

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أحمد بن يحيى الونشريسي - تيسمسيلت
Université Ahmed Ben Yahia El Wancharissi – Tissemsilt



كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Sciences et Techniques

Polycopié pédagogique
3 Licence Raffinage et Pétrochimie

Intitulé

**TECHNIQUES
DE TRAITEMENT DES EAUX USEES**

Par
CHELLALI Rachid
Grade
MCB

Année universitaire 2020/2021

SOMMAIRE

Conformément au programme du Comité Pédagogique National

Introduction générale.....	3
Chapitre 1: Propriétés physico-chimiques de l'eau	6
Chapitre 2: Classement des eaux.....	9
Chapitre3: Méthodes chimiques de traitement des eaux usées et industrielles.....	17
Chapitre 4: Méthodes physiques de traitement des eaux usées et industrielles.....	21
Chapitre 5 : Méthodes biologiques de traitement des eaux usées et industrielles.....	24
Références bibliographiques	31

INTRODUCTION GENERALE

1. Définition : qu'entend-on par « eau » ?

Dans la pratique, le terme « eau » s'applique à différents milieux, qu'il convient de préciser dans chaque cas. Il faut en effet distinguer [1]:

– **l'eau chimiquement pure**, constituée à 100 % de molécules H₂O (une telle eau appartient encore au domaine théorique, comme on le verra ci-après ; en particulier, aucun récipient n'est parfaitement inerte du point de vue chimique) ;

– **les eaux naturelles**, contenant des substances en solution (minérales : sels ; gaz ; matières organiques) et en suspension (colloïdes minéraux et organiques ; phyto- et zooplancton, bactéries, virus) ;

Elles sont classées suivant :

- leur origine : eaux de pluie ; eaux douces continentales superficielles, courantes (fleuves, rivières, torrents, ruisseaux, canaux...) ou stagnantes (lacs naturels ou artificiels, étangs, marais, lagunes...) ; eaux souterraines (nappes phréatiques, alluviales, libres, profondes ; eau interstitielle du sol) ; eaux salées des mers et des océans ; eaux saumâtres souterraines ou de surface, dont la salinité est intermédiaire entre celle des eaux douces et celle des eaux de mer, ou parfois supérieure à celle des eaux de mer,

- leur utilisation : eaux brutes (avant traitement) ; eaux traitées : eaux potables (ou de consommation, ou du robinet); eaux industrielles (de procédé, de chaudières, de refroidissement...) eaux recyclées ; eaux embouteillées (minérales, de source ou de table, plates ou gazeuses, eau de Seltz); eaux thermales; eaux de piscines; eaux géothermiques...

– **les eaux usées** (ou résiduaires), urbaines ou industrielles.

D'autre part, on compare les eaux douces et les eaux dures suivant leur teneur en calcium et en magnésium : il existe donc deux acceptions pour le terme « eaux douces », suivant que l'on les oppose aux eaux salées des mers et des océans ou aux eaux à dureté élevée.

Il faut enfin citer l'emploi du mot « eau » pour certains mélanges chimiques (eau-forte, eau régale) ou des alcools consommables (eau-de-vie), le thermalisme (« prendre les eaux »), « les eaux » perdues lors d'un accouchement, etc., ce qui sort du cadre de ce dossier.

L'eau étant un excellent solvant, qui absorbe facilement toute trace de gaz, de sel ou de MO entrant à son contact, une eau chimiquement pure n'existe pas dans la pratique : une eau traitée, même considérée comme « pure » pour son utilisation, présente toujours une certaine teneur, parfois importante ou parfois infime, en matières en suspension (particules inertes comme les argiles, ou vivantes comme les bactéries ou le plancton) et en solution (sels, gaz, matières organiques), représentant un certain pourcentage résiduel des constituants initiaux de l'eau brute dont on est parti ; du reste, une eau de consommation dépourvue de sels et de gaz dissous serait désagréable à boire.

Une eau «déionisée», «deminéralisée», «distillée» ou «bi distillée », préparée industriellement ou en laboratoire, n'est pas non plus chimiquement pure dans l'absolu ; même pour les eaux dites «ultrapures», spécialement préparées à grands frais pour certaines industries (électronique, pharmacie, biotechnologies), on admet des tolérances de teneurs résiduelles, infimes, pour divers constituants (sels et gaz dissous, silice, COT, particules, bactéries...). Quant aux eaux de pluie (qui sont des eaux naturellement distillées), elles captent des poussières atmosphériques (qu'elles peuvent partiellement dissoudre) et dissolvent des gaz ; de ce fait, elles présentent déjà une teneur en sels dissous généralement comprise entre 1,5 et 7 mg/l et peuvent être au voisinage de la saturation en oxygène dissous; de plus, en milieu urbain pollué (SO₂ , oxydes d'azote), leur pH peut parfois s'abaisser au-dessous de 5 (« pluies acides »).

2. L'eau sur la planète

Sur la planète, l'eau se trouve sous forme liquide, solide (neige, glace) et gazeuse (vapeur d'eau). Elle est stockée dans des réservoirs : océans, mers, lacs, cours d'eau, nappes souterraines, glaciers et neige, atmosphère, sols, organismes vivants. Les volumes d'eau contenus dans les différents réservoirs sont donnés dans le tableau 1.

L'eau salée des océans et mers est le réservoir le plus important, près de 97,5 % du total. Il faut remarquer que l'eau douce ne représente que 2,5 % de la masse totale, sachant qu'environ 75 % de cette eau se trouve dans les glaciers, calottes polaires et neiges. La part de l'eau douce liquide est donc de 0,6 %. Mais une partie de cette eau douce se trouve dans des nappes profondes ; ainsi l'eau accessible, facilement mobilisable, ne représente que 0,3 % du total des eaux présentes sur Terre.

Sous l'impulsion de l'énergie solaire, des échanges d'eau qui existent entre les différents réservoirs : c'est le cycle de l'eau qui permet le renouvellement des eaux terrestres. Le bilan des flux hydriques est reporté dans le tableau 1.

Chaque année, au-dessus des océans, il s'évapore plus d'eau qu'il n'y pleut. Par contre, sur les continents, il tombe annuellement plus d'eau qu'il ne s'en évapore. La différence, estimée à 40 000 km³, retourne aux océans à travers les cours d'eau (ruissellement, infiltration) et constitue une « réserve renouvelable » dans laquelle il est possible de puiser. Ce flux annuel représente une quantité d'environ 6 000 m³ par habitant de la planète. La ressource disponible dépasse de loin les besoins de l'humanité, mais elle est très inégalement répartie entre les continents et les pays ; en outre, celle-ci est plus ou moins dégradée par diverses « pollutions » qui touchent surtout les eaux de surface, mais aussi les nappes les plus superficielles.

Le « **stress hydrique** » correspond à une ressource en eau annuelle inférieure à 1 700 m³ par personne. Il y a pénurie lorsque la ressource est inférieure à 1 000 m³ par habitant.

Tableau 1. Ressources en eau sur la terre [2]

Eau de la planète	1425 km³
- Eau salée (océans, mers)	1390 M km³ (97.6%)
- Eau douce	35 M km³ (2.5%)
• Glaciers, calottes polaires et neiges	26 M km³
• Eaux souterraines	8.5 M km³
• Eaux superficielles (Lacs, fleuves et rivières)	0.35 M km³
• Humidité (Air, sol) et organismes vivants	0.08 M km³
• Eau mobilisable : Lacs, fleuves, rivières et nappes peu profondes	4.2 M km³ soit 0.3%)

3. L'eau en Algérie

Les potentialités hydriques naturelles de l'Algérie sont estimées actuellement à 18 milliards de m³ par an répartis comme suit [3]:

- 12,5 milliards de m³/an dans les régions Nord dont 10 milliards en écoulements superficiels et 2,5 milliards en ressources souterraines (renouvelables).

- 5,5 milliards de m³/an dans les régions sahariennes dont 0,5 milliard en écoulements superficiels et 5 milliards en ressources souterraines (fossiles).

L'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62 % de la demande totale du pays). La demande en eau potable, qui a considérablement augmenté depuis les années 1970, représente quant à elle 35 % de la demande totale. La part des besoins en eau du secteur industriel ne s'élève qu'à 3 %.

Le recours à l'utilisation des eaux non conventionnelles par le dessalement de l'eau de mer (soit une capacité de production totale de 2,1 millions de m³/jour en 2013) et la réutilisation des eaux usées épurées issues de 239 stations d'épuration (soit 1,2 milliards de m³ par an en 2014) semble jalonner la nouvelle politique des pouvoirs publics pour lutter contre la situation du stress hydrique.

Chapitre 1:

L'eau : Propriétés physiques et chimiques

Même si l'eau est (ou devrait toujours être) un liquide inodore, incolore et sans saveur, d'autres propriétés physiques ou chimiques lui confèrent des qualités qu'il faut connaître pour comprendre mieux le rôle fondamental que joue cette molécule sur notre planète aussi bien comme facteur essentiel pour les écosystèmes que comme élément vital pour les êtres vivants. Mais du fait des liaisons hydrogène qui relient les molécules entre elles, l'eau est sous forme liquide et présente un certain nombre de particularités sans lesquelles la vie n'aurait pas pu être possible, au moins sous la forme que l'on connaît.

1 Propriétés physiques

L'eau a des propriétés physiques assez particulières par rapport aux autres liquides. Elle apparaît comme un liquide "structuré", et non désordonné comme les autres liquides, par le fait que ses constituants élémentaires sont associés [4].

1.1 Un liquide mobile

L'eau est un corps continu, sans rigidité, qui coule facilement, remplit tous les interstices, puis s'étale en surface.

L'eau possède un fort pouvoir mouillant qui lui donne des propriétés capillaires particulièrement importantes, par exemple, pour comprendre son comportement dans les sols. En outre, sa viscosité, très variable selon sa composition chimique ou sa température, est à l'origine de caractéristiques de miscibilité remarquables. Par exemple des courants marins chauds ou froids ne se mélangent guère avec les eaux voisines dont la température est différente.

1.2 Une chaleur spécifique élevée

L'eau est l'élément naturel (à part l'ammoniaque NH_4^+) dont la chaleur spécifique est la plus élevée sur terre. La chaleur spécifique étant la quantité d'énergie qu'il faut fournir à une masse d'eau donnée pour élever sa température de 1°C , cela revient à dire que l'eau est difficile à chauffer, tout autant qu'elle est difficile à refroidir.

