de fixation font que la particule adhère à la surface du filtre;
- 3- Le détachement :** Sous l'action des mécanismes précédents, il se produit une diminution de l'espace entre les parois du matériau recouvertes de particules déjà déposées. Les dépôts déjà retenus peuvent se détacher partiellement et être entraînés plus avant dans le matériau filtrant ou même dans le filtrat.

IV.4. Filtration

IV.4.6. Loi générale de la filtration

- La filtration étant l'écoulement d'un liquide dans un milieu poreux, sa vitesse est calculée par la loi de Darcy :

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta H} = \frac{1}{R\mu} \frac{\Delta P}{\Delta H}$$

Où

V : Vitesse de filtration;

ΔP : Perte de charge à travers la couche filtrante;

ΔH : Hauteur de filtre;

μ : Viscosité dynamique de l'eau;

R : Résistance à la filtration de la couche filtrante.

K : Perméabilité de la couche filtrante;

IV.4. Filtration

μ : Viscosité dynamique, exprimée en kg / (m.s)

- Dans un écoulement fluide, la viscosité dynamique exprime une caractéristique du frottement entre 2 couches du fluide.
- C'est une expression de la force à exercer pour déplacer les particules fluides les unes par rapport aux autres, d'où l'expression de la force de frottement.



IV.4. Filtration

ΔP : Perte de charge

- Lors de la filtration, il y a une résistance au passage du liquide liée entre autres à la porosité du milieu et à la viscosité. Cette résistance se traduit par une perte de charge (ΔP) d'autant plus élevée que l'épaisseur du gâteau est importante ou que la vitesse du liquide est importante.
- En supposant que le processus de filtration est semblable à l'écoulement d'un fluide à travers d'innombrables petits tubes verticaux, la perte de charge est exprimée comme suite (à l'aide de l'équation de Darcy-Weisbach) : $H_L = f LV^2 / D2g$

IV.4. Filtration

$$H_L = f L V^2 / D 2g$$

Où:

H_L : perte de charge à travers un tube de longueur L

V : vitesse moyenne d'écoulement du liquide dans le tube

D : diamètre du tube

f : coefficient de friction

g : accélération due à la pesanteur

IV.4. Filtration

IV.4.7. Choix de type de filtration

Le choix entre les divers types de filtration dépend de plusieurs critères:

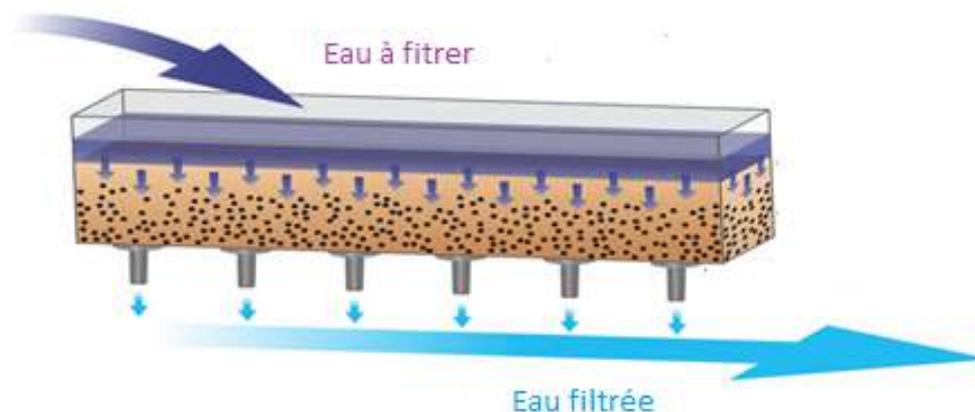
- ✓ Caractéristiques du liquide à filtrer, de ses impuretés et de leur évolution dans le temps;
- ✓ La possibilité d'un lavage aisé, efficace et économique est importante pour une meilleure qualité de filtration. Cette qualité ne se conserve dans le temps que si le lavage permet de maintenir toujours intact le matériau filtrant;
- ✓ Qualité du filtrat à obtenir;
- ✓ Conditions générales d'installation...

