

Cours traitement et épuration **des eaux**

Chapitre I

Généralité et normes

I.1 Introduction

L'eau absolument pure n'existe pas dans la nature. Les eaux non traitées, dites brutes contiennent de nombreuses substances d'origine naturelle ou provenant de l'activité humaine. Les substances présentes dans les eaux naturelles sont soit **en solution (dissoutes)**, soit en **suspension colloïdale**, soit en **suspension plus ou moins fine**.

Au cours du cycle de l'eau dans la nature, l'eau se charge de différentes substances telles que les gaz et les fumées dissous, des sels minéraux, des substances organiques et des organismes vivants (algues, bactéries,...). Les polluants (atmosphérique, des sols et des cours d'eau) contribuent par ailleurs à augmenter la quantité de substances présentes dans l'eau naturelle.

La composition d'une eau naturelle, va varier selon le lieu où l'on se trouve. De plus, les conditions météoriques d'une région donnée vont influencer sur la qualité de son eau (concentrations plus élevées par temps sec, eaux plus boueuses par temps de pluie,...). La nature de l'eau peut ainsi varier de façon saisonnière. Cela signifie que l'eau d'alimentation ne sera pas la même d'un endroit à l'autre même après avoir été rendue potable.

I.2. Différents types des eaux naturelles

I.2.1. Eaux souterraines

Les eaux souterraines, ce sont des eaux qui proviennent de nappes souterraines plus ou moins profondes et sont captées par forage ou par puits. Elles sont en général pauvres en oxygène et en matières organiques. Dans les terrains géologiques anciens (granit, grés, schistes), la minéralisation est faible ; par contre dans les terrains sédimentaires (calcaire), la minéralisation est importante. Ces eaux souterraines ont une composition stable dans le temps, peu influencée par la pollution de la surface terrestre. Sauf pour certaines nappes phréatiques polluées, elles sont souvent proches des normes de qualité, mais peuvent contenir en fonction de la nature du terrain de stockage des éléments à taux dépassant les normes.

I.2.2. Eaux de surface

Les eaux de superficielles (surface), ce sont des eaux qui se trouvent à la surface terrestre peuvent être des eaux courantes (rivières ou fleuves) ou des eaux stagnantes (lacs et retenues naturels ou artificiels).

Ces sont souvent riches en matières organiques et en matière en suspension. Leur composition est plus variable et elles sont sensibles aux pollutions du milieu extérieur.

I.3. Paramètres organoleptiques des eaux naturelles

Il s'agit de la saveur, de la couleur, de l'odeur et de la turbidité (inverse de la transparence) de l'eau. Ils n'ont pas de signification sanitaire mais par leur dégradation peuvent indiquer une

pollution ou un mauvais fonctionnement des installations de traitement ou de distribution. Ils permettent au consommateur de porter un jugement succinct sur la qualité de l'eau.

I.4. Différents états des constituants de l'eau

L'eau naturelle contient de nombreux composés minéraux ou organiques sous différents états : dissous en suspensions grossières sédimentables et en suspension colloïdale. Ces dernières substances sont beaucoup plus difficiles à déstabiliser et donc à éliminer.

I.4.1. Etat dissous

Dans une solution vraie, le corps dissous se divise dans tout le solvant et se forme avec lui une phase homogène. La taille des particules (molécules ou ions) est **généralement inférieure à un nanomètre**.

Une telle solution est limpide et traverse les filtres sans séparation.

I.4.2. Etats dispersé ou matières en suspension (MES)

L'état dispersé contient un ensemble de particule gênant le passage de la lumière dans la phase liquide.

Une dispersion est retenue par les filtres. Les M.E.S sont les particules solides de densité supérieure à celle de l'eau. Elles sont très divers tant par leur nature que par les dimensions. Elles proviennent, soit de la dégradation des végétaux et d'animaux soit de l'arrachement des sables ou des argiles causées par les eaux de ruissellement. Généralement, la proportion minérale est dominante dans les eaux de surface, surtout en période de crue. Parmi les M.E.S, on peut citer :

a) Les matières en suspensions décantables

Elles sont soumises aux lois de pesanteur et ont la propriété de sédimentation dans les milieux naturels ou décantation dans les ouvrages des stations de traitement (décanteurs et débourbeurs). Ces M.E.S décantent dès que l'eau n'est plus en mouvement ou faiblement agitée, **la loi de Stokes est alors applicable**. Cela concerne les particules de **dimension $\geq 1\mu\text{m}$** .

b) Les colloïdales

Un système colloïdal contient des particules constituées soit de particules élémentaires, soit de macromolécules. Ces particules portent une charge négative sur leur surface, dans l'eau naturelle, ces charges induisent des forces de répulsion entre les particules et sont un élément de stabilisation de l'état dispersé qui les empêche de s'agglomérer. Les colloïdes ne sont pas sédimentables, ils se déplacent sous l'action d'un champ électrique. Ce sont des M.E.S qui ont des **dimensions $< 1\mu\text{m}$** , la loi de Stokes est inapplicable.

I.5. Caractéristiques des eaux de consommation

Les eaux de consommation encore appelées eaux potables peuvent se présenter sous deux formes : l'**eau du robinet** et les **eaux minérales**.

Toutes les eaux de consommation doivent répondre aux mêmes normes de qualité, à l'exception des eaux minérales naturelles qui peuvent présenter des caractéristiques particulières. Elles permettent les usages domestiques de l'eau (cuisine, hygiène, arrosage...).

I.6. Normes de qualités des eaux destinées à la consommation

La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture.

I.6.1. Définition d'une norme :

C'est la concentration maximale admissible (CMA) concernant les différents paramètres de pollution (physico chimique et microbiologique) des eaux destinées à la consommation humaine.

Ces CMA sont calculées sur la base de travaux médicaux (OMS) qui déterminent la quantité de telle ou telle substance qu'un individu peut absorber sans danger quotidiennement tout au long de sa vie.

I.6.2. Directive O.M.S :

C'est une directive sans valeur impérative ; Elle sert de guide pour la législation des pays. Elle est donc adaptée dans chaque pays en fonction de leur état sanitaire et leur situation économique et selon la réglementation en vigueur.

Les normes portent sur :

a)La qualité microbiologique : l'eau ne doit contenir ni parasite, ni virus, ni pathogène.

b) la qualité chimique : les substances chimiques autres que les sels minéraux font l'objet de normes très sévères. Ces substances sont dites «indésirables» ou «toxiques». Elles sont recherchées à l'état de trace (millionième de gramme par litre). Ces normes sont établies sur la base d'une consommation journalière normale, pendant toute la vie.

Tableau I.1 : Concentrations limites dans les eaux potables

Corps chimiques	Concentration maximale (en milligrammes par litre)
Composés phénoliques	0
Chrome hexavalent	0
Cyanures	0
Sélénium	0,05
Arsenic et composés	0,05 (d'arsenic)
Plomb	0,1
Fer et manganèse (ensemble)	0,3 (dont 0,2 de fer)
Fluorures	1 (de fluor)
Cuivre	1
Zinc	5
Nitrates	10 (d'azote)
Magnésium et composés	125 (de magnésium)
Chlorures	250 (de chlore)
Sulfates	250 (d'ion SO_4)

Critères souhaitables :

Ces critères se traduisent soit par des valeurs maximales ou minimales au-delà ou en deçà des quelles les eaux présentent des inconvénients, soit par des valeurs optimales.