1.3 Une chaleur latente de fusion et de vaporisation élevées

Les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation représentent les quantités de chaleur qu'il faut fournir soit pour fondre de la glace, soit pour produire de la vapeur d'eau. L'énergie nécessaire est prélevée sur le substrat, cela revient à dire, par exemple, que si la majeure partie de la vapeur d'eau atmosphérique vient de l'océan, celui-ci est constamment refroidi par ce mécanisme de vaporisation.

Ces deux caractéristiques expliquent en grande partie pourquoi les hydrosystèmes, surtout océaniques, mais aussi continentaux, se comportent comme de formidables tampons thermiques et pourquoi la température à la surface de la terre varie dans des proportions réduites.

1.4 Des variations de densité importantes

La densité de l'eau varie avec sa température; elle augmente lorsque la température baisse, mais la densité maximale est à 4°C ($0,997 \text{ g/cm}^3$) et non à 0° comme on pourrait s'y attendre. Ainsi, les mers et les lacs gèlent depuis la surface et non de puis le fond où s'accumule, par phénomène de stratification, l'eau la plus dense. L'eau à l'état solide est plus légère que l'eau liquide (masse volumique de la glace: $0,920 \text{ g/cm}^3$).

1.5 Coefficient de compressibilité

Le coefficient de compressibilité isotherme de l'eau est petit ($4,9 \cdot 10^{-5}$ par bar) et en première approximation on peut considérer l'eau comme incompressible. Néanmoins, les grandes dépressions atmosphériques agissent sur le niveau des mers qui monte au cours des tempêtes.

La tension superficielle est élevée: l'eau est un bon mouillant (72 dyne/cm); elle s'insinue et pénètre dans tous les interstices et les pores des roches ainsi que dans les sols par phénomène de capillarité. Cette propriété est fondamentale pour le stockage de l'eau dans les aquifères, pour l'érosion superficielle des roches (éclatement sous l'effet du gel: le passage eau-glace développe une pression allant jusqu'à $207\,000 \text{ KPa}$). La forte tension superficielle explique également la forme sphérique des gouttes d'eau.

L'état physique de l'eau dépend de la température et de la pression. Le passage liquide-gaz se fait classiquement à 100°C à la pression normale mais à 72°C seulement au sommet de l'Everest ($8\,848 \text{ m}$). La température de fusion de la glace décroît avec la pression: sous l'effet d'une pression la glace redevient liquide: ainsi, les patineurs glissent en fait sur une mince pellicule d'eau liquide formée sous l'effet de la pression du patin.

1.6. Une transparence, certes, mais seulement dans le spectre visible.

Si l'eau apparaît incolore, c'est parce qu'elle est transparente dans le spectre visible. Les grandes masses d'eau absorbent les infrarouges sur quelques mètres d'épaisseur. C'est la raison essentielle qui fait que seules les couches les plus superficielles des eaux s'échauffent. Il en va de même pour la vapeur d'eau atmosphérique laquelle de ce fait limite largement la pénétration des infrarouges. C'est une des raisons qui expliquent que les écarts de température entre l'hiver et l'été sont plus limités dans les régions soumises à l'influence océanique que dans les régions continentalisées (éloignées de l'océan).

Les eaux restent transparentes sur des profondeurs importantes pour les verts et les bleus. C'est une des raisons qui expliquent pourquoi les lacs ou les océans, surtout si leurs eaux sont limpides, sont verts (moins profonds) ou bleus (plus profonds). Les eaux ne sont transparentes aux radiations utiles pour la photosynthèse que sur une épaisseur qui varie, en moyenne, de 10 à 50 mètres (zone euphotique).

Les valeurs des principales constantes physiques de l'eau sont rassemblées dans le tableau 2.

Tableau 2 - Principales constantes physiques de l'eau pure [4]

Eau liquide	
Température d'ébullition sous 760 mmHg ($101\,325,02 \text{ Pa}$)	100°C
Capacité thermique massique à 15°C	$4,186\,8 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$
Enthalpie de vaporisation à 100°C	$2\,252,5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$
Conductivité thermique à 20°C	$5,98 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistivité à 20°C	$23,8 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$
Permittivité relative ε à 20°C	80
Indice de réfraction pour la raie D à 10°C	1,333 00
Masse volumique à 4°C	$1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (par définition)
Eau solide	
Température de fusion	0°C (par définition)
Capacité thermique massique	$2,093\,4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$
Enthalpie de fusion sous 760 mmHg ($101\,325,02 \text{ Pa}$)	$333,27 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$
Tension de vapeur à 0°C	$877,128 \text{ Pa}$
Permittivité relative ε	3,26
Indice de réfraction pour la raie D	1,309 07
Densité (par rapport à l'eau à 4°C)	$0,916\,49 \pm 0,000\,7$
Eau vapeur	
Conductivité thermique à 100°C	$0,231 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Densité par rapport à l'air	0,623 37
Indice de réfraction pour la raie D à 100°C	1,002 59

- **Viscosité**

Elle diminue lorsque la température croît ; par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée, rend l'eau moins visqueuse aux basses températures.

- **Tension superficielle**

Elle est **extrêmement élevée** ; égale à 73×10^{-3} N/m à 18 °C et $52,5 \times 10^{-3}$ N/m à 100 °C.

L'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle, les tensioactifs par contre la diminuent.

2 Propriétés chimiques

2.1 Un formidable solvant

L'eau est le plus formidable solvant naturel à la surface de la terre. L'eau est capable de dissoudre quasiment n'importe quel substrat, au point que l'on peut affirmer que l'eau pure n'existe pas puisque le flacon qui pourrait la contenir, sans être un peu dissous par elle, n'a pas encore été inventé .

Les eaux de pluies, pourtant issues essentiellement de l'évaporation de l'eau de mer, donc douces, se chargent de minéraux dans l'atmosphère. Leur teneur totale en sels dissous voisine les 7 g / m³. Quand les pluies ruissellent ou s'infiltrent dans le sous-sol, leurs eaux se chargent de tous les minéraux ou de toutes les matières organiques qu'elles croisent, y compris des substances polluantes ou toxiques. C'est ainsi qu'en moyenne, les eaux de rivières ont une charge en sels dissous de l'ordre de 120 g / m³.

Ce sont ces eaux qui sont à l'origine de la salinité des eaux de mer, laquelle est de l'ordre de 35 000 g / m³, soit près de 300 fois plus que les eaux douces.

Tous ces minéraux et substances organiques dissous sont des nutriments ou des oligoéléments indispensables aux organismes photosynthétiques (algues, plantes, phytoplancton, cyanobactéries, etc.) pour leur production primaire.

2.2 Une molécule à part

Même si la couche électronique externe reste saturée, les électrons ont tendance à migrer vers l'oxygène (O⁻) délaissant l'hydrogène (H⁺). Cette " disponibilité " électronique potentielle rend la molécule d'eau très affine pour de multiples substances qu'elle peut ainsi dissoudre.

En outre, le déséquilibre électronique a pour effet de rendre possible des liaisons entre l'atome d'hydrogène d'une molécule avec l'atome d'oxygène d'une autre molécule (liaison hydrogène). En réalité, une molécule d'eau s'entoure de quatre autres molécules constituant un tétraèdre dont les atomes d'oxygène occuperaient les sommets.

Cette liaison hydrogène, faible au regard de la liaison covalente, est suffisamment forte pour qu'aux basses températures, l'arrangement " cristallin " en tétraèdre soit permanent dans la glace et se maintiennent partiellement dans l'eau liquide. À partir de 25 - 30° C, les liaisons hydrogène perdent grandement de leur efficacité, jusqu'à ne plus exister dans l'eau chaude ou bouillante et naturellement dans la vapeur.

C'est l'existence de cette liaison hydrogène qui explique pourquoi il faut fournir beaucoup d'énergie pour vaporiser l'eau, puisque avant qu'elle le puisse, il faut d'abord casser ces liaisons dites faibles.

2.3 Le support du pH

Il arrive qu'un atome d'hydrogène d'une molécule d'eau soit capté par un atome d'oxygène d'une autre molécule. Deux molécules d'eau vont donc donner naissance à un ion OH^- et à un autre H_3O^+ (hydronium). Dans l'eau pure, il y a le même nombre d'ions OH^- et H_3O^+ . Mais qu'une substance dissoute apporte un excès d'ions OH^- , la solution devient basique ; qu'une autre substance apporte un excès d'ions H_3O^+ , la solution devient acide. Le pH traduit la concentration d'ions H_3O^+ dans une solution : 0 à 7, acide ; 7 neutre ; 7 à 14 basique ou alcalin.

Chapitre 2 : **Classement des eaux usées**

1. Généralités sur les eaux usées

1.1 Définition

Les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine [5]. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels [6]. Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés ; c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles).

1.2 Origine des eaux usées

On peut classer comme eaux usées, les eaux d'origine urbaines constituées par des eaux ménagères (lavage corporel et du linge, lavage des locaux, eaux de cuisine) et les eaux vannes chargées de fèces et d'urines ; toute cette masse d'effluents est plus ou moins diluée par les eaux de lavage de la voirie et les eaux pluviales. Peuvent s'y ajouter suivant les cas les eaux d'origine industrielle et agricole [7].

L'eau, ainsi collectée dans un réseau d'égout, apparaît comme un liquide trouble, généralement grisâtre, contenant des matières en suspension d'origine minérale et organique à des teneurs extrêmement variables. En plus des eaux de pluies, les eaux résiduaires urbaines sont principalement d'origine domestique mais peuvent contenir des eaux résiduaires d'origine industrielle d'extrême diversité. Donc les eaux résiduaires urbaines (ERU) sont constituées par :

- Des eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole
- Des eaux pluviales ou de ruissellement urbain

1.2.1 Origine industrielle

Les déchets et les effluents industriels définissent largement la qualité et le taux de pollution de ces eaux usées. Les établissements industriels utilisent une quantité importante d'eau qui tout en restant nécessaire à leur bonne marche, n'est réellement consommée qu'en très faible partie le reste est rejeté. On peut néanmoins, faire un classement des principaux rejets industriels suivant la nature des inconvénients qu'ils déversent :

- Pollution due aux matières en suspension minérales (Lavage de charbon, carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés....) ;
- Pollution due aux matières en solution minérales (usine de décapage, galvanisation...)
- Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte papier...)
- Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, porcherie, produits pharmaceutiques.....) ;

- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires....).

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés.

1.2.2. Origine domestique

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines : urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères).

Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Elles se composent essentiellement par des eaux de vanne d'évacuation de toilette. Et des eaux ménagères d'évacuation des cuisines, salles de bains.

Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (W.C), très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganisme.

1.2.3. Origine agricole

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation) ;
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...).

Donc ces eaux sont issus :

- Des apports directs dus aux traitements des milieux aquatiques et semi-aquatiques tels que le désherbage des plans d'eau, des zones inondables (faucardage chimique) et des fossés, ainsi que la démolition des plans d'eau et des zones inondables (étangs et marais).
- Des apports indirects dus en particulier à l'entraînement par ruissellement, aux eaux de rinçage des appareils de traitement, aux résidus présents dans des emballages non correctement rincés ou détruits, aux eaux résiduaires des usines de fabrication et de conditionnement.

1.3. Caractéristiques des eaux usées

1.3.1 Paramètres physiques

- **La température**

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels,...etc.

- **La matière en suspension (MES)**

La pollution particulaire est due à la présence de particules de grande taille, supérieure à $10\mu\text{m}$, en suspension dans l'eau, et que l'on peut assimiler aux matières en suspension (MES). En fait, les matières en suspension ne sont des particules solides véritablement en suspension que dans des conditions moyennes d'écoulement des effluents correspondant à une vitesse minimale de $0,5\text{ m/s}$. En fonction de la taille des particules, on distingue les matières grossières ou décantables (diamètre supérieur à $100\ \mu\text{m}$) et les matières en suspension. On peut également prendre en compte une partie des matières colloïdales, de dimension inférieure, qui constitue et la limite entre la phase solide et la phase dissoute (entre 1 et $10^{-2}\ \mu\text{m}$).

Elles sont séparables par décantation ou filtration grossière (couche de sable) ces procédés d'élimination physique font intervenir la sédimentation, la filtration ou flottation.

- Matières colloïdales : ce sont des matières stables et homogènes et sont animées de charges négatives ce qui leur donne une répulsion mutuelle.
- Matières dissoutes : après filtration de l'eau colloïdale à $0,02\mu\text{m}$ on obtient un filtrat de matière dissoute. On admet que les substances arrêtées par les filtres millipores fins à $0,02\mu\text{m}$ ce sont des colloïdes et celles qui traversent en solution sont les matières dissoutes dans le filtrat.

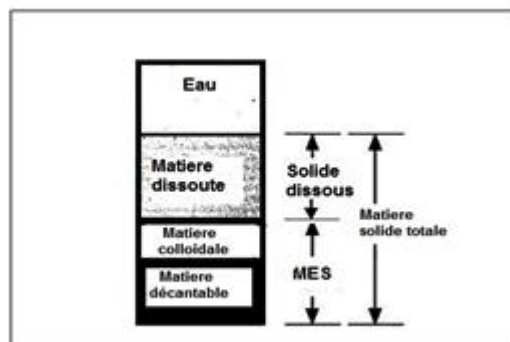


Fig 2.1 Composition synthétique d'un échantillon type d'eau usée

- **Paramètres Organoleptiques**

- **La Turbidité**

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la

turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM (American Society for Testing Material) qui considère que les trois unités suivantes sont comparables.
Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) = unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

- **La couleur**

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement. La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration.

1.3.3. Paramètres Chimiques

- **Le potentiel Hydrogène (pH):**

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression ; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH.

- **La Conductivité**

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm².

L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m).

$$1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m.}$$

- **L'Oxygène Dissous**

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu.

La concentration en oxygène dissous est exprimée en mg/l.

- **La Demande Chimique en Oxygène (DCO)**

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau quelque soit leur origine organique ou minérale.

La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation.

La DCO est la concentration, exprimée en mg/l, d'oxygène équivalente à la quantité de dichromates consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies par la norme.

- **La Demande Biochimique en Oxygène (DBO)**

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration.

la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO₅) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques.

- **L'azote**

L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral. L'azote organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral (ammoniaque, nitrate, nitrite), il constitue la majeure partie de l'azote total.

- **Les nitrates**

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux provenant en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturelles ne dépassent pas 3 mg/l dans les eaux superficielles et quelques mg/L dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue donc un rôle essentiel dans leur présence et l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement des eaux en nitrates. La teneur en nitrates est en augmentation ces dernières années, de l'ordre de 0,5 à 1 mg/l/an, voire 2 mg/l/an dans certaines régions. Cette augmentation a plusieurs origines :

- Agricole : agriculture intensive avec utilisation massive d'engrais azotés ainsi que rejets d'effluents d'élevage. Cette source représente les 2/3 de l'apport en nitrates dans le milieu naturel ;
- Urbaine : rejet des eaux épurées des stations d'épuration où l'élimination de l'azote n'est pas totale et qui peuvent rejeter des nitrates ou des ions ammonium qui se transformeront en nitrates dans le milieu naturel. Cette source représente les 2/9 des apports.
- Industrielle : rejet des industries minérales, en particulier de fabrication des engrais azotés. Cette source représente 1/9 des apports.

- **L'azote ammoniacal**

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniaque qui correspond aux formes ionisées (NH₄⁺) et non ionisées (NH₃) de cette forme d'azote. L'ammoniaque constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, l'ammoniac (NH₃) est un gaz soluble dans l'eau, mais, suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée (NH₄⁺). Les réactions réversibles avec l'eau sont fonction également de la température et sont les suivantes : $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_4\text{OH} \longrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$

- **Le Phosphore**

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. Les composés phosphorés qui, sans hydrolyse ou minéralisation, répondent au test spectrophotométrique sont considérés comme étant des orthophosphates.

L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable et minéralisation, le phosphore organique. Chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être séparée analytiquement en orthophosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique.

- **Le sulfate**

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/L, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/L) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé. La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation. Leur présence dans l'eau est généralement due à des rejets en provenance d'ateliers de blanchiment (laine, soie, etc.), d'usines de fabrication de cellulose (pâte à papier, etc.) et d'unités de déchloration. Sont utilisées, par ailleurs, les propriétés réductrices des sulfites dans les eaux de chaudières pour éviter la corrosion liée à la présence d'oxygène dissous ; l'injection dans le circuit se fait habituellement en continu à la concentration de 20 mg/l. Cependant un excès d'ions sulfites dans les eaux de chaudières peut avoir des effets néfastes car il abaisse le pH et peut alors développer la corrosion. En cas de rejet dans l'environnement, les sulfites se combinent à l'oxygène en donnant des sulfates.

1.3.2 Paramètres bactériologiques

Les eaux usées peuvent contenir des organismes (virus, bactéries, protozoaires, helminthes...) qui peuvent être pathogènes. Il est d'usage de se contenter de mesurer des germes tests qui comprennent les coliformes du genre *Escherichia coli* et les streptocoques fécaux.

Pour l'irrigation des cultures destinées à être consommées crues, des terrains de sport, des jardins publics, le nombre des Coliformes fécaux dans 100 ml d'eau doit être <1000 [8].

1.3.3 Impacts majeurs de la pollution des eaux

A - Contribution à la diminution du taux d'oxygène dissous dans les eaux naturelles par :

- Oxydation chimique directe
- Consommation biologique par les microorganismes aérobies dans le cours de la métabolisation des polluants biodégradables.
- Phénomènes physico-chimiques contrariant le maintien d'un taux d'oxygène convenable (température, salinité)
- Limitation des échanges gazeux entre l'atmosphère et le milieu aquatique.
- Conséquences des phénomènes fermentaires intervenant à la suite de déversements de matières organiques décantables.

B - Phénomènes de toxicité aigue ou d'accumulation de micropolluants à effet de toxicité différée :

- Toxicité aigue ou subaiguë se traduisant par des taux de mortalité significatifs de populations entières.
- Toxicité à long terme au travers de la bioaccumulation dans les chaînes alimentaires qui se manifeste par des effets somatiques avec altération des grandes fonctions physiologiques ou des effets germinaux pouvant conduire à la stérilisation des espèces ou transmission héréditaire de monstruosité.

C - Phénomènes résultants de déversements excessifs de substances azotées et phosphorées.

➤ Substances azotées:

- Toxicité directe de certaines formes ammoniacale et nitrique sur la vie piscicole.
- Surcoût pour la production d'eau potable
- Contribution à l'eutrophisation

➤ Substances phosphorées :

- Eutrophisation du milieu aquatique: est engendrée par une population d'algue en excès et une pollution organique massive.
- Coloration et mauvaises odeurs qui gêne la production d'eau potable
- Dérèglement des concentrations en oxygène dissous avec asphyxie de nuit et mortalités spectaculaires de poissons.

D - Phénomènes de contamination bactérienne ou virale

Les maladies liées à la présence d'éléments pathogènes ou de molécules toxiques sont très répandues. Les parasitoses d'origine hydrique dominent très largement la pathologie des êtres humains et de la faune aquatique.

1.3.4 Ratios de caractérisation des eaux usées

Pour l'appréciation du degré de pollution organique des eaux usées, on a adopté les ratios DCO/DBO₅, DBO₅/DCO, MES/DBO₅ qui présentent des intérêts importants. L'utilisation de ces paramètres de caractérisation constitue un bon moyen pour identifier la nature et l'origine de la pollution des effluents et permet de proposer un mode de traitement convenable.

▪ Ratio DCO/DBO₅

Le rapport DCO/DBO₅ permet de déduire si les eaux usées rejetées directement dans le milieu récepteur ont les caractéristiques des eaux usées domestiques (rapport DCO/DBO₅ inférieur à 3. Les résultats de ce rapport constituent une indication de l'importance des matières polluantes peu ou pas biodégradables.

DCO/DBO₅ < 2 : l'effluent est facilement biodégradable.

2 < DCO/DBO₅ < 3 : l'effluent est biodégradable avec des souches sélectionnées.

DCO/DBO₅ > 3 : l'effluent n'est pas biodégradable.

▪ Ratio DBO₅/DCO

Ce rapport sert à caractériser une pollution industrielle. Il donne souvent des indications très intéressantes sur l'origine de la pollution des eaux usées et ses possibilités de traitement.

Pour les rejets chargés en matière organique ce ratio est élevé. Un rapport DBO₅/DCO compris entre [0.2 et 0.4] implique que la matière organique contenue dans l'effluent est partiellement biodégradable.

▪ Ratio MES/DBO₅

Ce ratio exprime la pollution d'origine particulaire par rapport à la pollution dissoute. Ceci caractérise un réseau essentiellement unitaire. Une valeur élevée de ce rapport indique la prédominance de la pollution particulaire.

