

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Civil & Hydraulique

Polycopié de cours destiné aux étudiants en Licence Hydraulique

Traitement et Epuration des eaux



Elaboré par : Dr BOUMAAZA Messaouda (MCB)

2019/2020

Avant Propos

Ce polycopié répond au canevas ministériel de cours de Traitement et Epuration des eaux enseigné en troisième année S5_Licence LMD. À l'échelle mondiale, le traitement et l'épuration des eaux usées constituent le premier enjeu de santé publique. L'eau à l'état naturel nécessite un traitement dans des usines de production qui vont la rendre potable. Les eaux usées sont dépolluées dans les stations d'épuration, appelées également usines de dépollution en raison des traitements complexes qu'elles appliquent. La problématique des eaux usées est plus que jamais à l'ordre du jour, à cause des impacts néfastes de ces eaux usées sur le milieu naturel. Ces impacts sont de plus en plus grandissants en raison du développement industriel et de la croissance démographique.

Le but de ce polycopié est de fournir à l'étudiant l'ensemble des procédés visant à traiter non seulement l'eau potable mais aussi dépolluer l'eau usée avant son retour dans le milieu naturel dans un souci de protection des milieux récepteurs. Ce manuel couvre les différentes étapes de traitement de l'eau potable et d'épuration des eaux usées.

Les chapitres s'enchainent et forment un tout. Dans la première partie de l'ouvrage, on y trouve les informations indispensables sur les caractéristiques des eaux suivies des normes de potabilité, sur les différents traitements de clarification (coagulation, floculation, décantation et filtration) ainsi que les traitements complémentaires. Dans une deuxième partie, sont exposés les paramètres de pollution et les normes de rejet, les différentes étapes d'épuration des eaux usées notamment les prétraitements, traitement primaire et secondaire, et des traitements tertiaires.

La rédaction de ce polycopié est le fruit de lecture de nombreux ouvrages classiques et quelques documents électroniques. L'auteur remercie à l'avance les lecteurs qui voudront bien lui faire part des remarques et critiques que leur a inspirés la lecture de ce polycopié et souhaite que ce polycopié constituera un support utile pour nos étudiants nécessaire pour l'étude du traitement de l'eau potable et épuration des eaux usées.

Table des matières

Avant-propos

Introduction	1
---------------------------	---

Chapitre 1 : Généralités et normes		Page
1.1. Généralités.....		2
1.2. Caractéristiques des eaux naturelles.....		2
1.2.1. <i>Eaux souterraines</i>		2
1.2.2. <i>Eaux de surface</i>		3
1.3. Normes de qualité des eaux.....		4
1.4. Les principales étapes de production d'eau potable.....		6
Chapitre 2 : Traitement de clarification		
2.1. Introduction.....		8
2.2. La coagulation		9
2.2.1. Structure des colloïdes.....		9
2.2.2. <i>Elimination des colloïdes</i>		10
2.2.3. <i>Coagulants utilisés</i>		10
2.3. La floculation.....		11
2.4. La décantation.....		13
2.4.1. Décantation des particules grenues.....		13
2.4.2. Décantation des particules floculantes.....		13
2.5. Filtration.....		13
2.5.1. <i>Mécanismes de filtration</i>		13
2.5.2. <i>Critères de choix du type de filtration</i>		14
2.5.3. <i>Colmatage et lavage du matériau filtrant</i>		19
Chapitre 3 : Traitements complémentaires		
3.1. Désinfection.....		20
3.1.1. <i>Chloration</i>		20
3.1.2. <i>Dioxyde de chlore</i>		22
3.1.3. <i>Ozonation</i>		22
3.1.4. <i>Désinfection aux Ultraviolets</i>		23
3.1.5. <i>Stérilisation par filtration</i>		23
3.1.6. <i>Désinfection thermique de l'eau</i>		23
3.2. Avantages et inconvénients entre chlore - UV - ozone.....		24
3.2.1. Le chlore.....		24
3.2.2. <i>Ultraviolets</i>		24
3.2.3. <i>Ozonation</i>		24
3.2.4. <i>Recommandations de L'OMS</i>		25
3.3. Traitements d'absorption		25
3.4. Echange d'ions		25
3.4.1. <i>La régénération</i>		26
3.4.2. <i>Constitution des échangeurs d'ions</i>		26
3.4.3. <i>Avantages et inconvénients des différentes résines</i>		27
3.5. Déferrisation.....		28

3.5.1. Oxydation puis filtration.....	28
3.5.2. Traitement biologique.....	28
3.5.3. Traitement catalytique.....	28
3.6. Décarbonatation.....	29
3.6.1. La décarbonatation à la chaux ou à la soude.....	29
3.6.2. La décarbonatation sur résines échangeuses d'ions.....	29
3.7. Précipitation des composées anioniques : fluorures et phosphates.....	29
3.7.1. Elimination des fluorures.....	29
3.7.2. Elimination des phosphates.....	30
Chapitre I : Paramètres de pollution et normes de rejet	
I.1. Généralités sur les paramètres de pollution des eaux usées.....	31
I.1.1. Les paramètres physiques.....	31
I.1.2. Les paramètres chimiques.....	33
I.2. Evaluation des débits et de la charge polluante des eaux usées.....	36
I.2.1. Calcul des débits.....	37
I.2.2. Calcul des charges polluantes.....	38
I.3. Normes de rejet.....	40
Chapitre II : Les prétraitements	
II.1. Etapes de traitement d'une eau usée.....	41
II.2. Prétraitements.....	42
II.2.1. Le dégrillage.....	42
II.2.2. Dilacération.....	44
II.2.3. Tamisage.....	44
II.2.4. Dessablage.....	44
II.2.5. Dégraissage-déshuilage.....	46
Chapitre III : Traitements primaires	
III.1. Procèdes de décantation.....	47
III.1.1. Décantation des particules discrètes.....	47
III.1.2. Décantation des particules floculantes.....	48
III.1.3. Décantation freinée.....	48
III.2. Décantation avec des réactifs chimiques.....	51
III.3. Types de décanteur.....	52
III.3.1. Décanteur à flux horizontal.....	52
III.3.2. Décanteur à flux vertical.....	53
III.3.3. Clarificateurs à contact des boues (décanteurs-floculateur).....	54
Chapitre IV : Traitements secondaires	
IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Epuration biologique à biomasse suspendue (les boues activées).....	57
IV.2.1. Principe.....	57
IV.2.2. Classification.....	58
IV.3. Epuration biologique à biomasse fixée.....	60
IV.3.1. Le lit bactérien.....	60

IV.3.2. <i>Le disque biologique</i>	61
IV.3. Epuración biologique à biomasse libre	62
IV.3.1. <i>Epanchage</i>	62
IV.3.2. <i>Le lagunage</i>	63
Chapitre V : Traitements complémentaires	
V.1. Introduction.....	65
V.2. La nitrification et la dénitrification.....	65
V.2.1. <i>Rappels théoriques</i>	65
V.2.2. <i>Les réactions d'ammonification</i>	66
V.2.3. <i>Les réactions d'oxydation de l'ammoniaque</i>	66
V.2.4. <i>Les réactions de dénitrification</i>	66
V.3. La déphosphatation biologique.....	67
V.4. Elimination de l'ammoniac.....	67
IV.4.1. <i>Oxydation chimique</i>	68
IV.4.2. <i>L'échange ionique</i>	68
IV.4.3. <i>Le stripping</i>	69
IV.4.4. <i>La filtration biologique</i>	69
V.5. Stérilisation des eaux.....	70
Conclusion	71
Bibliographie	71

Introduction

La qualité de l'eau constitue un enjeu environnemental primordial. Les sources d'eaux peuvent être de mauvaise qualité en raison de problèmes d'origine naturelle et/ou anthropique. Le traitement de l'eau consiste à appliquer des procédés de traitement physiques, chimiques et biologiques, ces trois types de procédés étant nécessaires pour produire une eau de haute qualité et sans danger à partir de certaines sources (eau de surface ou souterrain). Depuis toujours l'eau, matière indispensable à la vie, est indissociable de l'activité humaine.

Le rejet des eaux usées chargées en substances polluantes dans l'environnement, sans aucun traitement préalable est un motif de préoccupation croissant compte tenu des effets indésirables qu'elles peuvent engendrer sur la santé humaine, la flore et la faune. Cependant, l'homme n'a jamais cessé de rechercher des moyens efficaces pour dépolluer ses multiples rejets. Selon la nature et l'importance de la pollution, différents procédés peuvent être mis en œuvre pour l'épuration des rejets industriels et urbains.

Le traitement des eaux usées est l'ensemble des procédés visant à dépolluer l'eau usée avant son retour dans le milieu naturel ou sa réutilisation. Les eaux usées sont les eaux qui à la suite de leur utilisation domestique, commerciale ou industrielle sont de nature à polluer les milieux dans lesquels elles seraient déversées. C'est pourquoi, dans un souci de protection des milieux récepteurs, des traitements sont réalisés sur ces effluents collectés par le réseau d'assainissement urbain. L'objectif des traitements est de réduire l'impact des eaux usées sur l'environnement.