- ❖ Température : optimale entre 9 et 12°C.
- ❖ Turbidité (matières solides fines en suspension) : se mesure par un nombre de gouttes d'un réactif approprié dans l'appareil de Dienert et Guillerd. Eviter de dépasser 25 à 30 gouttes.
- ❖ Couleur (due à des colloïdes en suspension) : se mesure de façon analogue, avec un réactif spécifique, définissant un indice n. Éviter de dépasser la valeur 20 pour n.

c) la qualité physique et gustative : l'eau doit être limpide, claire, aérée et ne doit présenter ni saveur ni odeur désagréable. Cependant, une eau qui ne satisfait pas pleinement à ces critères ne présente pas forcément de risque pour la santé.

I.7. Usages de l'eau et leur exigence

L'eau est utilisée en milieu urbain d'abord comme élément vital pour les besoins physiologiques, puis comme moyen de lavage, comme solvant pour divers besoins domestiques et publics, et enfin comme évacuateur de déchets. Dans une évaluation des besoins en eau des centres urbains, il faut opposer nettement les besoins domestiques, propres à l'individu et les besoins publics, correspondant à sa vie en société. Par suite des conditions de distribution, toute

l'eau fournie est potable, alors que certains besoins domestiques et publics n'exigent pas une eau de qualité aussi importante. Par contre, dans le cas de la consommation d'eau pour la boisson, une redoutable concurrence s'est instaurée dans maints pays développés entre eau potable et eau minérale.

a) Eau domestique

Aux besoins domestiques directs (100l/j/h) s'ajoutent donc des besoins d'au moins 200 l/j/h, soit un total de 300l/j/h, soit 110 m³/habitant/an environ. Ces besoins sont largement dépassés dans les grandes agglomérations et ils se répartissent en trois parts égales : celle des ménages, celle des commerces et des autres usagers collectifs, celle des services municipaux (les besoins domestiques et publics atteignent ainsi de 400 à 900 l/j/h). Cette quantité est répartie comme suit :

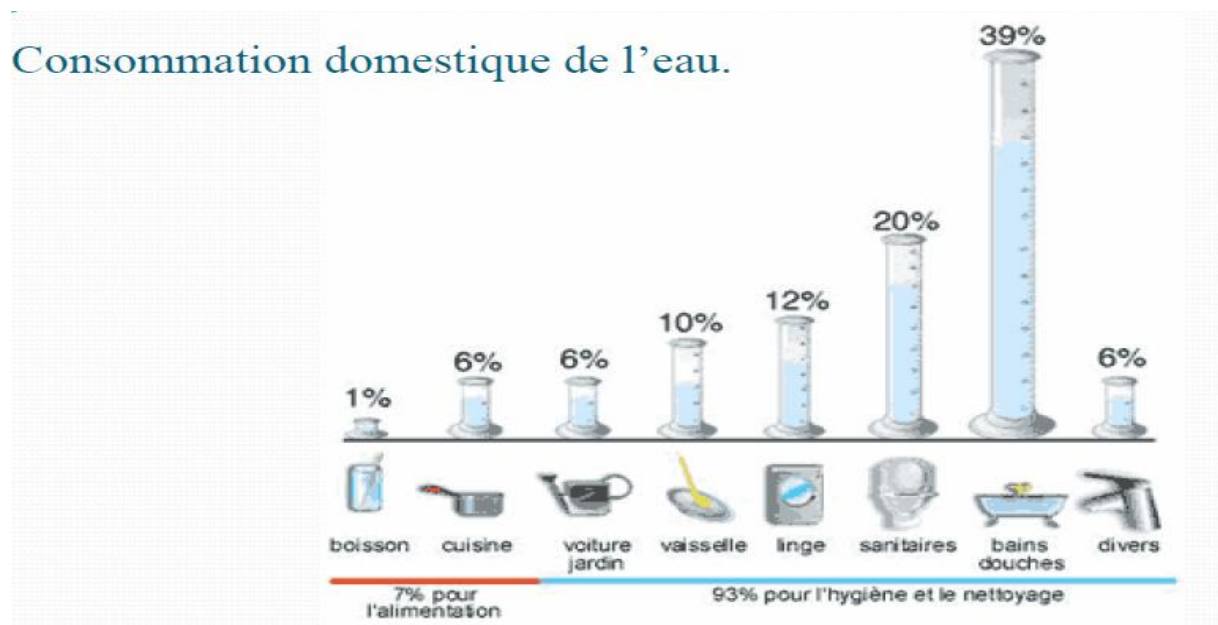


Figure I.1 Consommation domestique de l'eau

Ces eaux ne sont distribuées qu'après traitement, trois facteurs déterminent le choix d'un traitement :

- ✓ La quantité : La source doit couvrir la demande, en toute circonstance.
- ✓ La qualité : La qualité de l'eau brute dont on dispose doit être compatible avec la législation en vigueur.
- ✓ L'économie : Le coût d'investissement et de fonctionnement du procédé de traitement relatif à chacune des ressources disponibles est déterminant lors de la prise d'une décision.

Il faut signaler que les établissements distributeurs des eaux de consommation sont responsables de la conformité de ces eaux aux normes jusqu'à leurs arrivées au consommateur.

b) Eaux industrielles :

La qualité et la quantité des eaux utilisées dans l'industrie sont très variables, elles dépendent du type de l'entreprise productrice et de sa taille (voir tableau I.2). Une eau qui va entrer dans un cycle de refroidissement d'une chaudière est moins exigeante que l'eau utilisée dans l'industrie électronique.

Tableau I.2 : Principales utilisation industrielles de l'eau et sources d'eau possibles

Utilisation		Sources d'eau acceptables (souvent après un traitement adéquat)
Eau de fabrications nobles	<ul style="list-style-type: none"> - Agroalimentaire - Pharmacie - Papiers blancs - Textiles - Teintureries - Chimie 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau moyennement minéralisée - Eau potable - Eaux de forage - Eaux de surface peu polluées
Eau déminéralisée	<ul style="list-style-type: none"> - Pharmacie - Chaudières - Préparation des bains divers - Rincages en galvanoplastie - Eau ultra pure - Dessalement par osmose inverse 	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de forage - Eaux de surface peu polluées
Eau de refroidissement en circuit semi-ouvert	<ul style="list-style-type: none"> - Réfrigération atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de surface pauvres en Cl⁻ - Effluents après traitement tertiaire
Eau de refroidissement en circuit ouvert	<ul style="list-style-type: none"> - Condenseurs et échangeurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de surface - Eaux de mer - Effluents après traitement
Eau de lavage de gaz ou produit de transport	<ul style="list-style-type: none"> - Lavage gaz métallurgique et incinération - Lavage charbon 	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de surface tamisées et prédécantées - Effluents secondaires₂₆

Chapitre II

Traitement des eaux

II.1 Introduction

La plupart du temps, l'eau prélevée dans le milieu naturel n'est pas directement consommable. Elle est chargée de sables, de limons, de débris de matières organiques ou minérales, de substances colorantes dissoutes.

Pour rendre l'eau potable, on applique des traitements qui s'ils peuvent varier suivant l'origine et la qualité de l'eau, obéissent tous au même principe : on élimine les matières contenues dans l'eau par étapes successives, jusqu'aux organismes microscopiques comme les virus et les microbes. Toutes ces étapes sont effectuées dans une usine de production d'eau potable. Ces procédés peuvent être résumés dans la figure ci-dessous.