IV.4. Filtration

IV.4.8. Types de filtration

✚ **Filtration sur lit de sable (lit filtrant)** est la méthode la plus répandue où une couche de sable calibré retient les particules et laisse passer l'eau filtrée.

- La filtration sur lit de sable est efficace, simple et peu coûteuse en raison des énormes volumes d'eau à filtrer.



IV.4. Filtration

IV.4.8. Types de filtration

Filtration sur support

Le support de la filtration peut être: une toile métallique, un tissu synthétique ou une membrane avec des pores très fins.

- Dans ce type de filtration, il y a formation d'une couche de particules récupérable (gâteau) du fait que la taille des pores est inférieure à la taille des particules du gâteau.

IV.4. Filtration

IV.4.8. Types de filtration

✚ **Filtration sur membranes** est de plus en plus fréquemment utilisée, mais elle reste encore onéreuse.

- Elle est fondée sur l'utilisation de membranes de faible épaisseur, comportant des pores réguliers de très petites dimensions (**ultrafiltration, microfiltration et nanofiltration**).

- Ces membranes, sortes de barrières physiques, peuvent être d'origine organique ou minérale.

IV.4. Filtration

Microfiltration

- ❖ C'est une méthode de séparation membranaire utilisée pour séparer des particules en suspension telles que les microparticules, les macromolécules, les micro-organismes et quelques virus et les colloïdes.
- ❖ La taille de ces matières varie entre 10^4 - 10^2 nm.
- ❖ La microfiltration n'est pas fondamentalement différente de l'ultrafiltration ou de la nanofiltration, si ce n'est qu'elle retient des matières de tailles différentes de ces dernières.

IV.4. Filtration

Ultrafiltration

- ❖ L'ultrafiltration est utilisée pour enlever des particules flottantes, des colloïdes, bactéries ou autres virus dont la taille est entre 1 et 100 nm.
- ❖ Il y a trois types de membranes:
 - **Membranes en spirale**, les moins chères mais plus sensible à la pollution.
 - **Membranes tubulaires / en forme de pailles**, les membranes les plus utilisées par leur rapport coût/efficacité.
 - **Membranes en céramique**, plus chère mais extrêmement résistant aux pollutions lourdes.

IV.4. Filtration

Nanofiltration

- ❖ La technique de nanofiltration est principalement utilisée pour enlever les ions (particules dissoutes) tels que les métaux lourds (adoucissement de l'eau).
- ❖ C'est une méthode de séparation membranaire qui permet l'arrêt sélectif des molécules dont la taille est nanométrique.
- ❖ C'est un procédé baro-membranaire car le transfert a lieu dans une membrane poreuse sous l'effet de la pression qui peut aller de 3 à 20 bars.