Chapitre 3 :

Méthodes chimiques de traitement des eaux usées et industrielles

Introduction

Sans procédés chimiques ou physiques, de nombreuses substances ne peuvent pas être éliminées des eaux usées industrielles. Selon la composition des effluents, le procédé de traitement chimique et physique des eaux usées peut comprendre plusieurs étapes. Souvent, des solutions de filtrage efficaces ne peuvent être obtenues qu'en combinant différentes étapes dans un ordre précis.

Si les eaux usées contiennent des substances insolubles dans l'eau ou des colloïdes, par exemple, des étapes de sédimentation, de filtration ou de séparation par force centrifuge deviennent nécessaires pour obtenir un système d'assainissement efficace des eaux polluées. Afin de retenir des éléments solides, nous utiliserons par exemple d'autres méthodes de filtration, ou encore des processus de flottation ou de séparation. Nos traitements chimiques permettent de séparer plus facilement les substances nocives dissoutes dans les eaux usées [9].

1 Procédés chimiques

1.1 Neutralisation

La neutralisation d'un effluent consiste à ramener son pH (par acidification ou par alcalinisation) à une valeur fixée en fonction des besoins. En effet, suivant l'utilisation de l'effluent la valeur du pH peut sensiblement varier :

On désigne par le terme de neutralisation, les traitements de correction du pH qui consistent à ramener le pH de l'effluent à une valeur voisine de la neutralité et en tout cas à l'intérieur d'une zone de valeurs bien définies.

Ces traitements concernent :

— la neutralisation des effluents dans la plage des pH correspondant aux normes réglementaires, avant rejet au milieu naturel ;

— la correction du pH avant un stade de traitement ultérieur qu'il soit physico-chimique (ajustement du pH de coagulation par exemple) ou biologique (pour éviter d'altérer la croissance bactérienne).

La neutralisation de l'alcalinité des effluents est généralement réalisée en les mélangeant avec les acides sulfuriques ou chlorhydriques, réactifs industriels avec lesquels les réactions sont pratiquement instantanées

L'acidité des eaux résiduaires industrielles est neutralisée en mélangeant les effluents avec des réactifs alcalins comme la soude (NaOH) ou la chaux éteinte Ca(OH)_2 sous forme de lait de chaux, ou encore en procédant à leur filtration sur un produit alcalino-terreux : marbre, *Neutralite*(1) dolomie calcinée, etc.

Nota (1) : le *Neutralite* est un produit exempt de base libre composé de carbonate de calcium et de magnésium et délivré sous forme de grains calibrés.

1.2 Oxydation

Procédé d'oxydation Nombre de polluants ne sont pas dégradables biologiquement et ne peuvent donc être éliminés au moyen de procédés biologiques. C'est par exemple le cas de nombreux hydrocarbures chlorés. Suite à des traitements inadéquats, on retrouve ces matières en de nombreux endroits des eaux souterraines, ce qui représente une menace pour l'Homme et l'environnement. Le procédé d'oxydation constitue une méthode efficace pour éliminer ce type de matières de l'eau. Il existe, pour traiter l'eau, une multitude de procédés d'oxydation différents. Ce que l'on appelle les « procédés d'oxydation avancés » sont en particulier de plus en plus utilisés ces dernières années. Ce qui caractérise en premier lieu ces procédés est la formation de radicaux OH très réactifs. Ces radicaux font partie des oxydants les plus puissants et sont ainsi en mesure d'oxyder pratiquement n'importe quelle matière. On peut générer des radicaux OH en irradiant de l'eau oxygénée (H_2O_2) avec de la lumière UV. On utilise à cet effet de préférence des rayonnements UV-C d'une longueur d'onde de 254nm.

1.3 Précipitation

La précipitation chimique regroupe un certain nombre de procédés qui réalisent tous l'application de la loi de Bertholet : on ajoute à l'eau un réactif soluble qui, par permutation ou combinaison avec les ions indésirables préexistants, forme un composé insoluble ou très peu soluble qui précipite jusqu'à sa limite de solubilité (déterminée par le produit de solubilité, cette dernière grandeur pouvant subir des variations importantes en fonction de la température, de la force ionique, de la nature des autres ions dissous, etc.).

L'aboutissement de ces réactions de précipitation combinées souvent avec une neutralisation des rejets, est toujours une séparation solide-liquide, mettant en œuvre des traitements classiques de décantation, flottation, voire filtration.

1.4 Coagulation / Flocculation

C'est un procédé physico-chimique qui a pour but de déstabiliser les matières colloïdales (particules qui ne s'agglomèrent pas naturellement).

L'eau reçoit un réactif destiné à provoquer l'agglomération de ces particules en suspension en agrégats floconneux, dont l'ensemble forme une masse qu'on appelle le "floc". Les réactifs utilisés sont généralement des sels de fer ou d'aluminium. Chaque réactif coagulant n'étant actif que dans une certaine zone de pH, un ajustement du pH peut s'avérer nécessaire. Sous l'effet de son propre poids, le floc se dépose lentement.

1.5 Désinfection

Cette étape, commune à tous les traitements, est la plus importante. Elle a pour but de neutraliser tous les virus et bactéries pathogènes. Elle n'est efficace que si l'eau a été préalablement bien traitée, notamment dans le cas des eaux de surface. Bien que les eaux souterraines soient souvent naturellement exemptes de microorganismes, la désinfection prévient le risque d'une contamination par infiltration dans la ressource et dans le réseau.

Elle peut être effectuée :

- **par des procédés chimiques** : oxydation chimique avec des agents chlorés (chlore gazeux, eau de Javel, bioxyde de chlore) et ozone, ou rayonnements ultraviolets.

— La désinfection par oxydation chimique

La chloration est actuellement le procédé de désinfection le plus fréquemment rencontré, à la fois pour le prix de revient du chlore et pour sa simplicité de mise en œuvre. Le chlore gazeux est injecté à des doses précises ; un temps de contact suffisant doit être respecté afin d'assurer une efficacité maximale de l'oxydation. La combinaison du chlore et de la matière organique, lorsqu'elle est incomplètement éliminée au cours des étapes précédentes, conduit à la formation des composés sapides (qui donnent un goût) et de produits organo-chlorés potentiellement cancérigènes, pour lesquels la réglementation impose une teneur maximale admissible (limite de qualité

- **L'ozone** est très fréquemment utilisé par les usines de production d'eau potable à partir d'eaux de surface, pour son grand pouvoir désinfectant, notamment vis à vis des virus et des spores bactériennes, et ses autres propriétés en traitement d'affinage. Cependant, fabriqué sur le site, l'ozone est coûteux et sa mise en œuvre est relativement complexe.

1.6 Electrolyse

L'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique (solution contenant des ions) crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement : les cations se dirigent vers la cathode, les anions vers l'anode. Quand la tension appliquée est suffisante, les réactions suivantes se produisent aux interfaces électrolyte-électrodes :

➤ Définition et principe de l'électrolyse

L'électrolyse est un processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. La réaction a lieu dans une solution d'eau salée: l'électrolyte. Les ions doivent pouvoir circuler librement dans l'eau pour passer d'une électrode à l'autre. Les deux électrodes sont reliées par l'électrolyte et par un générateur de courant électrique. Cette unité est présentée dans le graphique ci-dessous:

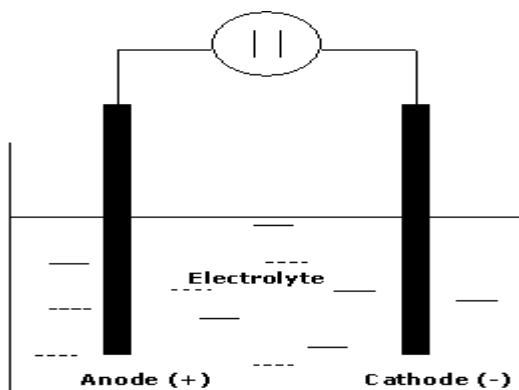


Fig 3.1 Schéma de principe d'électrolyse

Si l'on applique un courant électrique entre les deux électrodes, les ions positifs migrent jusqu'à la cathode pendant que les ions négatifs se déplacent en direction de l'anode. Les ions positifs sont appelés cations alors que les ions négatifs sont eux appelés anions. Les cations sont capables, en raison de leur valence, de capter des électrons. Lors du contact entre les cations et la cathode ces derniers redeviennent un élément stable en perdant des électrons. Les anions réagissent de manière opposée: en cas de contact avec l'anode ils vont céder leurs électrons pour devenir un élément stable. Au niveau de l'électrode les cations sont réduits et les anions oxydés. Selon la nature des ions, le produit formé peut se dégager ou se déposer sur l'électrode.

Pour contrôler les réactions dans l'unité d'électrolyse il est possible de choisir entre différents matériaux pour les électrodes. De la même manière il est possible de sélectionner un type d'électrolyte pour promouvoir une réaction plutôt qu'une autre. L'électrolyte contient les ions qui conduisent le courant.

➤ Galvanisation de pièces métalliques pour les protéger contre la corrosion:

Un métal altérable est protégé contre la corrosion grâce au dépôt par électrolyse d'un métal inaltérable. L'objet à recouvrir est relié au pôle négatif d'un générateur et plongé dans un bain électrolytique.

➤ Électrolyse "purificatrice":

Pour produire du cuivre très pure il faut installer une anode de cuivre polluée qui sera nettoyer par électrolyse. Le cuivre est oxydé en ions Cu^{2+} et précipite ensuite sur la cathode pour donner une couche de cuivre plus pure qu'auparavant. Voir sur le schéma suivant illustrant le raffinage du cuivre.

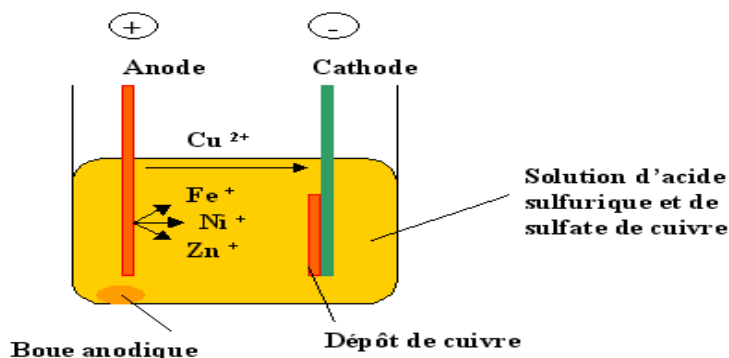


Fig 3.2 Schéma de principe d'électrolyse purificatrice

Les métaux nobles ne réagissent pas comme le cuivre. En effet ils tombent à la surface et forment un dépôt anodique. Les métaux avec un potentiel standard positif peuvent être, tout comme le cuivre, nettoyés par électrolyse (argent par exemple).