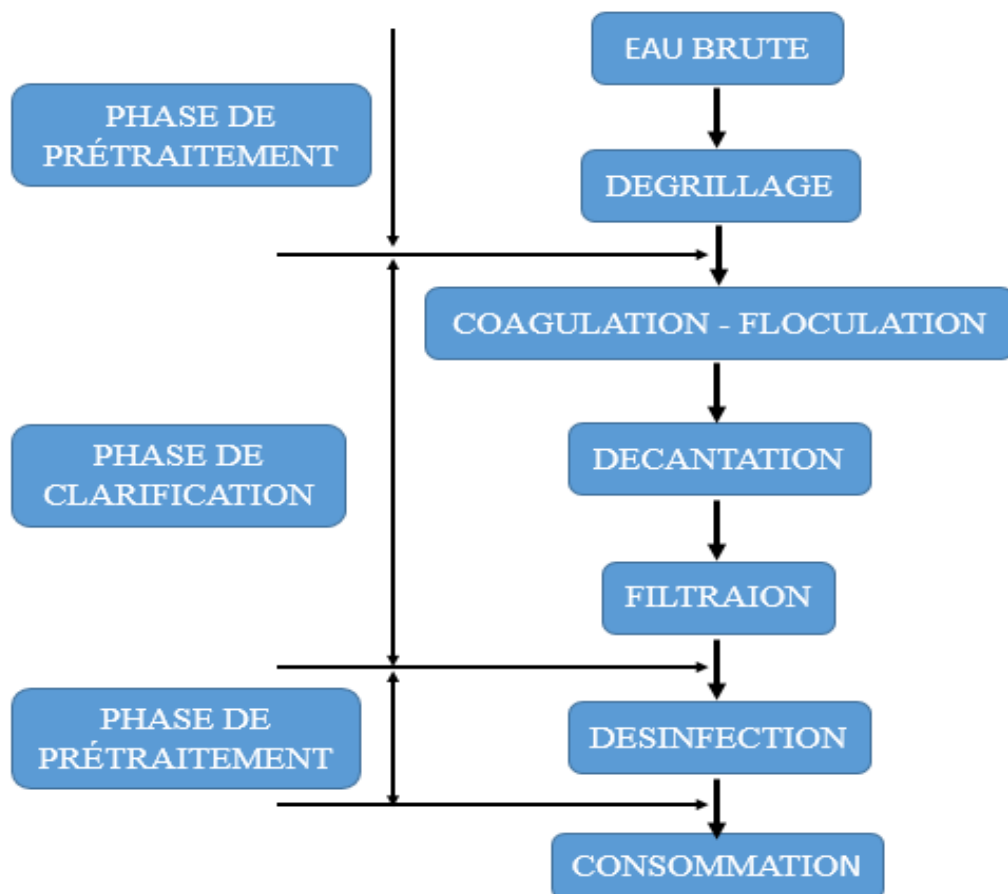
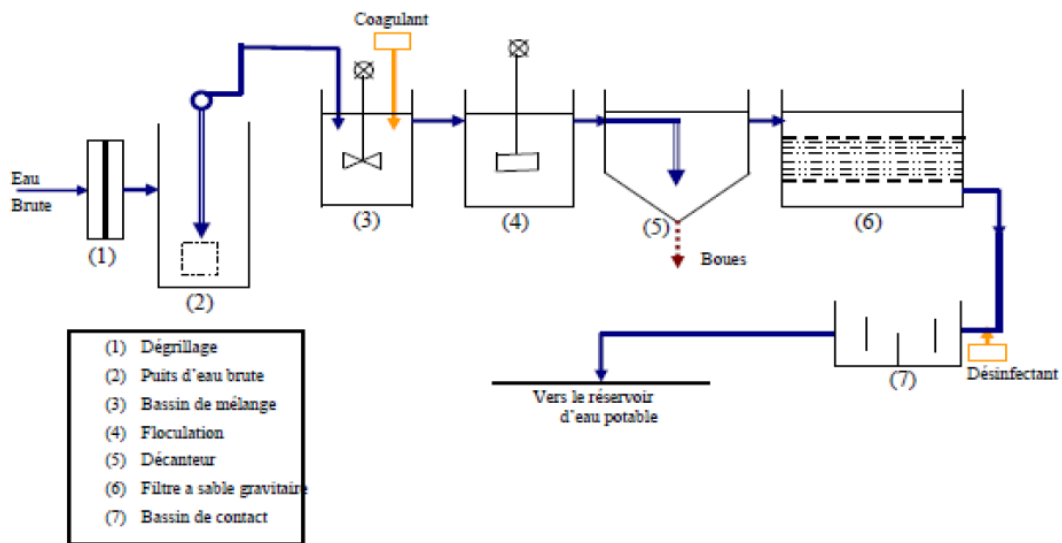


Figure II.1 Schéma type d'une station de traitement de l'eau



II.2 Le prétraitement

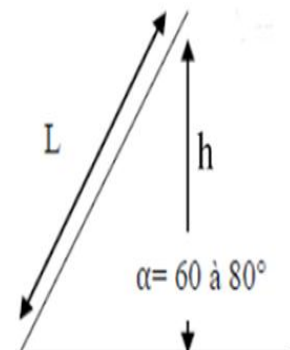
Ce sont des procédés physiques. Une eau, avant d'être traitée, doit être débarrassée de la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour les traitements ultérieurs. Dans le cas d'une eau potable, les prétraitements sont principalement le dégrillage, le tamisage et le déssablage ou le débouage.

II.2.1 Le captage de l'eau :

L'eau qui sert à la consommation est d'origine superficielle (rivières, lacs, fleuves, mer ...) ou souterraine (nappes phréatiques). Elle est pompée par forage ou prélevée directement en surface. Une station d'alerte contrôle la qualité de l'eau en amont du pompage et des périmètres de protection sont installés (clôture située autour du lieu de captage, contrôle des activités existantes sur les terrains alentours).

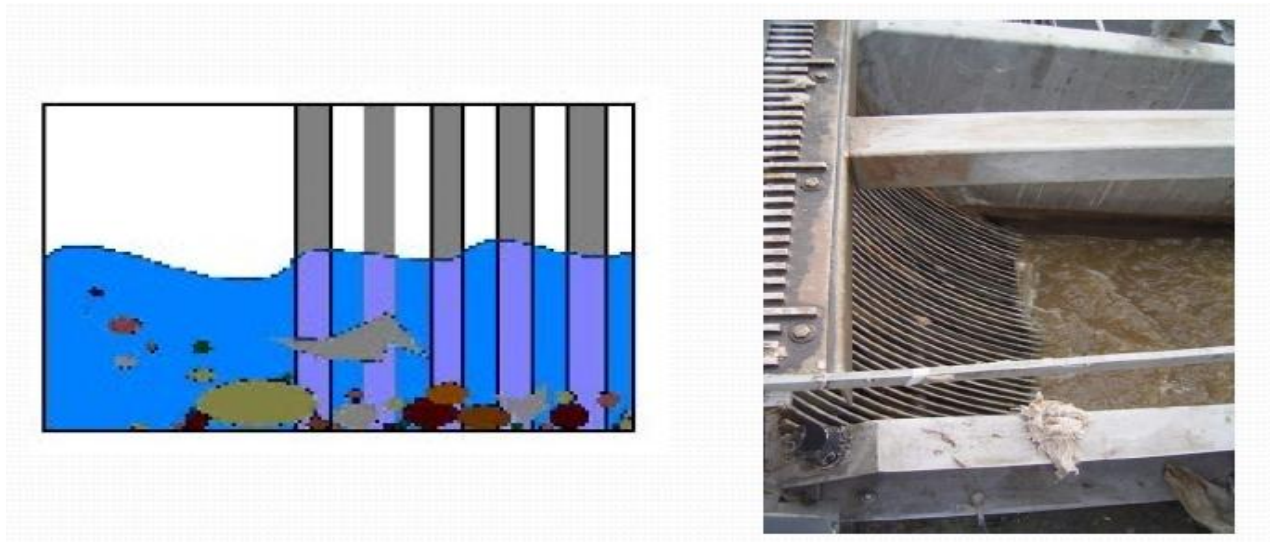
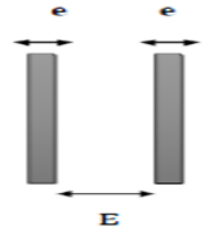
II.2.2 Le dégrillage :