A l'échelle mondiale, le traitement des eaux usées constitue le premier enjeu de santé publique : plus de 4 000 enfants de moins de 5 ans meurent chaque jour de diarrhées liées à l'absence de traitement des eaux et au manque d'hygiène induit. Les traitements peuvent être réalisés de manière collective dans une station d'épuration ou de manière individuelle. Dans la plupart des pays des volumes considérables d'eaux usées sont déversés sans le moindre traitement dans les cours d'eau, les fleuves, etc. Cet état de fait constitue un danger et une source de la pollution car le traitement des eaux usées constitue un autre volet de la gestion de l'offre et de ressources existantes, pouvant à la fois augmenter l'approvisionnement en eau et avoir d'importants effets écologiques dans la mesure où cette utilisation est soigneusement contrôlée.

Quel que soit le type de station d'épuration (boues activées ou lagunage), le principe est simple. Les matières polluantes sont dégradées grâce à un phénomène biologique naturel par les micro-organismes contenus dans les eaux usées et maintenus en quantité suffisante dans les stations où ils transforment la pollution en boues que l'on sépare de l'eau par décantation.

PARTIE 1 : TRAITEMENT DE L'EAU POTABLE

CHAPITRE 1 : GENERALITES ET NORMES

1.1 Généralités

L'eau constitue un élément essentiel dans la vie et l'activité humaine. C'est une composante majeure, l'eau participe à toutes les activités quotidiennes notamment, domestiques, industrielles et agricoles ce qui la rend un élément récepteur exposé à tous les genres de pollution. Le phénomène de la pollution contribue de façon considérable à la limitation des ressources en eau potable.

La dégradation de l'état de l'eau de consommation a différents impacts directs ou indirects sur la santé des populations humaines. Tout ceci oblige à faire de plus en plus appel à des eaux d'origines diverses et notamment les eaux de surface. Les insuffisances existantes dans la protection de ces eaux face aux nombreuses pollutions peuvent contribuer à la dégradation de la qualité de ces eaux et à l'augmentation de certains micropolluants minéraux et surtout organiques indésirables dans les eaux destinées à la consommation.

1.2 Caractéristiques des eaux naturelles

1.2.1 Eaux souterraines

De point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

- Nappes phréatiques ou alluviales : Peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus,

- Nappes captives : Plus profondes et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures.

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent `en général` aux normes de potabilité.

1.2.2 Eaux de surface

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par celles-ci durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. L'appréciation de la qualité des eaux de surface se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques, indicateurs d'une plus ou moins bonne qualité de l'eau. Ces données peuvent être complétées par l'analyse des sédiments (boues), qui constituent une "mémoire" de la vie de la rivière, notamment des épisodes de pollution par les métaux lourds, les polychlorobiphényles (PCB), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PCB) ou d'autres matières organiques non biodégradables. L'ensemble de ces éléments permet d'évaluer le degré de pollution des cours d'eau et d'apprécier leur capacité à s'auto épurer.

Une eau est dite potable quand elle satisfait à un certain nombre de caractéristiques la rendant propre à la consommation humaine. Pour être considérée comme potable, l'eau doit répondre à différents critères de qualités définis par le ministère de la santé. Une eau potable ne doit donc pas porter atteinte à la santé humaine. La présence de bactéries peut remettre en question la potabilité de votre eau (virus, parasites, agents pathogènes...). En outre, l'eau doit avoir un goût agréable, une couleur claire et ne pas avoir d'odeur. Le non-respect d'un de ces paramètres peut être le signe d'une eau impropre à la consommation. L'eau de votre robinet doit être raisonnablement minéralisée, avoir une couleur qui ne soit pas trouble. Le transport et les conditions climatiques (chaleur) ne doivent pas altérer ses qualités.

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (OD) est proche de la saturation, plus l'aptitude de la rivière à absorber la pollution est grande :

- Une valeur inférieure à 1 mg d'O₂ par litre indique un état proche de l'anaérobie. Cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible.
- une valeur de 1 à 2 mg d'O₂ par litre indique une rivière fortement polluée mais de manière réversible ;
- Une teneur de 4 à 6 mg d'O₂ par litre caractérise une eau de bonne qualité ;
- Des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense.

1.3 Normes de qualité des eaux

Les normes de l'eau potable sont établies par l'Organisation Mondiale de la Santé ou par l'Union Européenne. L'eau potable doit être exempte de matières en suspension, micro-organismes et produits toxiques. Les recommandations quant aux concentrations en minéraux varient de pays à pays avec toutefois pour la plupart des minéraux une concentration maximale afin de garantir une eau équilibrée et agréable à boire.

La production et la distribution de l'eau potable sont encadrées par une réglementation stricte qui impose des normes définissant la qualité exigible de l'eau destinée à la consommation humaine. La volonté première est de fournir à l'utilisateur une eau de qualité sanitaire, garantie contre tous les risques, immédiats ou à long terme, réels, potentiels ou même simplement supposés. Il s'agit ensuite d'offrir une eau de qualité organoleptique, agréable à boire, claire, inodore et équilibrée en sels minéraux. L'eau « propre à la consommation humaine » doit répondre à environ 70 critères de qualité répartis entre des limites de qualité et des références de qualité. Un critère donné est rempli lorsque la norme est respectée pour un paramètre donné.

Le but des analyses est de vérifier si l'eau répond bien aux critères exigés aussi bien l'eau du robinet, usée, qu'une eau de forage, de puits ou de surface (sources...). Pour l'analyse de potabilité de l'eau, nous observerons les paramètres suivants :

- **Les paramètres physico-chimiques** : concentration en chlorure, silice, calcium, potassium, magnésium, sodium, PH, dureté de l'eau, résidus secs, oxygène dissous, sulfates, conductivité, température, concentration en ions hydrogène.
- **Les substances indésirables** : hydrogène sulfuré, fer, manganèse, phosphore, cuivre, fluor, zinc, cobalt, ammonium, nitrites, nitrates, azote, baryum et argent, COT (carbone

organique total), hydrocarbures dissous, chlore libre résiduel, phénol, bore, détergents, organochlorés, matières en suspension, oxydabilité. Attention cependant à la paranoïa car certaines de ces substances peuvent être bénéfiques pour l'organisme à très petite dose.

- **Les paramètres organoleptiques (turbidité, saveur, odeur, couleur)** : on cherchera à observer la limpidité de l'eau, sa couleur, son odeur, sa saveur et sa fraîcheur. Ce sont tous les éléments qui ont attiré aux organes sensoriels.
- **Les substances toxiques** : plomb, chrome, cyanure, arsenic, béryllium, pesticides, nickel, mercure, hydrocarbures...
- **Les paramètres microbiologiques** : coliformes et streptocoques fécaux, clostridium sulfitoréducteurs. Il s'agit de germes capables de se maintenir très longtemps dans l'eau sous forme végétative. Ils sont étudiés afin de détecter la présence d'une pollution plus ancienne et sont également de très bons révélateurs de l'efficacité d'une désinfection de l'eau.

Afin de savoir si l'eau est réellement potable, il convient de savoir que des normes existent en matière de qualité de l'eau se trouvant dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 1.1 : Paramètres avec valeurs indicatives (Normes algériennes du ministre des ressources en eau depuis 22 mars 2011) :

GROUPE PARAMETRE	DE	Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux		PH	Unité pH	≥ 6.5 et ≤ 9.5
		Conductivité	$\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C	2800
		Température	°C	25
		Dureté	mg/l en CaCO ₃	200
		Alcalinité	mg/l en CaCO ₃	500
		Calcium	mg/l en CaCO ₃	200
		Chlorures	mg/l	500
		Potassium	mg/l	12
		Résidu sec	mg/l	1500
		Sodium	mg/l	200
Paramètres organoleptiques		Couleur	mg/l Platine	15
		Turbidité	NTU	5
		Odeur 12°C	Taux dilution	4
		Saveur 25°C	Taux dilution	4

Tableau 1.2: Paramètres microbiologiques (Normes algériennes du ministre des ressources en eau depuis 22 mars 2011) :

Groupe de paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs limites
Paramètres microbiologiques	Escherichia Coli	nb /100ml	0
	Entérocoques	nb /100ml	0
	Bactéries sulfite réductrices y compris les spore	nb/20ml	0

1.4 Les principales étapes de production d'eau potable

Avant d'être distribuée aux usagers, l'eau brute issue des captages doit être rendue potable. Les traitements nécessaires sont réalisés dans des stations de production d'eau potable qui n'effectuent pas toutes le même travail. Les traitements doivent pouvoir répondre à une

modification temporaire récurrente de la qualité de l'eau, comme le développement d'algues ou l'augmentation de la turbidité (aspect trouble de l'eau chargée de matières en suspension).

Selon la qualité de l'eau prélevée, la production d'eau potable nécessite des étapes différentes faisant appel à quatre types de procédés : physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques (**Figure 1.1**).

Un traitement d'une eau destinée à la consommation suit généralement les étapes suivantes

- ✓ Prétraitement ;
- ✓ Traitement primaire ;
- ✓ Traitement secondaire (physico chimique) ;
- ✓ Traitement tertiaire.
- ✓ Filtration sur sable
- ✓ Chloration.