1.7 Résines échangeuses d'ions

L'échange d'ions est un procédé chimique dans lequel les ions d'une certaine charge contenus dans une solution (par exemple des cations) sont éliminés de cette solution par adsorption sur un matériau solide (l'échangeur d'ions), pour être remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par le solide. Les ions de charge opposée ne sont pas affectés. Cette technologie a été développée à l'échelle industrielle après la seconde guerre mondiale, principalement dans les années 1950-1970.

La plus part des résines(*) utilisées de nos jours sont des matières synthétiques produites à partir de polymères. Le nombre et la variété des groupes fonctionnels influencent la capacité d'échange et la sélectivité pour les ions de ces résines. On classe les résines en deux catégories en fonction de la nature des ions qui vont être échangés. Si on échange un cation, on parle de résine cationique et si c'est un anion qui est échangé on parle de résine anionique.

L'échange d'ions est à la base d'un grand nombre de procédés de l'industrie ou de laboratoire, qui peuvent se classer en trois catégories principales : substitution, séparation et élimination :

Substitution : un ion noble (par exemple le cuivre) est récupéré dans la solution et remplacé par un autre sans valeur. De façon analogue, un ion nocif (par exemple un cyanure) est retiré de la solution et remplacé par un autre inoffensif.

Séparation : une solution contenant un certain nombre d'ions différents (par exemple Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , tous sous forme de chlorures) est passée au travers d'une colonne de billes de résine. Les ions sont séparés et émergent par ordre croissant d'affinité pour la résine.

Élimination : en utilisant une combinaison de résine échangeuse de cations (sous forme H^+) et de résine échangeuse d'anions (sous forme OH^-), tous les ions sont enlevés et remplacés par de l'eau (H^+OH^-). La solution est ainsi **déminéralisée**. Cela est en réalité une variante particulière de la substitution.

(*) Une résine désigne un produit polymère (naturel, artificiel ou synthétique) qui est une matière de base pour fabriquer par exemple des matières plastiques, textiles, peintures (liquides ou en poudre), adhésifs, vernis, mousses de polymère. Elle peut être thermoplastique ou thermodurcissable.

Chapitre 4 :

Méthodes physiques de traitement des eaux usées et industrielles

Introduction

Les méthodes physiques de traitement des eaux usées sont diverses et peuvent être envisagées pour les traitements primaires, secondaires et tertiaires [9]. Ils sont le plus souvent associés aux procédés chimiques et biologiques.

1 Procédés physiques

1.1 Le stripping

Le « stripping » (ou aération forcée des molécules volatiles) consiste à transférer dans l'air les composés organiques devenus volatils. Cette opération peut être effectuée en simple cuve d'aération, mais on obtient de meilleurs résultats dans un appareil spécifique, nommé tour d'aération. L'air ainsi chargé d'éléments indésirables est ensuite filtré avant d'être rejeté dans l'atmosphère.

Les eaux usées (industrielles de même que municipales) contiennent souvent des concentrations d'ammoniac assez élevées. Le NH_3 peut être séparé des eaux usées par un procédé de stripping à l'air (dégazage des éléments volatiles), suivi de l'absorption de l'ammoniac dans un absorbeur; ces deux unités (colonne de stripping NH_3 , complétée d'un absorbeur) font partie d'un procédé ayant déjà fait ses preuves. L'ammoniac (ou NH_3) est d'abord séparé de l'eau dans une colonne de stripping. L'appareil utilisé pour ce procédé de stripping est très similaire à un laveur de gaz, faisant partie de la technologie pour le traitement des rejets gazeux industriels : une colonne de stripping NH_3 est une tour à garnissage (avec internes et garnissage à l'intérieur) très similaire aux tours de lavage pour le traitement des émissions gazeuses industrielles. L'eau préchauffée contenant de l'ammoniac est introduite dans la colonne de stripping par le haut, tandis que de l'air est introduit par le bas, à contre-courant. Du NaOH est ajouté pour obtenir une valeur de pH correcte, afin de pouvoir dissocier l'ammoniac de l'eau par le procédé du stripping. L'eau ainsi traitée sera collectée en bas de la colonne de stripping NH_3 , les gaz dorénavant chargés d'ammoniac seront évacués par le haut de la colonne, pour traitement ultérieur dans l'absorbeur NH_3 . Dans l'absorbeur, les gaz chargés d'ammoniac seront traités avec de l'acide sulfurique, afin d'absorber le gaz ammoniacal. Les gaz sortants sont recirculés pour économiser l'énergie.

1.2 La filtration

La filtration : c'est l'élimination des particules invisibles, en suspension. Elle s'effectue le plus souvent sur une couche de sable et sera d'autant plus efficace que les grains seront fins. L'usage d'une couche de sable très fin, permet un écoulement plus lent pour favoriser le développement d'un biofilm (voile d'algues ou de bactéries) à la surface du sable. L'activité épuratrice de ce bio film permet la dégradation de la matière organique.

Elle est réalisée sur matériaux classiques (sable) ou sur membranes (cas des eaux souterraines karstiques).

- **La filtration sur lit de sable** (lit filtrant) : une couche de sable retient les particules et laisse passer l'eau filtrée. Le filtre peut jouer un double rôle suivant les conditions d'exploitation : d'une part, il retient les matières en suspension par filtration et 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.

Le filtre à sable nécessite un nettoyage périodique afin d'éliminer les matières retenues entre les grains qui ralentissent le passage de l'eau. La filtration sur lit de sable, efficace, simple et peu coûteuse, s'est imposée, en raison des énormes volumes d'eau à filtrer.

- **La filtration sur membranes** (microfiltration notamment) [11] 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. Ces membranes, sortes de barrières physiques, peuvent être d'origine organique ou minérale.

L'eau circule sous pression à travers des membranes, constituées de longues fibres creuses et poreuses d'1 mm de diamètre sur 1,30 m de long et assemblées en faisceaux dans une cartouche cylindrique. Elles peuvent être de nature organique (polymère de synthèse) ou de nature minérale (type céramique).

Il existe quatre procédés membranaires classés selon le diamètre des pores sur les parois des fibres :

- **Les membranes de microfiltration** (de l'ordre de 100 nanomètres) permettent la rétention des bactéries, des parasites, des levures, des particules à l'origine de la turbidité (eau trouble en raison de matières en suspension).
- **Les membranes d'ultrafiltration** (de l'ordre de 10 nanomètres) arrêtent en plus les virus, les colloïdes.
- **Les membranes de nano filtration** (de l'ordre de 1 nanomètre) retiennent le calcium et la plupart des pesticides.
- **Les membranes plus denses** (de l'ordre de 0,1 nanomètre) stoppent aussi les ions métalliques. Cette dernière technique est appliquée au dessalement de l'eau de mer et à la production d'eau ultra pure et d'eau de processus.

1.3 Désinfection

A l'instar des procédés chimiques d'autres procédés physiques peuvent être utilisés, les rayonnements ultraviolets et la filtration sur membrane.

Les rayons ultraviolets ont un pouvoir germicide élevé et les procédés à membrane empêchent théoriquement tout microorganisme de pénétrer dans le réseau de distribution. Tout comme l'ozone, ces procédés n'ont pas d'action rémanente, c'est-à-dire qu'ils ont une action limitée dans le temps. Leur utilisation nécessite donc une injection de désinfectant chloré en aval afin d'éviter toute contamination par le réseau de distribution.

Parmi leurs avantages on note :

- Aucune modification des caractéristiques organoleptiques de l'eau (goût, odeur, couleur, pH)
- L'utilisation ne nécessite pas l'ajout d'autres produits chimiques
- L'utilisation des UV ne crée pas de sous-produits toxiques dans l'eau
- Les systèmes UV sont compacts et faciles à installer.
- La maintenance est simple et rapide
- La consommation électrique pour les UV est souvent inférieure à celle d'ampoules domestiques

1.4 Décantation

Ce sont des procédés physiques intervenant après la coagulation-floculation.

L'eau coagulée et floculée entre dans le décanteur à vitesse réduite de façon à éviter les turbulences. Les floccs se déposent au fond de l'ouvrage et l'eau clarifiée est récupérée en surface.

A l'inverse, la *flottation* consiste à favoriser la clarification par entraînement des particules en surface, grâce à la génération de bulles d'air, qui s'accrochent aux matières en suspension et aux floccs. Les flottants sont récupérés en surface par bras racleur.

1.5 Flottation

Par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des agrégats dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient, ces agrégats étant recueillis, in fine, sous forme d'écumes (boues flottées) à la surface supérieure de l'appareil.

La flottation est dite **naturelle** si la différence de masse volumique entre les agrégats et l'eau est naturellement suffisante pour une séparation.

La flottation est dite **assistée** si elle met en œuvre des moyens extérieurs (du gaz, air, azote, gaz naturel éventuellement avec réactifs) pour améliorer la séparation de particules naturellement flottables (mais avec une vitesse de séparation insuffisante).

La flottation est dite **provoquée** lorsque la masse volumique de la particule, à l'origine supérieure à celle du liquide, est artificiellement réduite pour provoquer sa flottation. Elle tire alors parti de l'aptitude qu'ont certaines particules solides (ou liquides) à s'unir à des bulles de gaz (de l'air ou l'azote en général) pour former des «attelages» [particule-gaz] moins denses que le liquide dont elles constituent la phase dispersée. Le phénomène mis en œuvre est donc de nature triphasique (gaz-liquide-solide) et va dépendre des caractéristiques physico-chimiques des trois phases, en particulier de l'affinité de leurs interfaces (plus ou moins grande hydrophobie).

La terminologie usuelle qualifie de moyennes les bulles de 2 à 4 mm, de fines les bulles de quelques centaines de μm à 1 mm et enfin de microbulles celles de 40 à 70 μm .

Dans le domaine du traitement de l'eau, il est d'usage de réserver le terme de flottation (au sens strict) à la flottation provoquée en utilisant des microbulles, semblables à celles présentes dans « l'eau blanche » débitée par le robinet d'un réseau d'eau riche en gaz dissous sous forte pression. Ce procédé est la **flottation à gaz dissous**.

1.6 Centrifugation

La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise l'action d'une **force centrifuge** pour provoquer la **décantation accélérée des particules** d'un mélange solide-liquide.