Le dégrillage est le passage de l'eau à travers des barreaux plus ou moins espacés à l'entrée d'une station de traitement dont le but est la rétention des objets les plus volumineux tels que les poissons et d'autres animaux aquatiques, les herbages ainsi que les corps flottants afin de protéger les ouvrages aval de la station.



Selon l'espacement entre les barreaux, on peut distinguer 2 types de dégrillage :

- ✓ Pré dégrillage ou dégrillage grossier : $E = 5$ à 10 cm ; la grille est placée à l'endroit du captage de l'eau le nettoyage est manuel périodiquement.
- ✓ Dégrillage fin : $E = 1$ à 2 cm ; la grille est placée à l'entrée de la station, la grille se colmate rapidement et le nettoyage est automatisé avec un moteur.



II.3 Traitement de clarification :

II.3.1 La coagulation :

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à dire de faciliter leur agglomération. Les particules colloïdales (de diamètre compris entre $0,1$ micro et 1 nm) sont des particules très petites qui ne peuvent pas s'agglomérer naturellement.

TABLE 2.1 – Temps de liaison de plusieurs particules selon le diamètre

Diamètres des particules	Type de particules	Temps de liaison pour 1m d'eau
10 mm	Gravel	1 seconde
1 mm	Sable	10 secondes
0,1 mm	Sable fin	2 minutes
10 micron	Protozoaires, algues et argile	2 heures
1 micron	Bactéries, algues	8 jours
0,1 micron	Virus, colloïdes	2 ans
10 nm	Virus, colloïdes	20 ans
1 nm	Virus, colloïdes	200 ans

II.3.1.1. Origine des colloïdes :

Elles proviennent essentiellement de l'érosion des sols, la dissolution des substances minérales et de la décomposition des matières organiques. A cet apport naturel, s'ajoutent les eaux d'égouts domestiques, industriels ou agricoles.

II.3.1.2. Structure des colloïdes

Elles portent des charges négatives à leur surface ce qui attire les ions positifs en solution dans l'eau et forment la couche liée ou de STERN, qui attire ensuite des anions accompagnés d'une faible quantité de cations, c'est la couche diffuse ou de GOUY. Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'un accompagnant la particule lors de ces déplacements, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard (**Figure. II.2**).

On déduit que l'élimination des particules colloïdales s'effectue par l'annulation des forces de répulsion. Ainsi, on ajoute un produit chimique coagulant, par exemple, du chlorure ferrique **FeCl₃, 6H₂O** pour déstabiliser les particules et ainsi faciliter leur agglomération.

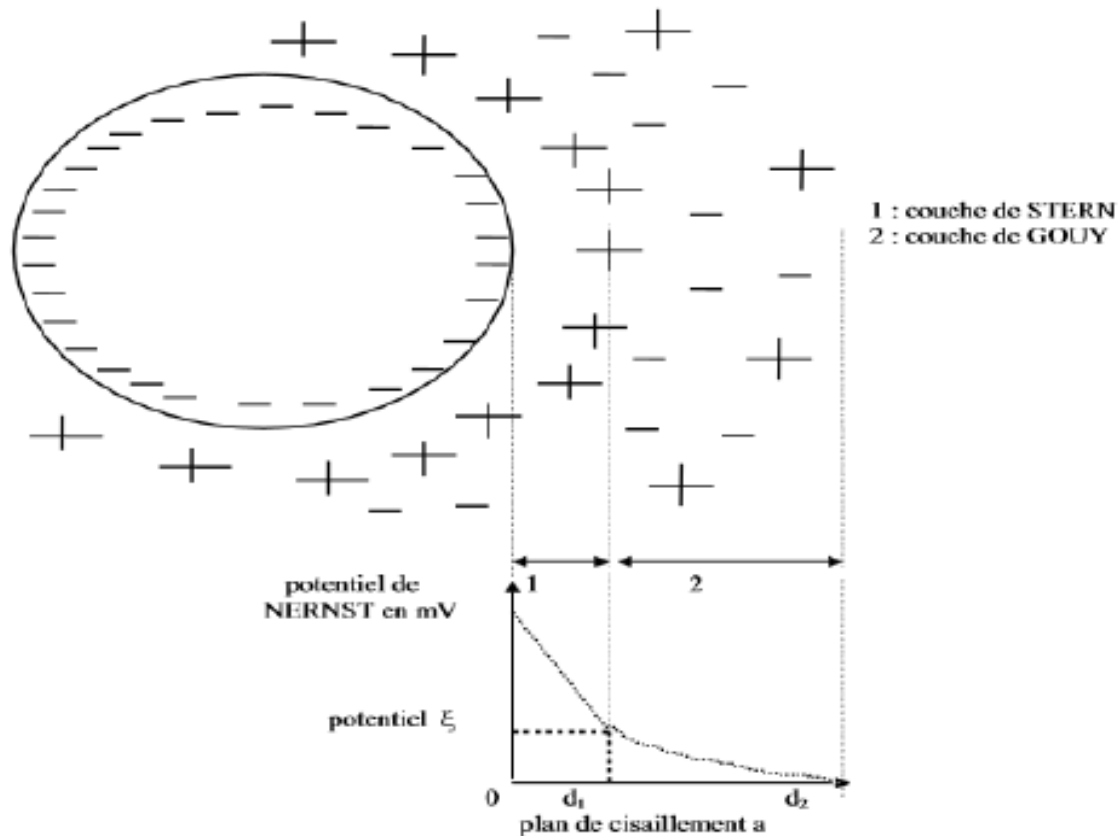


Figure. II.3 : Distribution du potentiel électrique autour d'un colloïde chargé

Il existe entre ces deux couches un potentiel électrostatique ou de NERNST, qui varie en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde. Dans la couche liée, le potentiel de NERNST décroît linéairement car les cations constitutifs sont empilés uniformément. En revanche, dans la couche de GOUY, le potentiel électrostatique varie de manière non linéaire, étant donné que la répartition ionique résulte d'un mélange aléatoire de cations et d'anions. La valeur du potentiel à la surface de la couche de NERNST est appelé potentiel zêta.