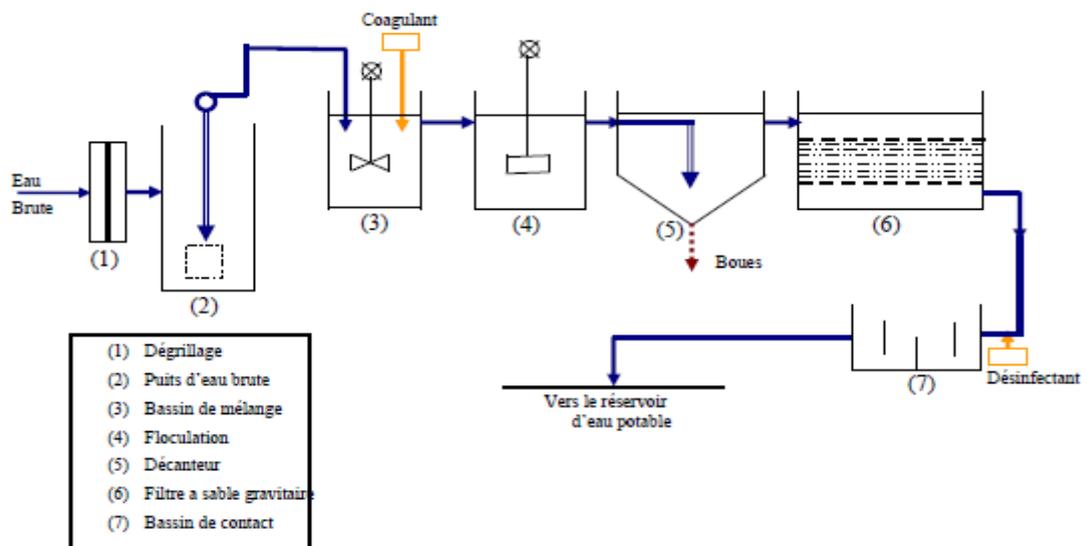


Figure 1.1 : Station de traitement de l'eau potable

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DE CLARIFICATION

2.1. Introduction

C'est une étape indispensable pour les eaux de surface et les eaux souterraines karstiques. Elle permet d'obtenir une eau limpide par élimination des matières en suspension et des colloïdes, et donc de la turbidité. Les impuretés solides fréquemment en suspension dans les eaux de surfaces peuvent être:

- Soit chimiquement et biologiquement neutres (argiles et limons, qui constituent la turbidité, colloïdes qui donnent une couleur indésirable) mais désagréable au goût et à la vue;
- Soit nuisibles (déchets, corps organiques en voie de transformation).

La clarification est l'ensemble des opérations qui permettent d'éliminer les MES (minérales et organiques) d'une eau brute ainsi qu'une partie des matières organiques dissoutes (fraction "floculable"). Suivant les concentrations de l'un et l'autre des différents polluants, on peut être amené à pratiquer des opérations de plus en plus complexes qui vont de la simple filtration avec ou sans réactif jusqu'à la coagulation – floculation – décantation ou flottation – filtration.

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation en ajoutant des réactifs.

On aura ainsi deux phases :

- phase chimique : ajout des réactifs :
- phase physique : séparation des solides de l'eau à traiter : phase de décantation.

En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion de produits chimiques. La floculation a pour but de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on pourra facilement éliminer par décantation.

2.2. 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 sont des particules très petites qui ne peuvent pas s'agglomérer naturellement.

2.2.1. 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. 2.1).

On en 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 FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$ pour déstabiliser les particules et ainsi faciliter leur agglomération.

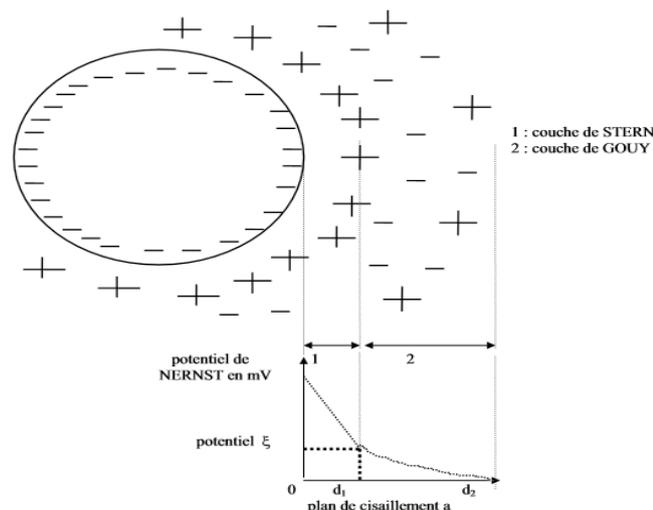


Figure. 2.1 : Distribution du potentiel électrique autour d'un colloïde chargé négativement

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.

2.2.2. 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.

2.2.3. Coagulants utilisés

Réactifs utilisés

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et produire des floccs sont :

- le sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3, 18 H_2O$
- l'aluminate de sodium $NaAlO_2$
- le chlorure ferrique $FeCl_3, 6 H_2O$
- le sulfate ferrique $Fe_2(SO_4)_3, 9 H_2O$
- le sulfate ferreux $FeSO_4, 7 H_2O$.

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' $\text{Al}(\text{OH})_3$. Cette réaction dépend de l'agitation du milieu. Ce précipité est l'élément qui assure la coalescence des colloïdes déstabilisés : c'est la forme floculante.

2.3. 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.

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. 2.2**):

- 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. 2.2: 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.

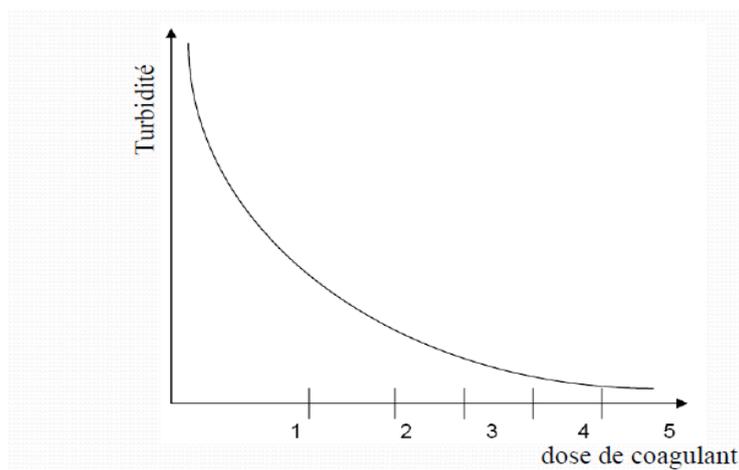


Figure. 2.3 : Turbidité en fonction de la dose du coagulant

2.4. La décantation

Les particules en suspension, dont la densité est supérieure à celle de l'eau, sédimentent sous l'influence de leur propre poids et s'accumulent au fond de l'ouvrage. L'eau décantée est collectée en surface. Le moteur de cette séparation est donc la gravité.

On distingue deux types de décantation :

- décantation des particules grenues (MES)
- décantation des particules floculantes (flocs).

2.4.1. Décantation des particules grenues

Ce type de décantation est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales : forme, dimension et densité. La vitesse de chute de la particule est indépendante de la concentration en solides, et augmente jusqu'à ce que la force de décantation (poids) s'équilibre avec les forces de frottement : la vitesse de sédimentation est donc constante.

2.4.2. Décantation des particules floculantes

Durant la décantation, les particules s'agglomèrent à un certain rythme formant ainsi des particules de dimension et de densité qui augmentent. La vitesse de chute de la particule varie au cours de la décantation et ne dépend que de la concentration locale en particules

2.5. Filtration

La filtration est un procédé physique de séparation d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux constitué d'un matériau granulaire, qui retient les particules et laisse passer le liquide. Ce procédé est destiné à clarifier un liquide qui contient des matières en suspension (MES). La rétention des fines particules qui subsistent après la décantation se déroule à la surface des grains grâce à des filtres.

2.5.1. Mécanismes de filtration

Trois mécanismes principaux interviennent successivement : capture, fixation et détachement. Leur importance dépend des caractéristiques des particules à retenir et du matériau filtrant mis en œuvre.

II.5.1.1. Mécanismes de capture

Ils sont essentiellement de deux natures :

- **tamissage mécanique** : il s'agit de la rétention des particules plus grosses que la maille du filtre ou que celle des éléments déjà déposés formant eux-mêmes matériau filtrant. Ce phénomène intervient d'autant plus que la maille du matériau filtrant est plus fine : il est de peu d'importance pour un lit filtrant composé de matériau relativement grossier ;
- **Rétention dans les espaces inter granulaires** : la taille de la particule comparée à celle des pores, pourrait lui permettre de traverser le matériau filtrant sans être arrêtée et pourtant, lors de sa trajectoire tortueuse dans le lit, des zones de moindre courant et des contacts particule/matériau vont permettre sa capture. C'est un mécanisme très important dans la filtration en profondeur.

II.5.1.2. Mécanismes de fixation

La fixation des particules à la surface du matériau filtrant est favorisée par une faible vitesse d'écoulement. Elle est due à des forces d'origine physique (coincement, cohésion...) et à des forces d'adsorption, principalement les forces de Van der Waals.

II.5.1.3. Mécanismes de détachement

Sous l'action des mécanismes précédents, il se produit une diminution de l'espace entre les parois du matériau recouvertes de particules déjà déposées. Il y a alors augmentation de la vitesse d'écoulement inter granulaire. Les dépôts déjà retenus peuvent alors se détacher partiellement et être entraînés plus avant dans le matériau filtrant.