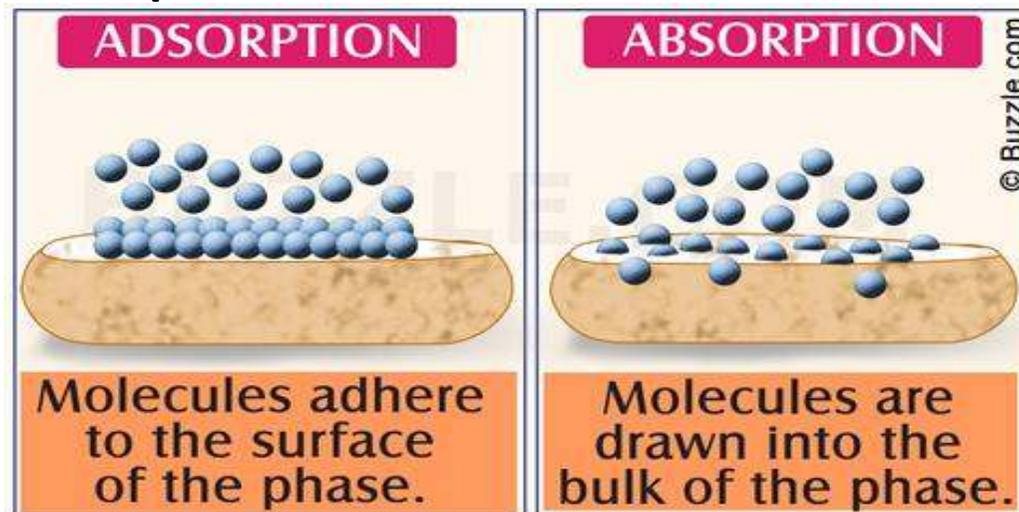
Ultrafiltration

IV. Procédés physico-chimiques

IV.5. Adsorption

L'**adsorption** est un phénomène physico-chimique de fixation de molécules sur la surface d'un solide.

Elle est utilisée pour "récupérer" des molécules indésirables de ce fluide (liquides ou gazeuses) dispersées dans un solvant.

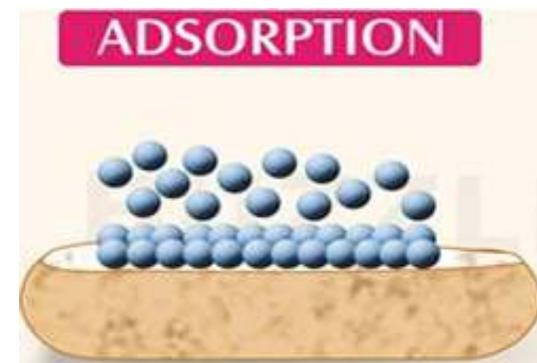


IV. Procédés physico-chimiques

IV.5. Adsorption

✚ L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de **fixer à leur surface** des ions ou des molécules (gaz, métaux, molécules organiques...) d'une manière plus ou moins réversible.

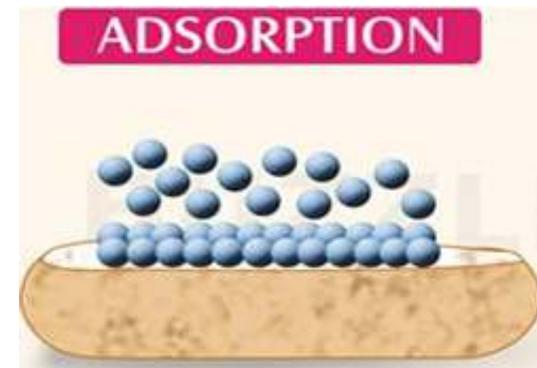
✚ Le terme surface correspond à la totalité de la surface du solide, c'est-à-dire surface géométrique pour un solide non poreux, à laquelle s'ajoute la surface interne des pores accessible aux molécules dans le cas d'un matériau poreux.



IV. Procédés physico-chimiques

IV.5. Adsorption

✚ Le polluant peut s'adsorber non seulement parce qu'il est attiré par le solide (par exemple pour former une liaison physique ou une interaction chimique), mais aussi parce que la solution peut le « rejeter » en raison de son hydrophobicité (dans le cas d'un polluant organique).

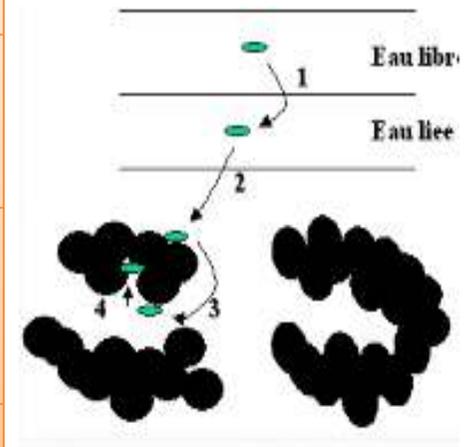


IV.5. Adsorption

V.5.1. Comment l'adsorption a-t-elle lieu ?