II.3.1.3. Elimination des colloïdes :

L'élimination des colloïdes passe par l'annulation du potentiel zêta afin d'annuler les forces de répulsion correspondant à deux phénomènes :

- absorption et neutralisation des charges des colloïdes
- emprisonnement des particules colloïdales dans un précipité : les cations trivalents métalliques (Al^{3+}) utilisés ont la particularité de s'hydrolyser au contact de l'eau et forment un hydroxyde métallique insoluble lorsqu'ils sont à pH neutre.

II.3.1.4. Coagulants utilisés

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et pour produire un floc sont des électrolytes minéraux à polycations. Les coagulants les plus répandus sont :

Table 2.2 Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules

Coagulant	Forme chimique
Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$	$18H_2O$
Aluminate de sodium	$NaAlO_2$
Chlorure ferrique	$FeCl_3, 6H_2O$
Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3, 9H_2O$
Sulfate ferreux	$FeSO_4, 7H_2O$
Sulfate de cuivre	$CuSO_4$

Les produits les plus utilisés pour la purification des eaux sont les sels d'aluminium et de fer qui libèrent des ions Al^{3+} et Fe^{3+} . Ces ions neutralisent la force de répulsion entre les particules colloïdales et favorisent ainsi la coagulation. Lorsqu'on additionne à l'eau les sels d'aluminium ou de fer, ces derniers réagissent avec l'alcalinité de l'eau et produisent des hydroxydes, $Al(OH)_3$, ou $Fe(OH)_3$, insolubles et formant un précipité.

L'efficacité de ces coagulants est directement liée à la valence des cations utilisés. Ainsi un ion divalent est jusqu'à 200 fois plus efficace et un trivalent jusqu'à 10000 fois plus efficace qu'un monovalent. La mise en solution d'un coagulant se déroule en deux étapes. Prenons l'exemple du sulfate d'aluminium :



- L'étape 1 est une phase d'hydrolyse. Des intermédiaires poly chargés positifs se forment.
Ils sont très efficaces pour neutraliser la charge des colloïdes. Il s'agit de la véritable forme coagulante qui déstabilise les particules chargées négativement.
- L'étape 2 permet la formation du précipité d' $Al(OH)_3$. Cette réaction dépend de l'agitation du milieu. Ce précipité est l'élément qui assure la coalescence des colloïdes déstabilisés : c'est la forme floculant.

II.3.2. La floculation :

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but

d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules grâce à l'agitation du fluide. Cela permet aux particules de s'agglomérer et de former des amas de plus en plus gros.

Leur masse élevée leur permet ensuite de se déposer plus rapidement dans le fond du bassin sous l'effet de la gravité. Cette phase préalable à la décantation consiste à favoriser l'agglomération des matières déstabilisées ou précipitées sous l'influence d'une agitation lente qu'on appelle : floc. Ce floc est assez fragile puisque les interactions qui le maintiennent sont des interactions de Van der Waals.

Cette phase peut être optimisée par l'ajout d'un adjuvant de floculation : le floculant. C'est une molécule organique, cationique et polymérique qui va favoriser les pontages entre les particules déstabilisées.

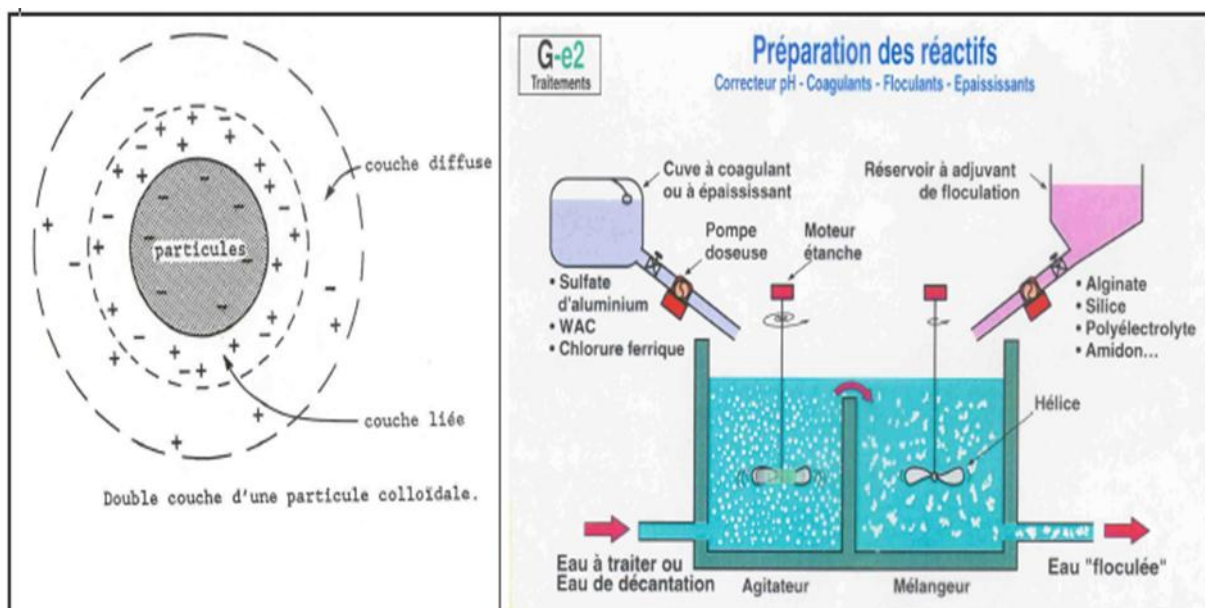


Figure II.2 : schéma de l'étape coagulation- floculation

II.3.3. Détermination de la dose de coagulant/floculant

Quelques soit la matière à coaguler ou à précipiter, la détermination de la dose optimale de coagulant/floculant se fait au laboratoire grâce à un Jar-test (**Figure. II.3**) :

- ✓ introduction de quantités croissantes de coagulant dans des jarres (6) contenant un litre d'eau à traiter et munie d'une hélice d'agitation
- ✓ agitation rapide pendant 3 minutes : phase de coagulation
- ✓ introduction éventuelle du floculant
- ✓ agitation lente pendant 10 minutes : phase de floculation
- ✓ arrêt de l'agitation et attente de 20 minutes : phase de décantation

- ✓ analyse des différents paramètres de la pollution sur le surnageant et détermination des rendements d'élimination de la pollution.



Figure II.4 : Essai Jar test

Les résultats sont appréciés visuellement ou par des mesures de turbidité. On choisit la jarre qui présente les meilleurs rendements, la dose optimale de coagulant, appelée taux de traitement, correspondant à la quantité de coagulant injecté pour un litre d'eau de la jarre sélectionnée. Exemple de courbe Turbidité = f (dose de coagulant) obtenue. La figure ci-après montre la dose optimale de coagulant à ajouter.