2.5.2. Critères de choix du type de filtration en fonction de la qualité d'eau et du prétraitement

Le tableau présenté ci-après indique les domaines possibles d'application des différents types de filtration (filtration rapide conventionnelle, directe ou en ligne, filtration lente) en fonction de certaines caractéristiques de l'eau brute. Ce tableau est donc valable pour les eaux superficielles.

Tableau. 2.1: Types de filtration

Prétraitement avant filtration	Type de filtration	Turbidité (NTU)	Couleur (CU)	Algues (unités/ml)	Coliformes totaux (100 ml)
Coagulation-floculation-séparation (a)	Filtration rapide mono ou bicouche	Pas de restriction	<75	Pas de restriction	<5000
Coagulation-floculation	Filtration rapide mono ou bicouche	< 15	<40	< 1 000	<500
Coagulation-contact	Filtration rapide mono ou bicouche	<15	<20	< 1 000	<500
Coagulation directe	Filtration rapide mono ou bicouche	<15	<20	< 1 000	<500
Aucun (b)	Filtration lente	< 10	<5	<200	<800

(a) : préfiltration, décantation ou flottation,

(b) : éventuellement un prétraitement par micro tamisage si beaucoup d'algues.

2.5.2.1. Filtration sur support granulaire

La plus ou moins grande facilité de fixation dépend du type de matériau utilisé et des conditions d'utilisation du filtre. L'espace inter granulaire définit la capacité de rétention du filtre qui diminue au cours du passage de l'eau. Les pertes de charge augmentent avec le temps, il faut déclencher le lavage du filtre. Une biomasse se développe généralement sur le matériau filtrant et peut efficacement réduire le taux d'ammonium par nitrification. La filtration, précédée d'une (une coagulation - floculation - décantation permet d'obtenir une bonne élimination des bactéries, de la couleur, de la turbidité et indirectement de certains goûts et odeurs issus de MES de petite taille. Pour le traitement des eaux potables on distingue :

- ❖ **Les filtres à sable rapides** : les plus utilisés en eau potable avec des vitesses de 5 à 10 m/h, ils s'appliquent à des eaux préalablement traitées. La filtration rapide par le sable est un processus physique qui enlève les solides en suspension dans l'eau. Cette filtration rapide est beaucoup plus répandue parce que les filtres de sable rapide ont des débits assez élevés et exigent peu d'espace pour fonctionner. Durant la filtration, le taux d'écoulement

de l'eau peut aller jusqu'à 20 mètres par heure. Les filtres sont généralement nettoyés 2 fois par jour.

- ❖ **Les filtres à sable lents** : la filtration lente (0,08 à 0,4 m/h) constitue à elle seule un traitement quasi complet de l'eau brute, grâce au développement d'une biomasse importante. La filtration lente par le sable est un processus biologique parce qu'elle emploie des bactéries pour traiter l'eau. Les bactéries forment une couche sur la partie supérieure du sable et nettoie l'eau pendant qu'elle traverse, en digérant les contaminants dans l'eau. La couche de bactéries s'appelle le biofilm. Des systèmes de filtration lente de sable ont été employés pendant beaucoup d'années.
- ❖ **Les filtres sous pression** : Le principe de fonctionnement est le même que celui des filtres rapides. Le plancher et le matériel filtrant sont situés dans des cylindres supportant des pressions allant jusqu'à 1 000 kPa. Leur exploitation est plus difficile que celle des filtres ouverts. Leur utilisation est limitée aux petites installations.
- ❖ **Les filtres à terre de diatomée** : Ils permettent une bonne clarification des eaux de turbidité faible et éliminent efficacement les MES et les microorganismes, sans nécessité de coagulation. Pour des eaux plus chargées, ils se colmatent très rapidement. Les filtres sous pression et à terre de diatomées sont surtout utilisés pour le traitement des eaux des piscines
- ❖ **Adsorption sur Charbon actif** : Le charbon actif fait partie d'une gamme de substances présentant une grande porosité et une surface spécifique importante (500 à 1500 m² /g). Ces particularités lui confèrent un grand pouvoir d'adsorption. Ce procédé physico-chimique est utilisé dans les filières d'eau potable pour retenir les substances impossibles à éliminer par un traitement classique. Les composés retenus sont appelés adsorbats tandis que le charbon est l'adsorbant. Initialement on l'utilisait pour améliorer les qualités organoleptiques de l'eau (goût, odeur, couleur). De nos jours on l'utilise pour éliminer les micropolluants organiques (phénols, hydrocarbures, pesticides, détergents) et certains métaux lourds. Il est également possible de l'utiliser comme catalyseur de déchloration. Les filtres à charbon actif ont une construction similaire à celle des filtres à sable, on dispose le charbon actif en lit et on filtre l'eau polluée. Ceux-ci sont utilisés pour filtrer

la matière organique ou les métaux lourds. Le charbon actif doit être remplacé de façon régulière, il peut parfois être régénéré.

2.5.2.2. Filtration sur membranes :

De nos jours, les limites des traitements conventionnels en termes de turbidité, de qualité bactériologique, de goût et de sous-produits de désinfection semblent atteintes, et donc les procédés membranaires, beaucoup plus performants, paraissent devoir s'imposer.

Une membrane est une paroi mince, qui oppose une résistance sélective au transfert de certains constituants d'une solution. Elle sépare donc les espèces moléculaires ou ioniques présentes dans la solution. Le seuil de coupure est la taille de la plus petite particule rejetée par la membrane. Plus le pouvoir de coupure est important plus il faut appliquer de pression sur la membrane pour vaincre la résistance qu'elle oppose au passage de l'eau.

Les membranes sont fabriquées avec des matériaux organiques ou minéraux. Les premières membranes organiques étaient à base de dérivés cellulosiques ou de polyamides aromatiques. Les matériaux actuellement utilisés (polypropylène, poly acrylonitrile,...) sont plus résistants. Les membranes organiques sont préparées par évaporation d'un mélange de polymère et de solvant (collodion). Elles sont sensibles aux pH extrêmes, surtout acides, et aux élévations de température. Les membranes minérales sont mises en forme par une agglomération de poudre minérale sous pression, à une température donnée (frittage). La mise en place de couches de granulométries décroissantes permet de régler la taille des pores. Les membranes se présentent fréquemment sous forme plane enroulée sur elles-mêmes en spirale ou en fibres creuses garnissant des cartouches. Cette organisation permet d'appliquer des pressions de fonctionnement adapté et de pouvoir effectuer des rétro lavages lorsque les membranes colmatent.

Une préfiltration qui bloque les impuretés susceptibles de colmater trop rapidement les membranes. Suivant les seuils de coupure et les pressions de fonctionnement on distingue :

Microfiltration (MF) :

La MF atteint le domaine des particules en suspension de diamètre voisin de 50 nm. Les MES, les colloïdes et les bactéries sont rejetés. La MF est bien adaptée au traitement des eaux souterraines à forte turbidité occasionnelle, comme les eaux karstiques. Elles sont issues du

ruissellement à travers des terrains calcaires fissurés et sont très sensibles aux conditions météorologiques. A l'occasion des pluies, les paramètres tels que la turbidité, la quantité de matières organiques et les bactéries atteignent des valeurs élevées. Les traitements classiques ne peuvent répondre efficacement à ces modifications trop rapides. La MF se substitue efficacement à la clarification. La réduction de la turbidité, de la micropollution minérale et bactérienne est remarquable.

Ultrafiltration (UF) :

La porosité de la membrane va de 50 à 2 nm. L'ultrafiltration permet la rétention de la totalité des particules en suspension et des micro-organismes, virus compris, mais elle n'élimine pas les micropolluants. Les ions sont en partie retenus en amont de la membrane.

L'UF peut être associée avec le charbon actif en poudre, CAP, dans ce cas l'élimination du Carbone Organique Total, des pesticides et l'amélioration des qualités organoleptiques sont remarquables par rapport à la méthode conventionnelle (clarification, Charbon Actif en Grain, ozone).

Nanofiltration (NF) :

Elle est définie par un seuil de coupure de 500 daltons, soit un diamètre équivalent des pores de 1 nm. La NF est très efficace pour éliminer les petites molécules dissoutes comme les pesticides, les acides humiques précurseurs d'organochlorés et le carbone organique dissous biodégradable (CODB). La demande en chlore est ainsi nettement diminuée. La NF est bien adaptée à la désulfatation et à l'adoucissement.

Osmose inverse (OI) :

L'OI permet d'éliminer quasiment tout composé de l'eau. En effet le passage global en sels est très faible (typiquement 1,5 %). Les pressions de service vont de 15 à 80 bars. Les membranes généralement utilisées sont en polyamide non biodégradable de porosité 0,2 nm. Les prétraitements peuvent être, dans certains cas, très poussés pour éviter toute détérioration de la membrane.

2.5.3. Colmatage et lavage 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 mce, 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.

CHAPITRE 3 : TRAITEMENTS COMPLEMENTAIRES

3.1. Désinfection

La plupart des microorganismes pathogènes est éliminée de l'eau lors de la première étape de purification de l'eau. Cependant, la désinfection de l'eau est encore nécessaire afin d'empêcher que l'eau potable soit nocive pour notre santé. La désinfection est un traitement qui permet d'éliminer les microorganismes susceptibles de transmettre des maladies.