Il s'agit d'un transfert de particules (**adsorbats**) d'une phase liquide vers une phase solide (**adsorbant**) qui retient ces particules à sa surface. L'adsorption peut être décomposée en quatre étapes:

Etape 1	Transfert de la particule	Très rapide
Etape 2	Déplacement de l'eau liée jusqu'à être en contact de l'adsorbant	Rapide
Etape 3	Diffusion à l'intérieur de l'adsorbant sous l'influence du gradient de concentration.	Lente
Etape 4	Adsorption par les micropores de l'adsorbant	Très rapide



IV.5. Adsorption

V.5.2. Système ternaire

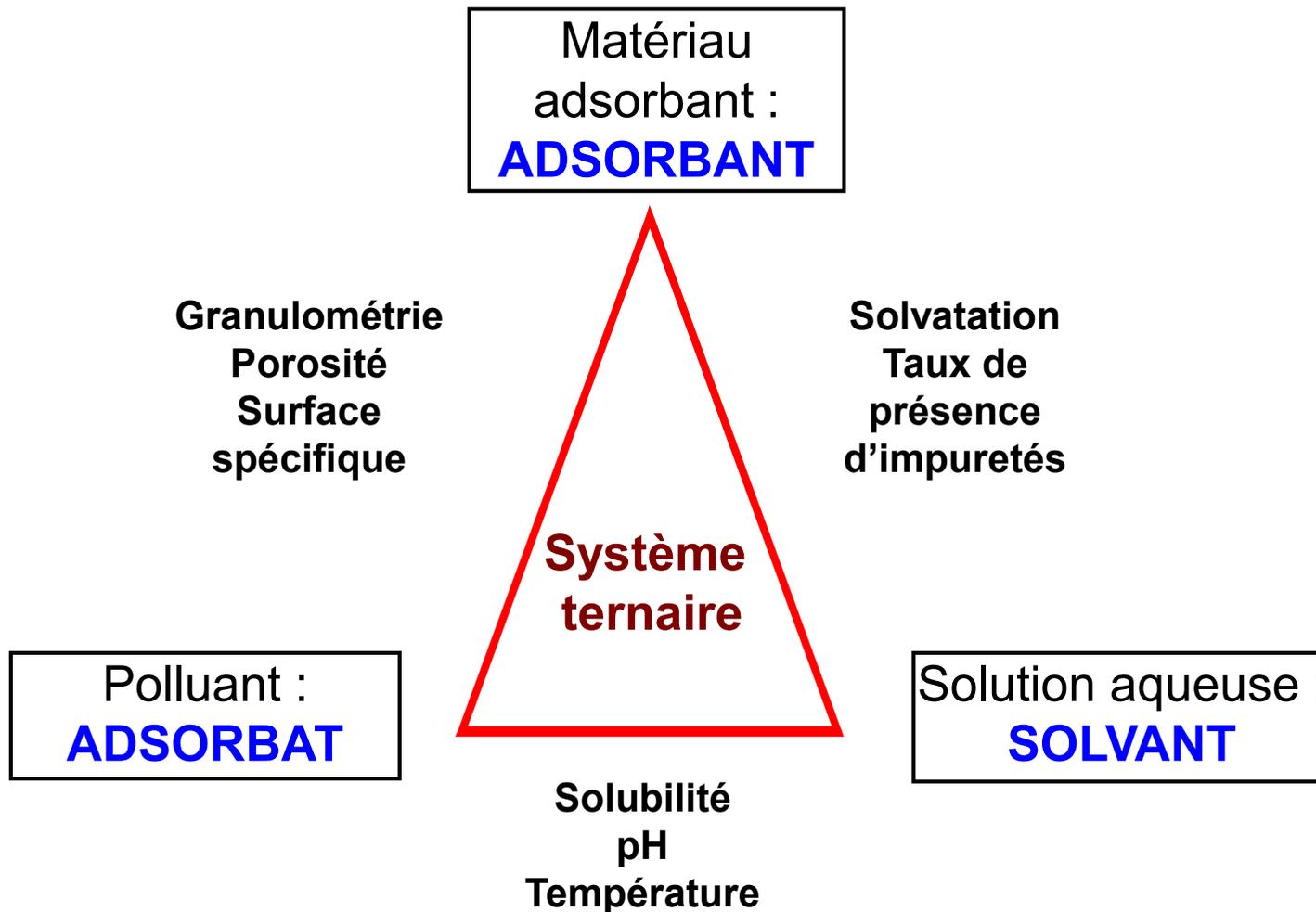
Adsorbant / Adsorbant / Solvant

✓ L'efficacité de la technique d'adsorption dépend non seulement des caractéristiques de l'adsorbant, mais aussi des différentes interactions existant entre :

- L'adsorbant et le polluant,
- L'adsorbant et le solvant,
- L'adsorbant et le solvant,

C'est ce qui est nommé: **Système ternaire**, où chaque composant possède ses caractéristiques propres.

IV.5. Adsorption



Caractéristiques et interactions à prendre en compte dans un système ternaire adsorbant/adsorbat/solvant

IV.5. Adsorption

- ✓ Le niveau d'activité de l'adsorption est basé sur la température, la concentration de la substance dans l'eau et sa polarité.
- ✓ L'adsorption des composés ionisés est faible.
- ✓ Une substance polaire (soluble dans l'eau) ne peut pas ou est très mal supprimée par le charbon actif (type d'adsorbant) alors qu'une substance non polaire peut être totalement supprimée par ce dernier.

IV.5. Adsorption

V.5.3. Capacité d'adsorption

La capacité d'adsorption d'un adsorbat dépend essentiellement de:

- ✚ La **surface développée** ou **surface spécifique** du matériau (exprimée en $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$):