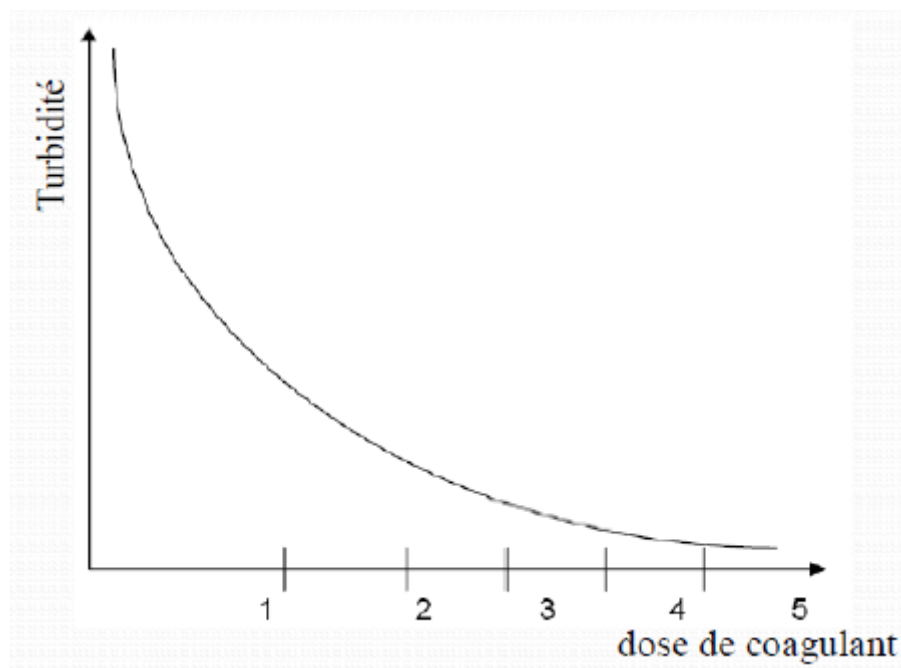


Figure II.5 : Turbidité en fonction de la dose du coagulant

II.3.4. Bassin de coagulation

Le bassin de coagulation est équipé d'un agitateur mécanique vertical actionné par un moteur il permet une agitation rapide pour un mélange homogène entre l'eau et le réactif le bassin généralement une section horizontale carrée avec une profondeur d'eau qui ne dépasse pas 3 à 4 m.

L'intensité de l'agitation est caractérisée par la valeur du gradient de vitesse (G) donné par la relation de camp mélangé dans le bassin (m^2)

$$G = \left(\frac{P}{\mu * V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

P : puissance d'agitation délivrée par le moteur

μ : viscosité dynamique de l'eau (10^{-3}) Kg/m.s)

V : volume d'eau

Exercice :

On considère un bassin de coagulation où une agitation rapide est réalisée en laboratoire, la valeur optimale de G est $560 s^{-1}$ et le temps d'agitation rapide 28 secondes.

Sachant que le débit d'eau traverse le bassin est $Q = 24 m^3/min$ et que la profondeur du bassin est $H = 2m$

- 1) Déterminer la dimension du bassin
- 2) Calculer la puissance dissipée dans l'eau par l'agitation.

II.4. La décantation

La décantation est la méthode de séparation gravitaire la plus fréquente de MES (Matière en suspension) et colloïdes (rassemblés sous forme de floc après l'étape de coagulation / floculation). Il s'agit d'un procédé de séparation solide/liquide basé sur la pesanteur (Figure II.6). Cette séparation est induite par réduction de la vitesse horizontale qui doit être inférieure à la vitesse verticale (de chute, de décantation ou ascensionnelle) afin de favoriser la sédimentation des particules dans un piège. Ces particules s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite clarifiée.

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.

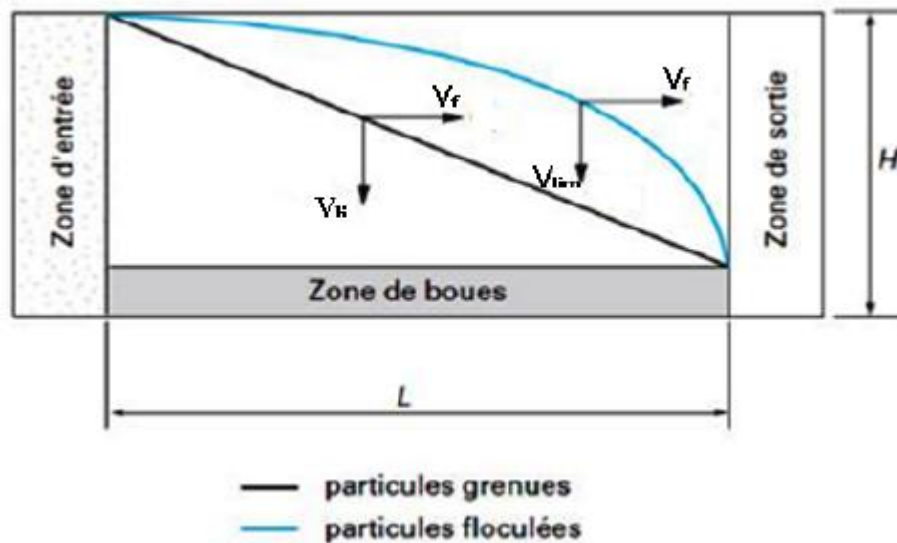


Figure II.6 : Principe de decantation des particules

II .4.1. Vitesse de chute de la particule :

L'équilibre de force sur une particule en mouvement par rapport à un fluide détermine la vitesse de chute de la particule (V_{lim}) (cf. Figure 2.3).

- Régime laminaire (Stokes) : ($10^{-4} < Re_p < 1$) nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho_L \cdot V \cdot d}{\mu}$

$$V_{lim} = \frac{g(\rho_s - \rho_l)d_p^2}{18\mu_l}$$

Exercice :

Etablir la loi de STOKES à partir des données suivantes :



$$\begin{aligned} \text{avec } -\vec{F}_g &= (\rho_P - \rho_L)g \frac{\pi d^3}{6} & -C_D &= \frac{24\eta}{\rho_L V_P d} \\ -\vec{F}_f &= \frac{C_D \rho_L V_P^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \\ -\vec{F}_r &= \rho_P \frac{\pi d^3}{6} \frac{dV_P}{dt} \end{aligned}$$

Figure 1 : Forces agissant sur une particule qui chute.

- Régime intermédiaire (Allen) : ($1 < Re_p < 10^3$)

$$V_{lim} = \alpha \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l \sqrt{v_p}} \right)^{2/3} d_p$$

- Régime turbulent (Newton-Rittinger) : ($10^3 < Re_p < 2.10^5$)

$$V_{lim} = \alpha \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_l) d_p}{\rho_l}}$$

Avec,

V_{lim} : vitesse limite de chute de la particule (m/s)

d_p : diamètre de la particule (m)

ρ_s : masse volumique du solide (kg/m³)

ρ_l : masse volumique du fluide (kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

Re_p : nombre de Reynolds particulaire

v_p : vitesse de la particule (m/s)

μ_l : viscosité de liquide (Pa.s)

II.4.2.Types de décanteur :

Il existe deux types de décanteur :

A) Décanteur simple : Les décanteurs classiques sont caractérisés par la surface de décantation égale la surface de base. Le décanteur le plus simple est constitué d'une cuve parallélépipédique munie d'une zone d'entrée et de deux zones de sortie (une pour la surverse et l'autre pour les boues). Il existe deux types de décanteur dit simple :

- ✓ A flux verticaux : Dans ces bassins, la condition pour qu'une particule soit retenue et qu'elle ait le temps d'atteindre le fond avant le débordement ou la sortie de l'ouvrage