Il existe de plusieurs méthodes de désinfection de l'eau. Celles-ci font appel soit à un processus physique (ultrafiltration, traitement UV...), soit à un processus chimique mettant en œuvre une réaction d'oxydation, qui peut être obtenue par ozonation ou par chloration.

Voici un aperçu des différentes méthodes de désinfection de l'eau :

3.1.1. Chloration

La chloration est le procédé de désinfection le plus répandu au monde, permet d'éliminer de façon simple et à faible coût la plupart des microbes, bactéries, virus et germes responsables de maladies comme la dysenterie, la typhoïde et le choléra. La chloration est un moyen simple et efficace pour désinfecter l'eau en vue de la rendre potable. Elle consiste à introduire des produits chlorés (pastilles de chlore, eau de javel,...) dans de l'eau pour tuer les microorganismes qu'elle contient. Après un temps d'action d'environ 30 minutes, l'eau est normalement potable. Elle le reste pendant quelques heures ou jours (en fonction des conditions de stockage) grâce à l'effet rémanent du chlore. L'efficacité de la chloration dépend beaucoup de la valeur du pH de l'eau. L'odeur et le goût peuvent avoir tendance à se dégrader et des sous-produits indésirables comme des substances organochlorées sont susceptibles de se former, surtout dans les eaux chargées en substances organiques.

Absorption du chlore

Une partie importante du chlore étant nécessaire pour neutraliser ces matières organiques, il n'en reste cependant qu'une partie, appelée chlore résiduel libre, pour traiter la contamination éventuelle ultérieure de l'eau dans le réseau ou les habitations. La concentration en chlore libre de l'eau traitée doit être selon l'OMS de 0,2 à 0,5 mg/l. Il faut donc utiliser assez de chlore pour qu'il en reste assez une fois l'eau traitée, sauf consommation immédiate.

Le chlore injecté réagit d'abord avec les matières facilement oxydables (fer, manganèse...), puis avec la matière organique pour former des mono-, di-, puis trichloramine qui sont alors détruits. Le chlore injecté au-delà du point critique (*break point*) sera du chlore libre actif : le chlore rémanent, qui exerce un effet de désinfection dans le temps (**Figure. 3.1**).

La dose de chlore introduite doit être suffisante pour oxyder tous les composés présents dans l'eau. S'il n'y a pas assez de chlore, on formera des mono-, di-, trichloramines peu souhaitables dans l'eau et possédant un faible pouvoir de désinfection.

Pour connaître la dose de chlore à injecter, il faut introduire dans différents récipients remplis d'une même quantité d'eau, une dose croissante de chlore. La mesure du chlore résiduel (chlore total) après environ 30 minutes donne la courbe d'absorption du chlore.

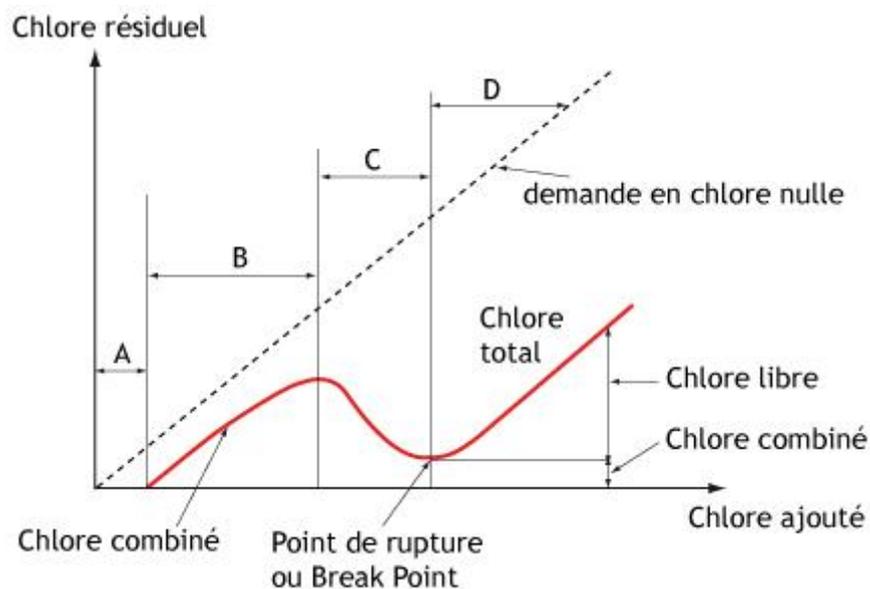


Figure. 3.1 : Courbe d'absorption du chlore

A : destruction du chlore par les composés minéraux (fer, manganèse...);

B : formation de composés chlorés organiques et de chloramines, réduction des monochloramines et des dichloramines, formation des trichloramines;

C : destruction des chloramines par ajout de chlore supplémentaire; Point de rupture (break point) : les mono-, di et trichloramines ont pratiquement disparu;

D : production de chlore actif. Tout le chlore ajouté sera sous forme d'acide hypochloreux (HClO), mais il reste du chlore combiné (trichloramines et autres sous-produits de désinfection). Les trichloramines ont un très léger effet désinfectant, mais ils donnent un goût de chlore à l'eau.

3.1.2. Dioxyde de chlore

Le dioxyde de chlore est un produit oxydant, reconnu pour ses facultés virucides, bactéricides, fongicides et antiseptiques. Il dispose en outre d'un pouvoir rémanent dans l'eau, meilleur que le chlore, et contrairement à celui-ci, le pH n'a pas d'influence sur son efficacité. De même, il ne conduit pas à la formation de composés organo-halogénés indésirables ou autres sous-produits formés par les désinfectants.

L'une des caractéristiques particulières du dioxyde de chlore est sa complète solubilité dans l'eau et se diffuse donc très facilement dans les réseaux d'eau. Il peut ainsi pénétrer dans les couches de bactéries qui constituent le biofilm et détruire ces systèmes dans leur totalité. Il empêche sa reformation car il reste actif plusieurs heures dans le système de distribution d'eau. Il permet également de supprimer les composés organiques présents dans l'eau, tels que le Manganèse ou le Fer, grâce à son pouvoir oxydant. Pour le traitement de l'eau potable, il présente l'avantage de n'avoir ni goût ni odeur une fois dilué dans l'eau, contrairement au chlore. L'usage du dioxyde de chlore pour le traitement de l'eau se démocratise grâce à la reconnaissance de son efficacité contre les micro-organismes pathogènes.

3.1.3. Ozonation

L'ozone est le plus puissant oxydant et désinfectant existant pour épurer de l'eau. Son principal avantage : il ne produit aucun dérivé indésirable et se transforme en oxygène. Son inconvénient : il présente une courte durée de demi-vie et une mauvaise solubilité dans l'eau.

Généralement, il est recommandé d'utiliser l'ozone pour la pré-oxydation, avant un filtre à sable ou un filtre à charbon actif (GAC). Après l'ozonisation, ces filtres peuvent éliminer la matière

organique restante (important pour une désinfection finale). Cette combinaison a plusieurs avantages:

- L'élimination de la matière organique et inorganique
- L'élimination des micropolluants, tels que les pesticides
- L'amélioration du procédé floculation/coagulation-décantation
- L'amélioration de la désinfection et la réduction des sous-produits de désinfection.
- L'élimination des goûts et des odeurs.

3.1.4. Désinfection aux Ultraviolets

L'eau à désinfecter est exposée à des rayonnements ultraviolets à ondes courtes. Les germes sont ainsi éliminés de manière sûre sans modification des propriétés de l'eau. Le système de décontamination de l'eau par UV possède de nombreux avantages. Le plus intéressant est que la désinfection s'accompagne de la formation d'aucun produit de réaction avec les matières organiques de l'eau. L'utilisation de l'appareil est simple. La désinfection par rayons ultraviolets est utilisée entre autres pour le traitement de l'eau potable et des eaux usées ainsi que pour le traitement de l'eau dans l'industrie.

3.1.5. Stérilisation par filtration

En raison de son coût élevé, la stérilisation par filtration est utilisée principalement dans le domaine médical et pharmaceutique. Cette méthode nécessite des membranes d'ultrafiltration avec des pores $< 0,5 \mu\text{m}$ qui doivent être désinfectées à intervalles réguliers. De simples ultrafiltres sont également utilisés dans de petits filtres d'eau potable pour les besoins domestiques. Toutefois, des germes peuvent toujours se développer dans le filtre. Même la stérilisation par l'argent du filtre n'offre avec le temps aucune garantie contre la prolifération de germes.

3.1.6. Désinfection thermique de l'eau

La désinfection thermique est une méthode sûre qui ne dépend pas de la qualité de l'eau. Comme cette méthode nécessite beaucoup d'énergie et un coût élevé pour monter la température de l'eau à 75°C au moins, elle est principalement utilisée pour combattre les légionnelles dans les systèmes à eau chaude. Elle est également adoptée pour désinfecter les eaux usées issues des laboratoires de microbiologie et dans les secteurs dits critiques des établissements hospitaliers.

3.2. Avantages et inconvénients entre chlore - UV - ozone

3.2.1. Le Chlore

Le chlore est un désinfectant puissant, traditionnellement utilisé pour le traitement de l'eau potable municipal (**Tableau. 3.1**).