Dans l'enceinte de centrifugation se forment deux phases distinctes :

- un culot de centrifugation (appelé **sédiment**). Ce culot n'a pas une structure homogène car il y a classification des particules selon leur masse volumique ;
- un liquide surnageant (appelé **centrat** ou **centrifugat**). Ce liquide n'est pas toujours bien clarifié (notamment en cas de présence de colloïdes). Il peut aussi comporter deux phases en cas de présence d'une phase plus légère que l'eau (huiles par exemple).

Dans le cadre du traitement de déchets, elle est utilisée afin de séparer les diverses phases en vue d'un traitement spécifique. Par exemple, des boues humides ainsi traitées donneront une phase liquide et des boues sèches qui iront chacune sur une chaîne de traitement particulière (épuration pour la phase aqueuses et valorisation pour les boues).

1.7 Adsorption sur charbon actif

L'adsorption est un processus où un solide est employé pour enlever une substance soluble de l'eau. Dans ce processus, le charbon actif est le solide. Le charbon actif est produit spécifiquement pour couvrir une surface interne très grande (entre 500 et 1500 m²/g). Cette grande surface rend le charbon actif idéal pour l'adsorption. Il existe deux formes de charbons actifs: le charbon actif en poudre (PAC) et le charbon actif granulaire (GAC). Le GAC est, la plupart du temps, employé dans le traitement de l'eau

Principales applications

Les charbons actifs sont employés :

- **en traitement d'affinage** des eaux potables ou des eaux industrielles de haute pureté ; le charbon actif fixe alors les composés organiques dissous qui ont échappé à la dégradation biologique naturelle (autoépuration des cours d'eau), puis aux traitements physico-chimiques amont. En fait, ils ont tout d'abord été utilisés pour améliorer les qualités organoleptiques d'une eau en éliminant les matières organiques responsables de goûts, d'odeurs et de couleur. Avec l'accroissement de la pollution, leur emploi s'est étendu à l'élimination de nombreux polluants et micropolluants tels que les phénols, les hydrocarbures, les pesticides, les détergents et même certains métaux lourds qui ne sont pas totalement éliminés par la clarification. Ils participent également à l'élimination des précurseurs de **THM** et des sous-produits de désinfection ;
- **en traitement d'eaux résiduaires industrielles**, lorsque l'effluent n'est pas biodégradable ou lorsqu'il contient des éléments toxiques organiques interdisant l'emploi de techniques biologiques. Dans ce cas l'emploi de charbon actif peut permettre de retenir sélectivement les éléments toxiques et, par suite, de retrouver un effluent normalement biodégradable ;
- **en traitement « tertiaire »** des eaux résiduaires ou industrielles. Le charbon fixe les composés organiques dissous, réfractaires au traitement biologique situé en amont, et permet ainsi d'éliminer une plus ou moins grande proportion de la **DCO** résiduelle (DCO « dure ») ;
- pour réduire les oxydants
Une propriété des charbons actifs est leur action réductrice des oxydants (chlore, dioxyde de chlore, permanganate, chloramines, ozone...).

Chapitre 5 : Méthodes biologiques de traitement des eaux usées et industrielles

1 Procédés bactériologiques (Aérobies)

L'épuration biologique est, et restera sans doute encore longtemps, le mode de traitement le plus utilisé pour assurer l'élimination de la pollution organique biodégradable des effluents urbains, car de loin le plus économique en exploitation. Elle peut être envisagée sous deux formes intensive et extensive.

1.2 Techniques intensives

1.2.1 Boues activées

Le principe des boues activées réside dans une intensification des processus d'auto-épuration que l'on rencontre dans les milieux naturels.

Le procédé "boues activées" consiste à mélanger et à agiter des eaux usées brutes avec des boues activées liquides, bactériologiquement très actives. La dégradation aérobie de la pollution s'effectue par mélange intime des microorganismes épurateurs et de l'effluent à traiter. Ensuite, les phases "eaux épurées" et "boues épuratrices" sont séparées.

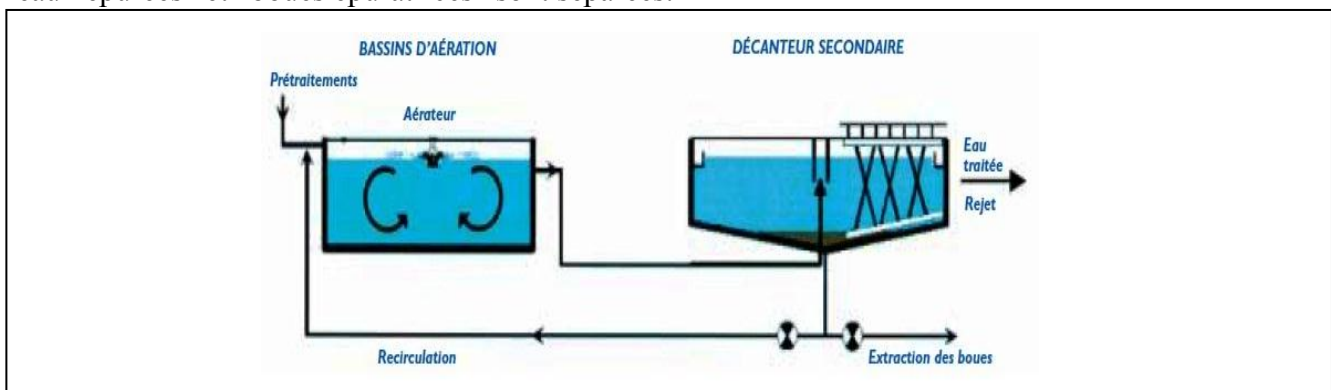


Fig 5.1: Synoptique d'une boue activée - aération prolongée [11]

1.2.2 Disques biologiques :

C'est une technique qui fait appel aux cultures fixées sur des disques biologiques tournants.

Les micro-organismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des disques.

Les disques étant semi-immergés, leur rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée.

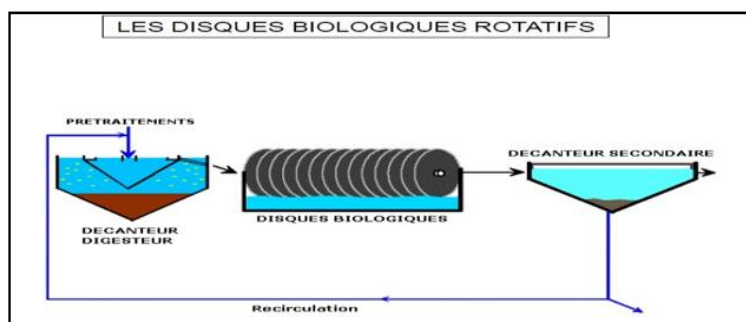


Fig 5.2: Synoptique d'une station d'épuration comportant un disque biologique [11]

1.2.3 Les biofiltres

La biofiltration qui a eu un développement industriel récent sous la forme de systèmes à lits granulaires fixes est une technique qui vise à réaliser simultanément, dans le même ouvrage, la réaction biologique de dégradation aérobie de la pollution par la biomasse épuratrice et la clarification par filtration de l'effluent traité. Le procédé permet de s'affranchir d'un clarificateur aval.

L'ouvrage est un filtre garni en matériau de granulométrie suffisamment faible pour obtenir un effet de filtration efficace.

Le matériau sert simultanément de support à la biomasse épuratrice de type fixé que l'on maintient dans des conditions aérobies dans le filtre. Dans un tel système. L'accroissement de biomasse et les matières en suspension de l'effluent, retenues dans le matériau vont colmater progressivement le lit. On assure cycliquement sa régénération en utilisant des technologies mises en œuvre dans la filtration sur sable (lavage à l'eau en contre-courant).

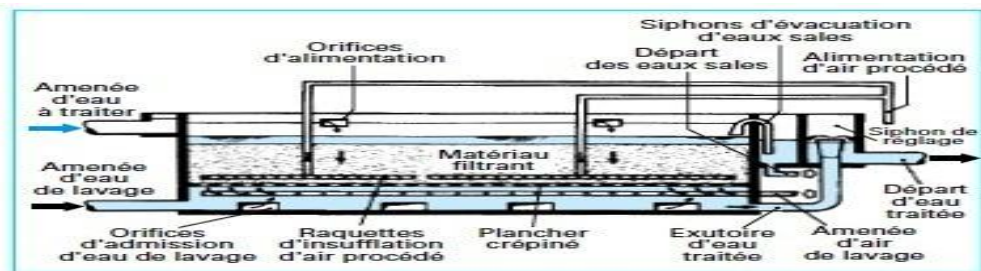


Figure 5.2 - Biofiltre à flux descendant *Biocarbonate*® (Degrémont)

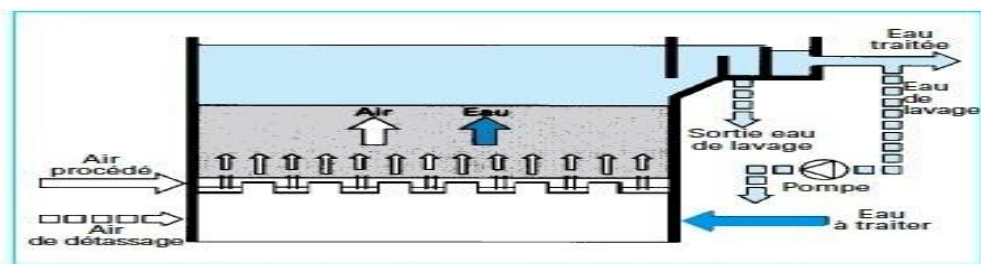


Figure 5.3 - Biofiltre à flux ascendant *Biofor*® (Degrémont)

Fig 5.3 Biofiltre à flux ascendant Biofor (Degrémont)

1.2.4 Lits bactériens

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées, préalablement décantées sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui sert de support aux micro-organismes (bactéries) épurateurs.

L'effluent contenant la pollution ruisselle sur le support et pénètre dans le biofilm alors que l'air chemine naturellement à travers le lit qui repose sur une grille. Le décrochage de la biomasse est spontané par une augmentation de la phase endogène, par l'action des larves et par la vitesse de passage du fluide. Une décantation secondaire est indispensable.

La hauteur du lit bactérien est de 1 à 3 m pour un garnissage classique et de 6 à 12 m pour des garnissages plastiques.

Une aération permanente s'établit de bas en haut (lit plus chaud que l'air ambiant, effet de cheminée).

La distribution régulière de l'effluent est réalisée par des éléments fixes (rigoles, rampes fixes) ou mobiles (sprinklers rotatifs).