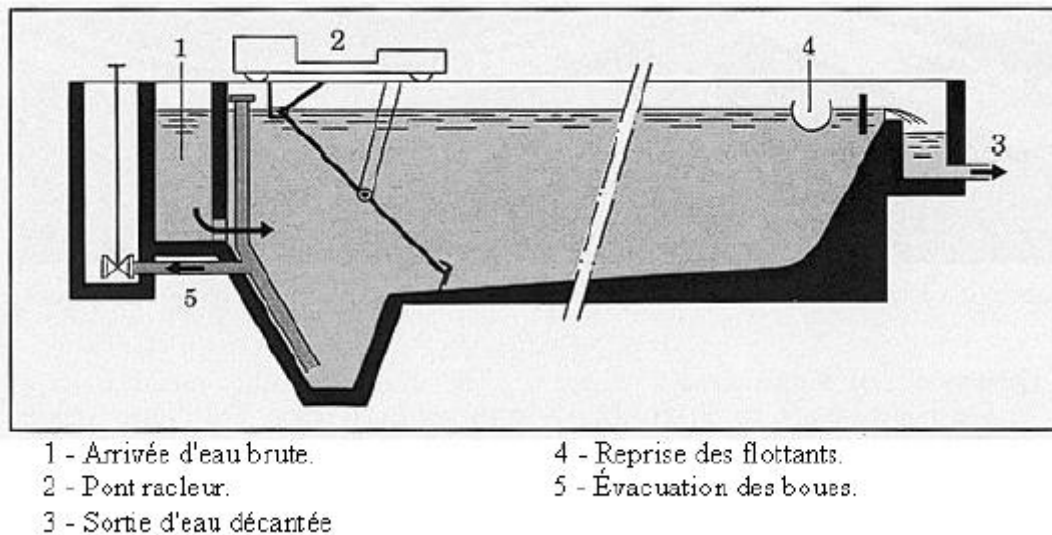


Figure II.7 : Décanteur longitudinal à pont racleur

- ✓ A flux verticaux : Ce sont des ouvrages de forme conique ou pyramidale pour permettre un contrôle plus aisé du voile de boues.

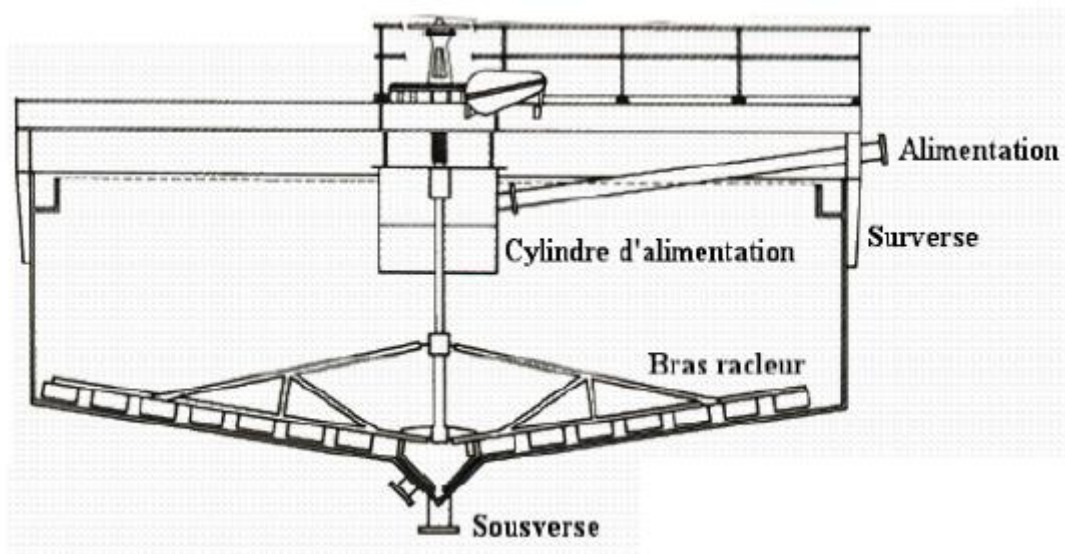


Figure II.7 : Décanteur cylindrique

B) Décanteur lamellaire : Les décanteurs dits lamellaires comportent souvent une série de lamelles qui permet de multiplier la surface de décantation utile tout en réduisant la surface au sol par rapport à un bassin de décantation classique à flux horizontal

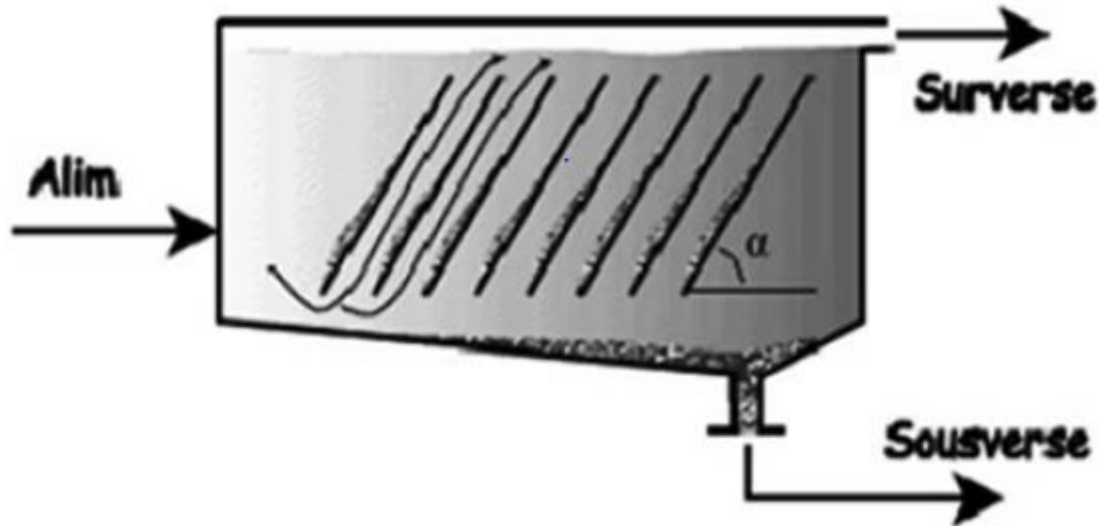


Figure II.8 : Schéma d'un décanteur lamellaire

II.5. Filtration

C'est un procédé de séparation solide/liquide qui utilise le passage de l'eau à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules en suspension dans l'eau brute.

II .5. 1. Types de filtres

Les types de filtres sont classés suivant la vitesse de filtration :

a) Filtres 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 plus grosses soient arrêtées près de la surface de sable. La vitesse de filtration dans ce filtre de 1 à 2 m/h, sont efficaces mais exigent de grandes surfaces.

b) Filtres rapides :

- ✓ Le filtre à sable rapide est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation avec vitesse de filtration 4 à 25 m/h. Le matériau filtrant est maintenu en place par gravité et l'écoulement de l'eau a lieu de haut en bas.

Lorsque le milieu filtrant est écrasé, on lave le filtre en inversant le sens de l'eau.

Les filtres rapides sont les plus répandus ; il en existe deux catégories :

- Les filtres ouverts b- Les filtres sous pression
- Les filtres sous pression

II.5.2. Colmatage du matériau filtrant

On appelle colmatage l'obstruction progressive des interstices du matériau filtrant. La vitesse de colmatage dépend :

- des matières à retenir : elle est d'autant plus grande que le liquide est plus chargé en MES, que ces matières ont une plus grande cohésion et qu'elles sont susceptibles, elles-mêmes, de prolifération (algues, bactéries) ;
- de la vitesse de filtration ;
- des caractéristiques de l'élément filtrant : dimension des pores, homogénéité, rugosité, forme du matériau.