Tableau. 3.1 : Avantages et inconvénients du chlore.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> Investissement plus faible que pour un système d'ozonisation 	<ul style="list-style-type: none"> Le chlore donne un goût caractéristique à l'eau Certains dérivés chlorés sont dangereux
<ul style="list-style-type: none"> Système très simple: il suffit d'utiliser une pompe à injection ou un injecteur venturi pour mélanger du chlore avec l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> L'installation nécessite le transport et le stockage de produit toxique L'efficacité du chlore dépend du pH de l'eau

3.2.2. Ultraviolet

L'eau est soumise à un rayonnement ultraviolet à une longueur d'onde ayant un pouvoir biocide (**Tableau. 3.2**).

Tableau. 3.2: Avantages et inconvénients du rayonnement ultraviolet.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> Le système est bon économique à l'investissement et à l'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> Les U.V. inactivent mais n'éliminent pas les bactéries. L'eau doit donc être consommée directement après traitement
<ul style="list-style-type: none"> Il n'y a pas de stockage de produit chimique; le traitement ne laisse aucun dérivé dans l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> Les particules dans l'eau stoppent les rayons U.V. et diminuent l'efficacité du traitement

3.2.3. Ozonisation

L'ozone, molécule composée de trois atomes d'oxygène, possède un pouvoir désinfectant très grand (plus efficace que le chlore). Il est instable et se décompose naturellement en oxygène (**Tableau. 3.3**).

Tableau. 3.3: Avantages et inconvénients de l'ozonisation.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
• L'ozone se décompose en oxygène, sans laisser de produits dérivés dans l'eau	• La production d'ozone consomme de l'énergie
• L'ozone est produit sur place (pas de transport de produits toxiques ni de consommable à changer régulièrement)	• Le système est assez complexe
	• Certains matériaux ne sont pas résistants à l'ozone
	• Ce système demande un investissement de départ important

3.2.4. Recommandations de L'OMS :

- Pas d'*Escherichia coli* ni de coliformes totaux par 100 ml d'eau potable.
- quantité de chlore résiduel supérieure à 0,5 ;
- temps de contact de 30 minutes ;
- pH inférieur à 8 ;
- turbidité inférieure à 1 UTN.

3.3. Traitement d'absorption :

L'absorption est l'un des moyens de traitement mis à la disposition du traiteur d'eau pour éliminer les matières organiques non dégradables dissoutes biologiquement. Les dispositifs de traitement par adsorption ajoutent une substance nettoyante directement à l'arrivée d'eau ou dans un bassin de mélange. L'adsorbant le plus répandu est le charbon actif, assez similaire au charbon ordinaire. Le charbon actif est traité par chaleur ou par oxydation, il devient extrêmement poreux et peut absorber ou retenir les impuretés de l'eau. Il attire non seulement les contaminants connus mais aussi de la matière organique dissoute naturellement. Le charbon actif est principalement employé sous deux formes, charbon actif en granulés (CAG) et charbon actif en poudre (CAP).

3.4. Echange d'ions :

L'échange d'ions est un procédé par lequel une résine attire, dans certaines conditions, un ion positif ou négatif d'une solution pour rejeter un autre ion de même signe. La plupart des résines sont fabriquées à partir d'un polymère. Elles ont l'aspect de granules ou de billes. L'échange d'ions est la base de procédés utilisés pour des usages bien précis comme l'adoucissement de l'eau. L'action des résines pouvant être perturbée par toutes sortes d'impuretés, il faut :

- d'une part que l'eau à traiter ne contienne pas de solides en suspension et que sa turbidité soit faible;
- d'autre part que la régénération des résines soit assurée avec un sel (chlorure de sodium) d'une grande pureté.

On peut les classer en 2 catégories :

- Résines échangeuses de cations qui échangent des cations (calcium, magnésium, radium)
- Résines échangeuses d'anions. qui éliminent des anions (nitrate, arséniate, arsénite ou chromate). Dans les deux cas, on les renouvelle avec une solution de sel (chlorure de sodium).

L'adoucissement de l'eau consiste à échanger les ions calcium et magnésium contre les ions sodium fixés sur la résine. Lorsqu'il n'y en a plus, il faut recharger la résine. Cette phase de régénération est essentielle. La solution obtenue à partir de chlorure de sodium assure un échange ionique inverse.

Un adoucisseur comportant des résines échangeuses d'ions permet de réduire la dureté de l'eau qui résulte de la présence d'ions calcium et magnésium. Elle se mesure par son titre hydrotimétrique (TH) exprimé en °f. Par exemple, 1°Fcorrespond à Ca^{+2} 4,008 mg. Une eau dont le titre se trouve entre 15 et 25°Fmérite d'être adoucie. Au-delà de 25°F, l'adoucissement est fortement conseillé.

Ce traitement fonctionne au mieux dans une eau débarrassée des particules en suspension qui peuvent s'agglutiner sur la résine et limiter son efficacité.

3.4.1. La régénération

Les résines accumulent les contaminants. Pour cette raison, elles doivent être régulièrement nettoyées avec une solution qui recharge les ions inoffensifs échangeables.

- Echangeurs cationiques : à l'aide d'un acide minéral tels que l'acide chlorhydrique ou l'acide sulfurique.
- Echangeurs anioniques : généralement à l'aide de la soude

3.4.2. Constitution des échangeurs d'ions

Les échangeurs d'ions actuels sont essentiellement à base de polystyrène ou de polyacrylate réticulés, c'est-à-dire de matières synthétiques de polymérisation fabriquées sous forme de billes (diamètre de 0,3 à 1,2 mm) (**Figure. 3.2**).

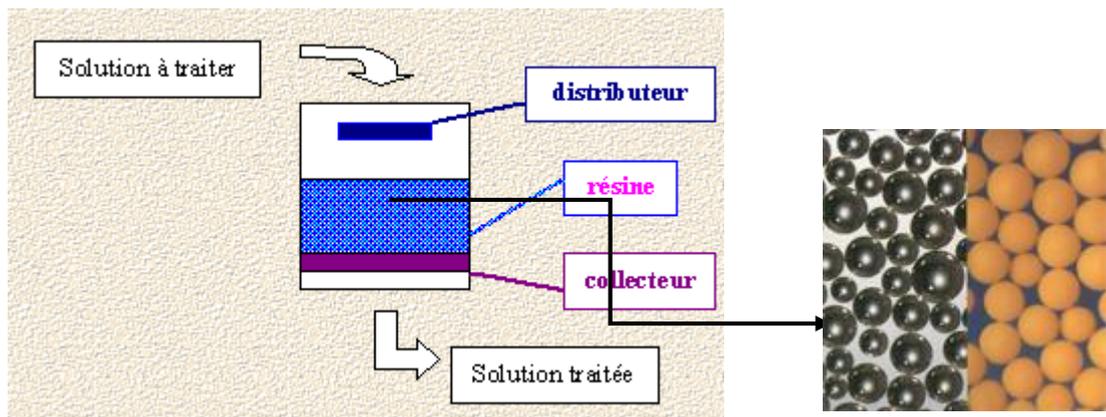


Figure. 3.2 : Colonne échangeuse d'ions.

3.4.3. Avantages et inconvénients des différentes résines

En fonction de la nature des polluants, quatre groupes d'échangeurs d'ions sont employés (Tableau. 3.4):

- -échangeur de cations faiblement acides.
- -échangeur de cations fortement acides
- -échangeur d'anions faiblement / moyennement basiques.
- -échangeur d'anions fortement basiques.

Tableau. 3.4: Avantages et inconvénients des différentes résines.

Type de résine	Avantages	Inconvénients
Résines cationiques fortement acide	- Convient pour tous les types d'eau - Elimination complète des cations - bonne stabilité à l'oxydation,	- efficacité de fonctionnement
Résines cationiques faiblement acide	- Très grande capacité, - Très grande efficacité de fonctionnement	- Elimination partielle des cations, - Utilisable seulement avec des eaux spécifiques, - Capacité de fonctionnement fixe,
Résines anioniques fortement basique	- Elimination complète des anions (incluant la silice et CO ₂), - Efficacité et qualité variables, - Cinétiques excellentes,	- Résistance faible aux polluants organiques, - Vie limitée, - Instable thermodynamiquement,
Résines anioniques faiblement basiques	- Grande capacité d'élimination, - Grande efficacité de régénération, - Excellente résistance aux polluants organiques, - Bonne stabilité à l'oxydation,	- Elimination partielle des anions, - N'élimine ni la silice ni le CO ₂ , - Rinçage long,

3.5. Déferrisation

La déferrisation consiste à enlever le fer dissous dans l'eau. Cette opération est importante dans de nombreuses applications industrielles et pour l'eau potable, par exemple pour éviter l'obstruction des canalisations, tuyères, turbines, la coloration résiduelle, ainsi que pour favoriser la désinfection. Le fer est fréquemment associé au manganèse avec lequel il a la propriété de co-précipiter. La déferrisation peut être réalisée par trois méthodes principales :

3.5.1. Oxydation puis filtration

La déferrisation par oxydation (à l'air ou autre oxydant suivant la concentration en fer), suivie d'une filtration, est généralement utilisée pour les eaux d'origine profonde. C'est une technique simple mais qui nécessite souvent l'emploi de réactif oxydant (KMnO₄, chlorure ferrique, Sulfates d'alumine, Oxygène, Chlore, Ozone, ...).