 - Certains solides dans les milieux naturels (**argiles**, **silice...**) possèdent des surfaces spécifiques élevées variables avec l'état physicochimique du milieu aqueux (pH, nature des cations liés..).
 - Les adsorbants industriels (essentiellement les **charbons actifs**) développent des surfaces spécifiques bien supérieures à celles des adsorbants naturels (600 à environ 2 500 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).

IV.5. Adsorption

V.5.3. Capacité d'adsorption

- ✚ De la **nature de la liaison adsorbat-adsorbant**, c'est-à-dire l'interaction entre les sites d'adsorption et la partie de la molécule en contact avec la surface.
- ✚ Du **temps de contact** entre le solide adsorbant et les solutés : c'est le temps fourni pour permettre aux polluants de migrer jusqu'à la surface de milieu adsorbant.

IV.5. Adsorption

V.5.3. Capacité d'adsorption

✚ De la masse adsorbée de polluant par unité de masse d'adsorbant qui dépend de la concentration du polluant en phase aqueuse. En équilibre, elle peut être exprimée par la loi de Freundlich :

$$X/M = K.C_e^{1/n} \quad \text{où :}$$

X/m : Masse fixée de polluant par unité de masse de l'adsorbant

C_e : Concentration résiduelle du polluant dans le solvant

K et **n** : Constantes du couple adsorbat/adsorbant pour une température donnée maintenue constante pendant l'expérience.

IV.5. Adsorption

V.5.4. Charbon actif

- Le principal adsorbant utilisé est le charbon actif, obtenu à partir de matières organiques (bois, tourbe) carbonisées, puis activées.
- Il possède une grande surface d'adsorption d'environ $900\text{m}^2/\text{g}$ et peut être régénéré (par désorption).