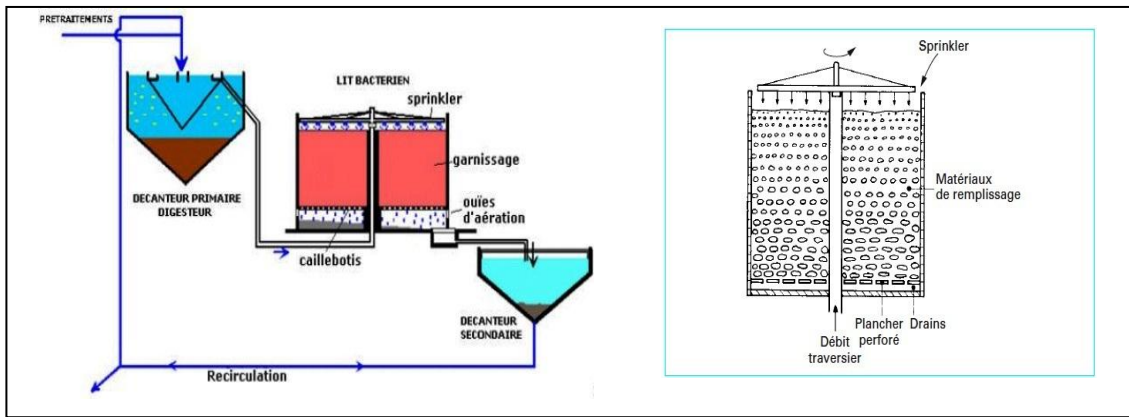


Fig 5.4 Synoptique d'une station d'épuration comportant un lit bactérien [11]

1.3 Techniques extensives

1.3.1 Les cultures fixées sur support fin

Les techniques dites extensives sont des procédés qui réalisent l'épuration à l'aide de cultures fixées sur support fin ou encore à l'aide de cultures libres mais utilisant l'énergie solaire pour produire de l'oxygène par photosynthèse. Le fonctionnement de ce type d'installation sans électricité est possible, excepté pour le lagunage aéré pour lequel un apport d'énergie est nécessaire pour alimenter les aérateurs ou les matériels d'insufflation d'air.

a- L'infiltration-percolation sur sable

L'infiltration-percolation d'eaux usées est un procédé d'épuration par filtration biologique aérobie sur un milieu granulaire fin. L'eau est successivement distribuée sur plusieurs unités d'infiltration. Les charges hydrauliques sont de plusieurs centaines de litres par mètre carré de massif filtrant et par jour. L'eau à traiter est uniformément répartie à la surface du filtre qui n'est pas recouvert. La plage de distribution des eaux est maintenue à l'air libre et visible.

Une autre variante intéressante de l'épuration par le sol est constituée par les filtres à sable horizontaux ou verticaux enterrés. Ces techniques utilisées, avant tout, pour les situations relevant de l'assainissement autonome restent intéressantes pour l'assainissement autonome regroupé concernant quelques centaines d'équivalents-habitants. Pour un filtre à sable vertical enterré, un dimensionnement de 3,5 m² / hab est nécessaire et une alimentation basse pression recommandée.

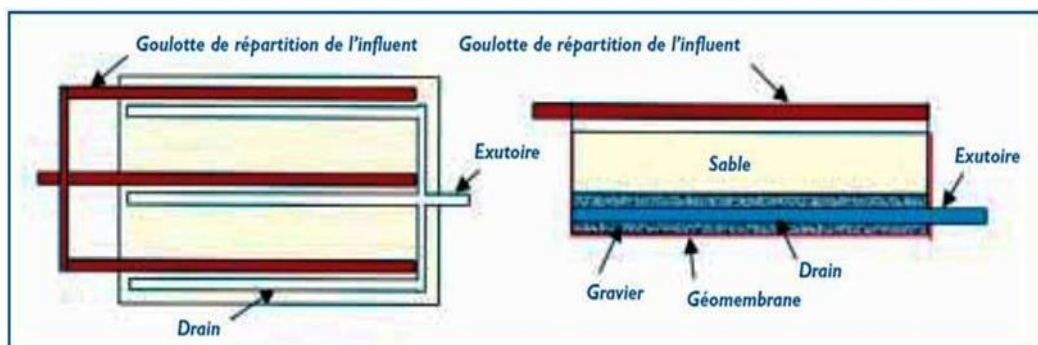


Fig 5.5 Infiltration-Percolation étanchée et drainée [11]

b- Les filtres plantés à écoulement vertical

Les filtres sont des excavations, étanchées du sol, remplies de couches successives de gravier ou de sable de granulométrie variable selon la qualité des eaux usées à traiter.

Contrairement à l'infiltration-percolation précédemment évoquée, l'influent brut est réparti directement, sans décantation préalable, à la surface du filtre. Il s'écoule en son sein en subissant un traitement physique (filtration), chimique (adsorption, complexation...) et biologique (biomasse fixée sur support fin). Les eaux épurées sont drainées. Les filtres sont alimentés en eaux usées brutes par bâchées. Pour un même étage, la surface de filtration est séparée en plusieurs unités permettant d'instaurer des périodes d'alimentation et de repos.

Le principe épuratoire repose sur le développement d'une biomasse aérobie fixée sur un sol reconstitué relatif aux cultures fixées sur support fin). L'oxygène est apporté par convection et diffusion. L'apport d'oxygène par les racelles des plantes est, ici, négligeable par rapport aux besoins.

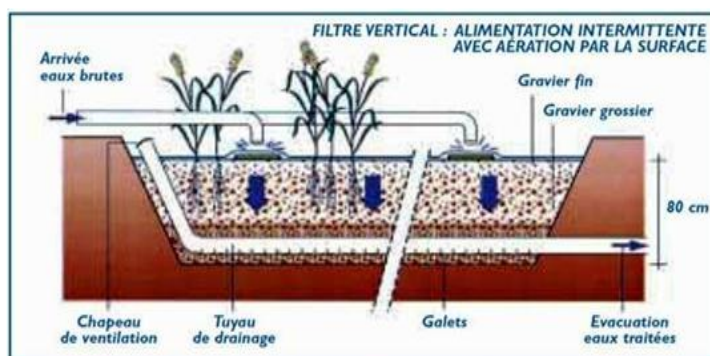


Fig 5.6 coupe transversale d'un filtre planté à écoulement vertical [11]

c- Les filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal

Dans les filtres à écoulement horizontal, le massif filtrant est quasi-totalement saturé en eau. L'effluent est réparti sur toute la largeur et la hauteur du lit par un système répartiteur situé à une extrémité du bassin ; il s'écoule ensuite dans un sens principalement horizontal au travers du substrat. La plupart du temps, l'alimentation s'effectue en continu car la charge organique apportée est faible.

L'évacuation se fait par un drain placé à l'extrémité opposée du lit, au fond et enterré dans une tranchée de pierres drainantes. Ce tuyau est relié à un siphon permettant de régler la hauteur de surverse, et donc celle de l'eau dans le lit, de façon à ce qu'il soit saturé pendant la période d'alimentation. Le niveau d'eau doit être maintenu environ à 5 cm sous la surface du matériau. En effet, l'eau ne doit pas circuler au-dessus de la surface pour ne pas court-circuiter la chaîne de traitement ; il n'y a donc pas d'eau libre et pas de risque de prolifération d'insectes.

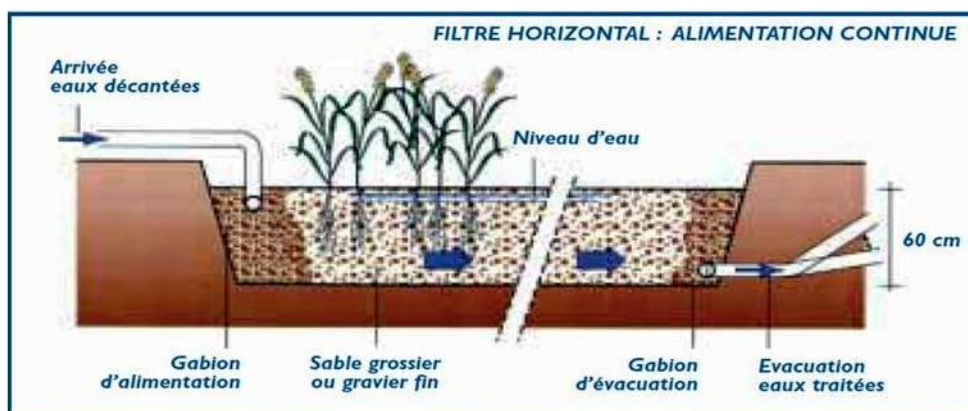


Fig 5.7 coupe transversale d'un filtre planté à écoulement horizontal [11]

1.3.2 Cultures libres

a-Lagunage naturel

L'épuration est assurée grâce à un long temps de séjour, dans plusieurs bassins étanches disposés en série. Le nombre de bassin le plus communément rencontré est de 3. Cependant, utiliser une configuration avec 4 voire 6 bassins permet d'avoir une désinfection plus poussée.

Le mécanisme de base sur lequel repose le lagunage naturel est la photosynthèse. La tranche d'eau supérieure des bassins est exposée à la lumière. Ceci permet l'existence d'algues qui produisent l'oxygène nécessaire au développement et maintien des bactéries aérobies. Ces bactéries sont responsables de la dégradation de la matière organique.

Le gaz carbonique formé par les bactéries, ainsi que les sels minéraux contenus dans les eaux usées, permettent aux algues de se multiplier. Il y a ainsi prolifération de deux populations interdépendantes : les bactéries et les algues planctoniques, également dénommées "microphytes". Ce cycle s'auto-entretient tant que le système reçoit de l'énergie solaire et de la matière organique.

En fond de bassin, où la lumière ne pénètre pas, ce sont des bactéries anaérobies qui dégradent les sédiments issus de la décantation de la matière organique. Un dégagement de gaz carbonique et de méthane se produit à ce niveau.