3.5.2. Traitement biologique

L'élimination du fer peut être aussi faite par oxydation biologique (utilisation de bactéries qui oxydent et précipitent le fer dissous). Un lit bactérien spécifique est utilisé pour oxyder le fer dissout qui est ensuite précipité et filtré. Ces traitements permettent d'atteindre des niveaux acceptables en distribution.

3.5.3. Traitement catalytique

Le procédé d'élimination catalytique du fer repose sur un phénomène d'adsorption et d'oxydation des formes dissoutes du Fe²⁺ à la surface d'un matériau spécifique de filtration. Ces matériaux catalytiques jouent à la fois le rôle d'adsorbant et d'échangeur d'électrons. Les matériaux utilisables pour la filtration catalytique sont des matériaux recouverts de façon naturelle ou artificielle de dioxyde de manganèse MnO₂.

Il est également possible d'éliminer le fer par adsorption sur des résines échangeuses d'ions. On utilise un système d'échangeur d'ions pour traiter des eaux contenant de faibles concentrations de Fe²⁺. De plus les résines échangeuses d'ions éliminent d'autres cations comme le Ca²⁺, donc on les utilisera pour cette opération spécifique uniquement lorsque les concentrations de fer et de manganèse sont faibles. La suppression des ions fer est généralement plus aisée que pour les ions manganèse.

3.6. Décarbonatation

La dureté d'une eau est fonction des quantités de calcium et de magnésium qu'elle contient. Le calcaire, carbonate de calcium, précipite sous forme de tartre sous certaines conditions. Les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) d'une eau déterminent sa dureté. Le corps humain a besoin d'apports quotidiens en calcium et en magnésium, provenant de l'eau de boisson et des aliments. Ainsi, certaines eaux, trop riches en ces éléments, doivent subir ce que l'on appelle une décarbonatation. La décarbonatation réduit le risque de formation de calcaire mais on ne supprime pas le calcaire. Elle permet l'obtention d'un compromis entre le bon équilibre minéral de l'eau et le niveau optimum de dureté.

La décarbonatation n'élimine que les ions calcium et magnésium liés aux bicarbonates, il s'agit alors d'un adoucissement partiel. L'adoucissement total d'une eau correspond à l'élimination de l'ensemble des ions calcium et magnésium. Parmi les procédés de décarbonatation, on trouve:

- ↳ la décarbonatation à la chaux ou à la soude (élimination la dureté bicarbonatée) ;
- ↳ la décarbonatation sur résines échangeuses d'ions ;

3.6.1. La décarbonatation à la chaux ou à la soude

La décarbonatation à la chaux est le procédé de précipitation le plus largement utilisé. Son but est d'éliminer la dureté bicarbonatée liée au calcium et au magnésium, c'est-à-dire la présence dans l'eau d'hydrogénocarbonates et carbonates de Ca et de Mg, en ajoutant soit de la chaux ou soit de la soude à l'eau.

3.6.2. La décarbonatation sur résines échangeuses d'ions

Les résines de décarbonatation échangent les ions H^+ de la résine contre les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ . Les résines sont régénérées avec un acide fort. Il est à noter que ce procédé n'est utilisé que dans l'industrie et chez les particuliers.

3.7. Précipitation des composées anioniques : fluorures et phosphates :

3.7.1. Elimination des fluorures

L'élimination des fluorures par précipitation concerne les effluents acides de lavage des gaz d'incinération, les rejets de la métallurgie de l'aluminium et ceux de l'industrie de l'acide phosphorique et de verre. L'agent de neutralisation sera toujours la chaux, éventuellement

complétée par du chlorure de calcium (CaCl_2) si l'on doit obtenir de faibles valeurs résiduelles de F^- .

3.7.2. Elimination des phosphates

Les phosphates, responsables des phénomènes d'eutrophisation des lacs et les cours d'eaux à débit lent sont présentes avec présence de silice SiO_2 et d'acide fluorhydrique HF, et à degré moindre dans les purges des chaudières et des circuits de refroidissement. Deux modes de précipitation peuvent être envisagés, on trouve :

-  déphosphatation chimique par la chaux :
-  déphosphatation par des sels d'aluminium (Al^{3+}) et ferriques (Fe^{3+}) :

Partie 2 : Epuration des eaux usées

CHAPITRE I : PARAMETRES DE POLLUTION ET NORMES DE REJET

I.1. Généralités sur les paramètres de pollution des eaux usées

I.1.1. Les paramètres physiques :

I.1.1.1. la température :

La température est un paramètre dont le contrôle est indispensable surtout en présence d'effluents industriels. C'est un paramètre important pour le bon fonctionnement des systèmes d'épuration dans la mesure où il peut influencer de différentes manières sur: La solubilité des sels et des gaz. Il est établi que la solubilité d'un gaz diminue avec l'augmentation de la température. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas de l'oxygène dissous. Aussi, plus l'eau est chaude, plus la concentration de saturation de l'oxygène devra diminuer, ce qui conduit à la diminution de la réserve d'oxygène mis à la disposition des micro-organismes intervenants dans les processus d'autoépuration, la multiplication des micro-organismes, affectant ainsi l'épuration biologique.

I.1.1.2. La conductivité :

Elle donne une idée sur la salinité de l'eau. Des variations de cette dernière peuvent influencer le traitement biologique et la décantation. La mesure en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm (micro ou milli Siemens par cm) de la conductivité électrique d'une eau s'effectue à l'aide d'un conductimètre. Celui-ci mesure le passage de l'électricité entre deux électrodes plongées dans l'eau.

1.1.1.3. Les Matières en suspension (MES) :

On appelle matières en suspension les très fines particules en suspension (sable, argile, produits organiques, particules de produits polluants, micro-organismes,...) qui donnent un aspect trouble à l'eau, (turbidité) et s'opposent à la pénétration de la lumière nécessaire à la vie aquatique. En trop grande quantité elles constituent donc une pollution solide des eaux.

La quantité de matières en suspension totale (**MEST**) se mesure par filtration d'un litre d'eau et pesage des résidus séchés. Le résultat s'exprime en mg/l. (On estime qu'un habitant rejette environ 90 grammes par jour de MES dans ses eaux usées).

1.1.1.4. Les matières décantables

Leur mesure donne la quantité de solides non dissous présents dans l'eau. Pendant 30 minutes on laisse un échantillon d'eau au repos déposer dans un cône d'Imhof. Ceci permet de mesurer la quantité de sédiments en mg par litre.

1.1.1.5. Les matières volatiles sèches (MVS) :

Les matières volatiles en suspension sont celles qui sont susceptibles d'être volatilisées par test de laboratoire à une température de 550° C. Les MVS sont généralement assimilées aux matières organiques en suspension, elles constituent environ 70-80 % de MES. Les MVS se mesurent en mg/l.

1.1.1.6. La couleur et l'odeur :

Dans les eaux usées brutes la couleur est due à la présence de matières organiques dissoutes ou colloïdes par des composés chimiques solubles qui sont colorés. L'odeur est due à une fermentation des matières organiques.

1.1.1.7. La turbidité:

C'est un paramètre qui varie en fonction des composés colloïdaux (argiles) ou les acides humiques (dégradation des végétaux) mais aussi elle tient compte de la présence plus ou moins importante des matières en suspension d'origine minérale ou organique qui troublent l'eau.

- NTU < 5 => eau claire ;
- NTU < 30 => eau légèrement trouble ;
- NTU > 50 => Eau trouble.

Une importante turbidité de l'eau entraîne une réduction de sa transparence qui réduit la pénétration du rayonnement solaire utile à la vie aquatique (photosynthèse).

1.1.2. Les paramètres chimiques :

1.1.2.1. Le pH (potentiel hydrogène) :

Le pH joue un rôle capital dans le traitement biologique .il exprime le degré d'acidité ou d'alcalinité des eaux usées. Ce paramètre joue un rôle primordial :

- dans les propriétés physico-chimiques (acidité, agressivité) ;
- dans les processus biologiques, dont certains exigent des limites de pH très étroites se situant entre 6,5 et 8,5.

1.1.2.2. Matières organiques

La matière organique (MO) contenue dans les eaux est la partie non encore décomposée de la pollution organique (matières vivantes mortes ou déjections des organismes vivants). Elles sont donc naturellement présentes dans l'eau, mais à faible concentration. S'il y en a plus, il y a pollution provenant de rejets d'eaux usées domestiques mal épurés, d'effluents agricoles, etc. La MO peut se rencontrer dans l'eau soit dissoute, soit sous forme particulaire visible. La charge de pollution organique est quantifiable par des techniques normalisées : la DCO, la DBO5.

1.1.2.3. Demande biologique en oxygène en 5 jours (DBO5) :

La DBO5 ou Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours, représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique présente dans un échantillon d'eau maintenu à 20°C, à l'obscurité, pendant 5 jours. Pour mesurer la DBO5, on réalise une première mesure de la concentration en dioxygène dans l'échantillon d'eau. On répète cette mesure 5 jours plus tard. La DBO5 représente la différence entre les deux concentrations mesurées. La valeur obtenue, représente environ 80% de la pollution biodégradable totale. La mesure de la

DBO₅ est très utilisée pour surveiller les rejets et le fonctionnement des stations d'épuration. (Elle est trop peu précise pour qualifier les eaux naturelles) (**Tableau. 1.1**).