Les indicateurs (pertes de charge) de colmatage renseignent, tout au long du fonctionnement sur l'état de colmatage du filtre. Lorsque les pertes de charge atteignent la limite tolérable 1,2 à 1,5 m, l'opération de lavage des filtres se déclenche. Le filtre est colmaté lorsqu'il a atteint la perte de charge maximale prévue par construction. Il importe alors de le ramener à son état initial par un lavage efficace dont le mode est lié au type de filtre et à la nature des éléments retenus. Le temps de fonctionnement écoulé entre deux lavages successifs s'appelle un cycle de filtration.

II.5.3. La lavage des filtres

Le lavage des filtres se fait à contre-courant, sous gonflement de la couche filtrante et se déroule en deux étapes qui durent 4 à 5 mn :

- ✓ 1ère phase : insufflation d'air comprimé et d'eau pour détasser le filtre,
- ✓ 2ème phase : injection d'eau.

II.5.4. Matériaux filtrants :

Les matériaux filtrants couramment utilisés sont :

- ✓ Le sable, et l'antracite d'origine naturelle
- ✓ Les matériaux synthétiques
- ✓ Le charbon actif en grains ; d'améliore les qualités et d'éliminer les micropolluants.

II.5.5. Paramètres d'un matériau filtrant

Les principaux paramètres caractéristiques d'un matériau filtrant sont :

- ✓ La composition granulométrique, déterminée par tamisage et tracé d'une courbe donnant le % cumulés non retenus en fonction du diamètre (vide de maille du tamis).

- ✓ Les tailles d₅₀ et d₁₀, tailles pour lesquelles respectivement 50% et 10% sont déterminés à partir médiane pour laquelle le matériau est partagé en deux quantités égales ; par contre d₁₀ est appelée taille effective, cette valeur est représentative de la perméabilité du lit.

Le coefficient d'uniformité caractéristique de l'uniformité des tailles :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- ✓ La porosité : fraction du volume du matériau occupé par l'eau lorsqu'il est saturé d'eau.

$$V_T = V_S + V_F$$

Volume totale du lit = volume occupé par les grains + volume d'eau qui sature le lit La
porosité f = est fraction occupée par l'eau

- ✓ la perméabilité ce paramètre est exprimé par le coefficient de perméabilité K qui figure dans la loi de Darcy :

$$Q = KA\Delta H/L$$

Q : est débit de l'eau

A : l'aire de la couche mesurée perpendiculairement à la direction de l'écoulement.

L : l'épaisseur de la couche

ΔH : La chute totale de pression à travers la couche, exprimée en hauteur d'eau.

II .6. Désinfection

La désinfection est un traitement qui permet de détruire ou d'éliminer les microorganismes susceptibles de transmettre des maladies ; ce traitement n'inclus pas nécessairement la stérilisation, qui est la destruction de tous les organismes vivants dans un milieu donné. On peut procéder à la désinfection en ajoutant à l'eau une certaine quantité d'un produit chimique doté de propriétés germicides. Les produits chimiques les plus utilisés sont : le chlore (Cl_2), le dioxyde de chlore(ClO_2), l'ozone(O_3), le brome (Br), l'iode(I) et le permanganate de potassium. On peut également désinfecter l'eau grâce à des moyens physiques : ébullition, ultrasons, ultraviolets ou rayons gamma.

II.6.1. Désinfection par le chlore

Les produits chimiques les plus utilisés pour obtenir une désinfection des eau par le chlore sont : le chlore gazeux (Cl_2), les hypochlorites de sodium ($NaOCl$), hypochlorites de calcium ($Ca(OCl)_2$), les monochloramines (NH_2Cl) et le dioxyde de chlorites (ClO_2). Parmi ces produits, c'est le chlore gazeux auquel on recourt le plus pour la désinfection des eaux potables. Dans les petites usines de traitement, on utilise souvent des hypochlorites, car ces produits sont faciles à manipuler et font courir moins de danger aux opérateurs. Par exemple : dans New York et Chicago utilisent de l'hypochlorite de sodium en solution dans leurs usines d'épuration.

Le chlore gazeux et les hypochlorites réagissent rapidement dans l'eau pour former de l'acide hypochloreux ($HOCl$), qui est le produit actif dans la désinfection.

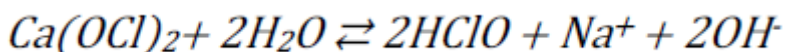
Réaction du chlore gazeux



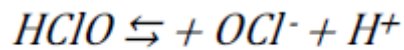
Réaction de l'hypochlorite de sodium



Réaction de l'hypochlorite de calcium



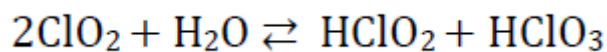
L'acide hypochloreux ($HClO$), est un acide faible qui réagit de la façon suivant :



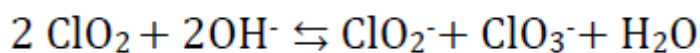
II.6.2. Dioxyde de chlore :

Le dioxyde de chlore (ClO₂) est un gaz orange, étant un gaz instable et explosif à une température supérieure à – 40 °C, on doit le produire immédiatement avant son injection dans l'eau. Par ailleurs, la solubilité du dioxyde de chlore dépend de la température et la pression. Ainsi, à une température de 20°C et une pression partielle de 5.3kPa, la solubilité du dioxyde de chlore est de 4 g/l.

Le dioxyde de chlore est un radical stable, mais très réactif. La réaction de sa mise en solution dans l'eau s'écrit :



En milieu basique, ClO₂ se dismute en donnant un chlorite ClO₂⁻ et chlorate ClO₃⁻ :



Les caractéristiques du dioxyde de chlore sont résumées ci-dessous :

- ✓ bien qu'il soit très soluble, le dioxyde de chlore ne réagit pas chimiquement avec l'eau.
- ✓ le dioxyde de chlore réagit rapidement avec la matière oxydable.
- ✓ le dioxyde de chlore ne réagit pas avec l'azote ammoniacal.
- ✓ le dioxyde de chlore ne forme pas de trihalométhanes lorsqu'on l'utilise pour désinfecter les eaux contenant de la matière organique.
- ✓ le dioxyde de chlore élimine très efficacement les phénols
- ✓ le dioxyde de chlore est plus stable dans l'eau que le chlore.

II.6.3. Ozone

L'ozone est un gaz bleu instable qui dégage une odeur irritant caractéristique, une atmosphère qui contient de 0.25mg/l d'ozone est en général considérée comme dangereux puisque l'ozone est un oxydant très puissant. On doit choisir avec soin les matériaux avec lesquels il entre en contact : le verre et la porcelaine résistent bien à l'ozone, ce qui n'est pas

le cas pour le caoutchouc. La solubilité de l'ozone dans l'eau est de 570 mg/l à 20°C, soit 12 fois moindre que celle du chlore dans les mêmes conditions.

L'ozone est gaz instable composé de molécules d'oxygène triatomique (O₃). Puisque l'ozone se décompose rapidement en oxygène, on doit le produire immédiatement avant son utilisation. Dans l'eau pure, l'ozone réagit de la façon suivante :