IV.5. Adsorption

V.5.4. Charbon actif

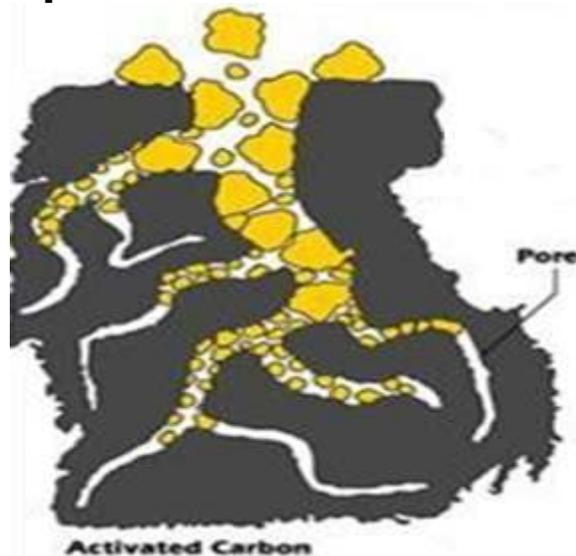
- Le charbon actif peut être obtenu soit sous forme de poudre (avec des pores de quelques μm de dimension), soit sous forme de grains.
- Pour le traitement de l'eau, on utilise en général du charbon actif en grains, en raison des possibilités de réactivation.



IV.5. Adsorption

V.5.4. Charbon actif

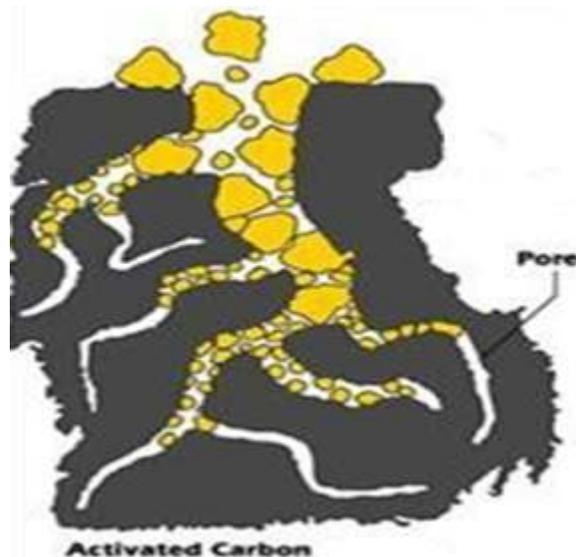
- ✿ L'adsorption sur charbon actif est destinée à traiter des matières organiques réfractaires, ne se trouvant pas en quantité trop importante, car cela saturerait trop rapidement les surfaces adsorbantes et nécessiterait une régénération coûteuse et fréquente.



IV.5. Adsorption

V.5.4. Charbon actif

- L'adsorption sur charbon actif intervient généralement au niveau tertiaire dans les chaînes de traitement des eaux (pour l'affinage), ou pour extraire des métaux lourds d'eaux résiduaires industrielles.



IV. Procédés physico-chimiques

IV.6. Précipitation

- ✚ La précipitation chimique est la technologie la plus courante pour retirer les métaux dissous (ioniques) des solutions.
- ✚ Ces métaux sont convertis en une forme insoluble (particule) par la réaction chimique se produisant entre les composés des métaux solubles et le **réactif précipitant**.

IV. Procédés physico-chimiques

IV.6. Précipitation

- ✚ Une méthode de mélange rapide est souhaitable pour disperser ce réactif précipitant dans la totalité du volume d'eau usée à traiter (utilisation des agitateurs).
- ✚ Par la suite, un mélange lent est nécessaire pour tirer pleinement profit des précipitants chimiques appliqués.
- ✚ L'avantage principal de la précipitation chimique est la modicité relative des investissements requis pour les bassins utilisés.

IV. Procédés physico-chimiques

IV.6. Précipitation

- ✚ En traitement des eaux, les précipitations chimiques sont principalement utilisées pour éliminer par insolubilisation un ou plusieurs composés minéraux qui gênent l'usage de l'eau.
- ✚ Elles regroupent des procédés basés sur l'application de la **loi d'action de masse** qui permet de définir l'équilibre d'un système réactionnel.