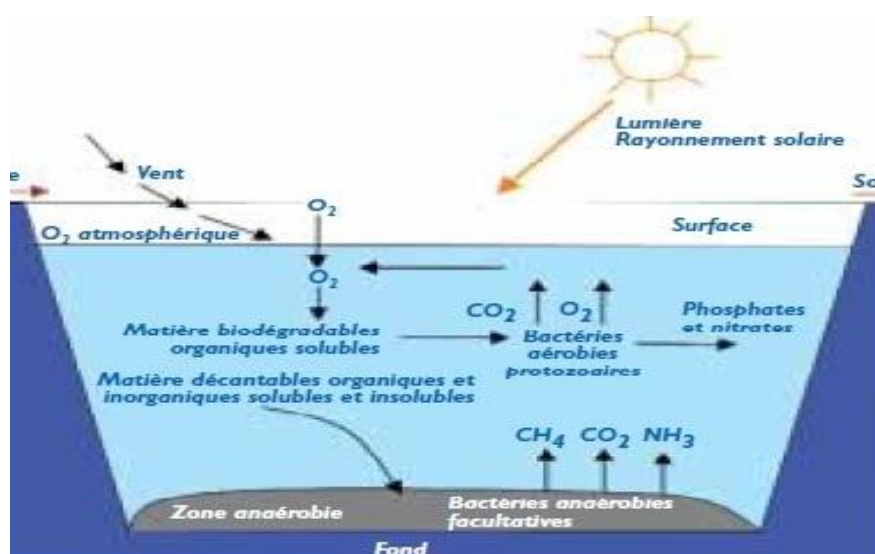


Fig 5.8 : Les mécanismes en jeu dans les bassins de lagunage naturel [11]

b-Lagunage à macrophytes

Il est caractérisé par la présence de plantes visibles à l'œil nu, il est constitué de plantes immergées ou émergées enracinées ou non telles que les roseaux, les massettes, les joncs, les scirpes, les laiches, les lentilles d'eau ou les jacinthes d'eau. Les bassins sont alors généralement de plus faible surface et moins profond (0.6 à 0.8m) ou la charge polluante est plus faible. Au delà de son intérêt esthétique, l'utilisation des macrophytes peut améliorer significativement la qualité de l'effluent mais leur biomasse ne produit guère de bénéfices supplémentaires. L'effet épuratoire est dû principalement à la faculté de ces plantes d'extraire les éléments nutritifs de la colonne d'eau et au support que leurs racines et feuilles offrent aux microorganismes susceptibles de dégrader les matières organiques et nitrifier l'azote ammoniacal. L'effet sur la dégradation de la matière organique passe principalement par la création d'une zone de rhizomes servant comme support pour le biofilm pouvant dégrader. Cet effet est cependant minimisé par la diminution de la réaération de la colonne d'eau. Par contre l'ombrage de l'eau dû à la présence des macrophytes diminue fortement la quantité de rayonnements UV qui atteignent l'eau et l'efficacité épuratoire vis-à-vis des espèces pathogènes indicatrices (coliformes et streptocoques). De plus l'utilisation des macrophytes entraîne une augmentation des coûts de fonctionnement du fait d'un entretien plus lourd (faucardage et arrachage).

c-Lagunage aéré

L'oxygénation est, dans le cas du lagunage aéré, apportée mécaniquement par un aérateur de surface ou une insufflation d'air. Ce principe ne se différencie des boues activées que par l'absence de système de recyclage des boues ou d'extraction des boues en continu. La consommation en énergie des deux filières est, à capacité équivalente, comparable (1,8 à 2 kW/kg DBO₅ éliminée).

2 Procédés bactériologiques (anaérobie)

2.2 Procédés bactériologiques (anaérobie)

La **digestion anaérobie** ou **méthanisation** est un processus biologique naturel qui, réalisé au sein de procédés maîtrisés, permet de traiter efficacement la pollution organique et de produire du **biogaz** dont le composé majoritaire, le **méthane**.

La méthanisation transforme la matière organique, sous forme soluble ou solide, conduisant à la formation de biogaz, mélange gazeux composé principalement de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂). Elle est réalisée en absence d'oxygène par une communauté microbienne diverse dans des écosystèmes naturels variés : les sédiments marins et d'eau douce, les tractus digestifs d'animaux, les décharges, les sols, etc. Elle est notamment à l'origine de phénomènes spontanés tels que les feux follets ou les émissions de gaz des marais.

• Décanteur-Digesteur

Le décanteur-digesteur assure :

- le dépôt des particules en suspension contenues dans les eaux usées préalablement prétraitées par simple séparation gravitaire,
- la digestion anaérobie de la fraction organique de ces dépôts progressivement accumulés.

Ces deux fonctions bien distinctes nécessitent la mise en œuvre de deux ouvrages physiquement séparés. Dans la majorité des cas, ces deux ouvrages sont superposés afin de réduire le génie civil et l'équipement. On dénomme l'ensemble "décanteur-digesteur" ou "fosse IMHOFF".

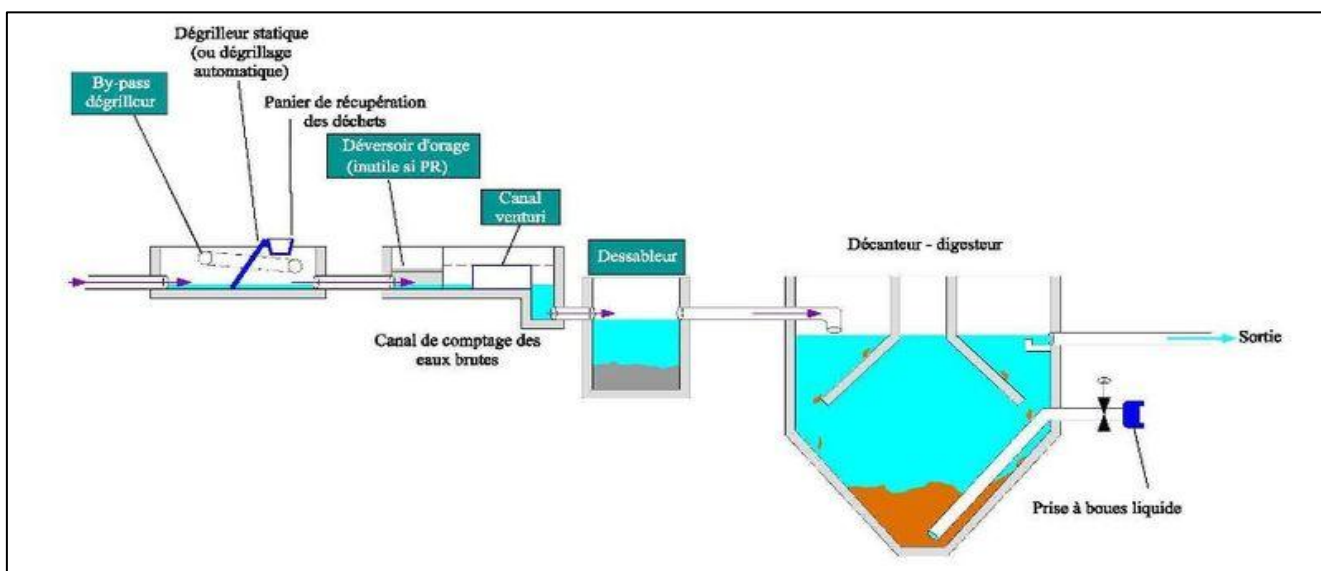


Fig 5.9 Schéma de principe de l'installation d'un Décanteur-Digesteur [12]

3. Comparaison entre les deux modes (Aérobie et anaérobie) :

Avantages :

- Pas d'équipement d'aération (faible consommation d'énergie 25%)
- faible besoin d'espace (2 à 5 fois moins qu'en aérobie)
- les boues n'ont pas besoin de stabilisation
- Traitement de fortes charges (1 à 30 g/l)
- Production de méthane pour fourniture d'énergie
- La biomasse peut demeurer sans alimentation en substrat jusqu'à 3 semaines
- besoin de peu d'éléments nutritifs ou de produits chimiques pour le fonctionnement
- adaptation des bactéries pour la destruction de nombreux produits toxiques.
- bonne efficacité obtenue dans la dépollution à débits élevés ;
- adaptation aux faibles températures
- simplicité et flexibilité du système
- faible production de boues (2 à 30 fois moindre qu'en traitement aérobie) ;

Inconvénients :

- Temps de séjour important (gros volume de réacteur requis)
- Mauvaises odeurs (H₂S)
- Températures élevées requises (350 C)
- Sédimentation de la biomasse anaérobie plus difficile que celle des boues activées (surface et coût plus élevés)
- Opération plus sensible aux chocs (charge, pH)
- Pour atteindre une bonne épuration, nécessité d'un traitement aérobie ultérieur
- Ensemencement long (8-12 semaines)
- Risque inhérent au biogaz (incendie explosion)
- Difficulté d'enlever les nutriments ou les cellules pathogènes
- longue période de démarrage

Références bibliographiques

- 1- MOUCHET, P, ROUSTAN, M (2011) : Composition et structure de la molécule d'eau
Caractéristiques et propriétés des eaux - Eau pure, eaux naturelles
<https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/eau-proprietes-qualite-valeurs-d-usage-42506210/caracteristiques-et-proprietes-des-eaux-w110/>
- 2- CHAUSSADE, J.L., PELLAY, M - Les 100 mots de l'EAU. - Que Sais-je ? PUF (2012)
<https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/eau-proprietes-qualite-valeurs-d-usage-42506210/proprietes-des-eaux-naturelles-g1110/>
- 3- Morgan Mozas & Alexis Ghosn (2013) : État des lieux du secteur de l'eau en Algérie, Ipemed. 27p
- 4- BOEGLIN, J-C (2001) : Propriétés des eaux naturelles
<https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/eau-proprietes-qualite-valeurs-d-usage-42506210/proprietes-des-eaux-naturelles-g1110/>
- 5- REJSEK F. (2002). Analyse de l'eau : Aspects et règlementaire et technique .Ed CRDP d'Aquitaine. France, 358 p.
- 6- GROSCLAUDE, G. (1999) : L'eau usages et polluants. Ed INRA, Paris 1999 Tome II.
- 7- RODIER, J., BAZIN, C., BROUTIN, J.P. CHAMBON P., CHAMPSAUR, H. et RODI, L. (2005) : L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Ed Dunod, Paris
- 8- ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE. (1989) : L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquiculture : Recommandations à visées sanitaires, série de rapports techniques 778, OMS, Genève.
- 9- BOEGLIN, J-C (2002) : Traitements physico-chimiques de la pollution soluble,
<https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/gestion-de-l-eau-par-les-industriels-42447210/traitements-physico-chimiques-de-la-pollution-soluble-g1271/>
- 10- BERLAND, J-M. JUERY, C (2002) : Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. FNDAE N°14. 71p.
- 11- Guide : Procédés extensifs d'épuration des eaux usées Office International de l'Eau, 2001
- 12- Procédés d'épuration des petites collectivités du bassin Rhin-Meuse (2007) cours Epuration 2018/F02_decanteur_digesteur.7p