IV.6. Précipitation

IV.6.1. Loi d'action de masse

Un système réactionnel, soumis à une réaction chimique ayant atteint un équilibre, est caractérisé par le fait que les concentrations des réactifs de départ et des produits formés sont reliées par une expression dont la valeur est constante à une température donnée:

Constante d'équilibre de Guldberg et Waage

(k_c)

IV.6. Précipitation

IV.6.1. Loi d'action de masse

Soit la réaction : $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$ (1)

La loi d'action de masses dit que la vitesse d'une réaction est proportionnelle aux concentrations de chacune des substances réactantes.

La vitesse des réactions se produisant de la « gauche vers la droite » et de la « droite vers la gauche » sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{V1} &= K1[A]^a.[B]^b \\ \text{et } \mathbf{V2} &= K2[C]^c.[D]^d \end{aligned}$$

IV.6. Précipitation

IV.6.1. Loi d'action de masse

L'équilibre de cette réaction correspond à une égalité des vitesses V_1 et V_2 . Il résulte :

$$K_1[A]^a.[B]^b = K_2[C]^c.[D]^d$$

$$[C]^c.[D]^d / [A]^a.[B]^b = K_2/K_1 = K_c$$

K_c la constante d'équilibre de la réaction (1).

IV.6. Précipitation

IV.6.2. Application de la précipitation

La précipitation est une des fins du traitement physico-chimique qui peut s'appliquer aux eaux contenant :

- Des métaux précipitables sous forme d'hydroxydes métalliques (la méthode plus utilisée);
- Des composés précipitables par le calcium (sulfites, phosphates, sulfates...);
- Des composés précipitables sous forme de sels insolubles de fer ou complexables (sulfure, phosphate...);
- Des métaux et des sels toxiques ou indésirables (fluorures, sulfates, phosphates...).

IV.6. Précipitation

IV.6. 3. Précipitants utilisés

✚ La soude ou l'hydroxyde de sodium (NaOH) et la chaux éteinte ou l'hydroxyde de calcium (de formule brute $\text{Ca}(\text{OH})_2$) sont utilisés couramment en raison de leur coût faible et leur capacité de former des précipités compacts .

✚ Elles provoquent la précipitation des métaux présents dans les effluents sous forme d'hydroxydes métalliques.



Soude



Chaux

IV.6. Précipitation

Inconvénients:

- ➔ Les volumes de boues générés par la précipitation sous forme d'hydroxydes sont importants et les étapes de séchage de ces boues sont coûteuses;
- ➔ La chaux, moins coûteuse, mais peut poser des problèmes de colmatage au niveau des installations industrielles (tuyauterie, filtres...)..

IV.6. Précipitation

✚ Dans une optique de recherche de la meilleure technique disponible pour le système de dépollution des eaux et l'optimisation des conditions de la précipitation, plusieurs réactifs pouvant être utilisés pour précipiter les métaux lourds dont les plus utilisés:

IV.6. Précipitation

Précipitants (familles et exp de composés)	Avantages	Inconvénients
<p>Carbonates (carbonate de sodium Na_2CO_3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement moins coûteux qu'à la soude 	<ul style="list-style-type: none"> • Précipitation généralement incomplète
<p>Borohydrures (Borohydrure de sodium NaBH_4)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Boues compactes et facilement récupérables 	<ul style="list-style-type: none"> • Surconsommation de réactifs dans certains cas
<p>Sels ferreux (sulfate de fer FeSO_4)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Précipités compacts et facilement récupérables 	
<p>Composés soufrés inorganiques (sulfure d'hydrogène H_2S)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Précipités très peu solubles 	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes de toxicité • Coût élevé • Dégagement d'odeurs • Difficultés de séchage des boues
<p>TMT (Solution renfermant de l'organosulfure et du sel trisodique)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de dégagement d'odeurs lors de son emploi • Efficace pour des métaux complexes 	<ul style="list-style-type: none"> • Cout élevé • Pas de réaction avec certains métaux