Tableau. 1.1 : Echelle de valeurs de DBO₅

Situation	DBO ₅ (mg/l d'O ₂)
Eau naturelle pure et vive	< 1
Rivière légèrement polluée	1 < DBO ₅ < 3
Egout	100 < DBO ₅ < 400
Rejet station d'épuration efficace	20 < DBO ₅ < 30

1.1.2.4. Demande chimique en oxygène (DCO) :

Elle représente la quantité d'oxygène qu'il faut fournir par des réactifs chimiques puissants (bichromate de potassium et Permanganate de potassium) pour oxyder totalement les matières organiques contenues dans l'effluent. Contrairement à la DBO₅, qui ne prend en compte que les matières organiques biodégradables, la DCO est une mesure globale des matières organiques et de certains sels minéraux oxydables (pollution organique totale) présents dans l'eau.

Cette technique mesure en laboratoire la quantité d'oxygène consommée par l'oxydation chimique (à l'aide d'un oxydant et à chaud, pendant 2 heures) des matières organiques ou minérales présentes dans l'eau. La mesure de la DCO est surtout utilisée pour la surveillance des eaux usées urbaines et industrielles.

Le rapport DCO/DBO₅ donne une estimation de la biodégradabilité des eaux usées. La notion de la biodégradabilité représente la capacité d'une substance ou son aptitude à être décomposée par les micro-organismes (bactéries, champignons...).

Si $DCO/DBO_5 < \text{ou} = 2$: Le traitement se fait biologiquement ;

Si $2 < DCO/DBO_5 < 3$: Traitement biologique avec adaptation de souches ;

Si $DCO/DBO_5 > 3$: Traitement physico-chimique. L'eau est pratiquement non traitable par voie biologique.

Pour quantifier la matière organique dans l'eau on peut aussi à l'aide d'analyses mesurer :

1.1.2.5. Carbone Organique Total (COT)

C'est la concentration en mg/l de carbone organique total dissous dans l'eau. On parle aussi parfois de COD, carbone organique dissous. Pour une eau de surface. La concentration du COT d'une eau de surface varie de 2 à 10 mg/l et de 0,5 à 1 mg/l. pour une eau souterraine.

1.1.2.6. Eléments toxiques :

La présence des métaux lourds (plomb, mercure, ...) et des substances toxiques (phénols) dans l'eau usée peut la rendre toxique, ils sont évalués par les tests biologiques.

1.1.2.7. Azote de Kjeldahi (NTK)

Azote total de Kjeldahi est une appellation qui désigne la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique (Norg+N-NH₄). Par la méthode Kjeldahi, l'azote ammoniacal et l'azote organique sont dosés simultanément. Ces deux formes d'azote sont présentes dans les détritiques organiques soumis aux processus biologiques naturels.

La présence d'azote organique dans les eaux résiduaires provient des abattoirs, de certaines usines chimiques utilisant de l'azote organique dérivé des protéines animales, de la décomposition de la matière organique et l'épandage d'engrais.

1.1.2.8. Le phosphore (Pt):

Le phosphore total est la somme du phosphore organique et le phosphore minéral. En d'autres termes c'est l'ensemble du phosphore présent dans un échantillon sous forme de phosphates ou de composé organophosphorés. La présence du phosphore dans les effluents industriels provient surtout des détergents, des engrais et de la décomposition de la matière organique. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques des eaux usées urbaines.

Tableau. 1.2 : Caractéristiques des eaux usées urbaines

Paramètres	Echelles de variation
pH	7,5 à 8,5
MES total mg/ l	150 à 500
DBO5 mg/ l	100 à 400
DCO mg/ l	300 à 1000
COT mg/ l	100 à 300
NTK mg/ l	30 à 100
N-NH4+ mg/ l	20 à 80
N-NO2- mg/ l	<1
N-NO3- mg/ l	<1
Détergents mg/ l	6 à 13
P mg/ l	10 à 25

En somme, toutes les formes de pollution dans l'eau sont quantifiées avec les paramètres cités ci-dessus dans le tableau suivant :

Tableau. 1.3 : Paramètres caractérisant chaque type de pollution

DBO₅, DCO	Pollution organique carbonée
MES, MVS, turbidité	Pollution particulaire
NTK, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺	Pollution azotée
PT, PO₄⁻	Matières phosphorées

I.2- Evaluation des débits et de la charge polluante des eaux usées

Pour estimer les charges polluantes, il faut bien calculer les débits d'eaux usées.

I.2.1. Calcul des débits :

Le volume rejeté par les habitants est estimé à 80 % de la dotation d'AEP. On va adopter une dotation de 150l/hab/j.

Il s'agit de déterminer :

- Le débit journalier : « Q_{moyj} » (m^3/j)
- Le débit moyen horaire : « Q_{moyh} » (m^3/h)
- Le débit de pointe : « Q_p »
- Le débit diurne : « Q_d »

1.2.1.1. Le débit journalier :

Le débit total journalier se calcule comme suit :

$$Q_{\text{moyj}} = D \cdot N \cdot T_r \quad (\text{m}^3/\text{J})$$

D : dotation (l/hab/j)

N : nombre d'habitant l'horizon considéré

T_r : coefficient de rejet = 0,8

1.2.1.2. Le débit moyen horaire :

Il est donné par la relation suivante :

$$Q_{\text{moyh}} = \frac{Q_j}{24} \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

1.2.1.3. Le débit de pointe en temps sec :

On le calcule par la relation suivante :

$$Q_p = K_p \cdot Q_{\text{moyj}} \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

Avec : $K_p = 1,5 + 2,5/\sqrt{Q_{\text{moyj}}}$ si $Q_{\text{moyj}} \geq 2,8 \text{ l/s}$

$K_p = 3$ si $Q_{\text{moyj}} < 2,8 \text{ l/s}$

1.2.1.4. Le débit diurne :

Le débit moyen diurne correspond à la période diurne de 16 heures consécutives au cours de laquelle la station reçoit le plus grand volume d'eau usée, soit :

$$Q_d = \frac{Q_j}{16 \text{ heures}}$$

I.2.2. Calcul des charges polluantes :

A défaut de procéder à des prélèvements et analyses de l'eau usée, Les charges polluantes des eaux usées sont estimées à partir des charges polluantes spécifiques par habitant et par jour.

I.2.2.1. Notion d'équivalent habitant

L'équivalent habitant (dit « EH »). La notion d'équivalent habitant est une notion ancienne utilisée en assainissement pour évaluer la capacité des stations d'épuration. Cette notion a été introduite pour convertir les rejets d'eaux usées industrielles en « équivalents habitants ».

C'est une unité d'évaluation de la pollution correspondant à celle d'un habitant réel, soit en moyenne :

DCO = 120 g par habitant/jour

DBO5 = 60-70 g par habitant/jour

MES = 70-90 g par habitant/jour (1/3 MM + 2/3 MVS)

NTK = 15 g par habitant/jour (NTK = azote total Kjeldahl)

PT = 2 g par habitant/jour

Tableau 1.4 : Evaluation du nombre d'EH pour différents équipements

Batiment ou complexe	Nombre d'EH
Usine, atelier	1 ouvrier = 1/2 EH
Bureau	1 employé = 1/3 EH
Ecole sans bains, douche ni cuisine (externat)	1 élève = 1/10 EH
Ecole avec bains, sans cuisine (externat)	1 élève = 1/5 EH
Ecole avec bains, et cuisine (externat)	1 élève = 1/3 EH
Ecole sans bains, et cuisine (internat)	1 élève = 1 EH
Hotel, pension	1 lit = 1 EH
Caserne	1 personne = 1 EH
Restaurant	1 couvert servi = 1/4 EH
Théâtre, cinéma, salle de fêtes	1 place = 1/30 EH
Salle de sport	1 place = 1/20 EH
Centre de soins	1 lit. = 1.5 EH

1.2.2.2. La Concentration (C) :

C'est une masse par unité de volume (mg/l). Ce paramètre renseigne sur la qualité de l'effluent.

Le Flux (ou charge) (F) : C'est le produit du débit (Q) par la concentration (C) (kg/j).

$$F = C \times Q \text{ (I.3)}$$

Exemple : une concentration en matières de suspension de 30 mg/l, et un débit de 1000 m³/j, donnera un flux de matières en suspension de :

$$C = 30 \text{ mg/l} = 30 \text{ g/m}^3 = 0,03 \text{ kg/m}^3$$

$$F = C \times Q \quad 0,03 \times 1000 = 30 \text{ kg/j.}$$

I.2.2.3. La charge organique de la station:

C'est le rapport de la pollution reçue sur la capacité nominale de la station elle s'exprime en % du flux nominal en DBO5.

Exemple : une station de capacité nominale 5000kg DBO5/j reçoit une charge en pollution de 500kg/j (DBO5). La charge organique : $500/5000= 10 \%$

I.3. Normes de rejet

Les critères en Europe sont stricts. Mais dans les pays moins développés, ils le sont beaucoup moins et ils ne sont pas forcément respectés. La quantité de pollution journalière pour un habitant et les concentrations moyennes se répartissent comme suit :

Tableau 1.5 : Les valeurs limites des paramètres de rejet dans un milieu récepteur (Journal Officiel de la République Algérienne, 2006)

Valeurs limites (mg/l)	Paramètres
6,5-8,5	pH
30	MES
35	DBO5
120	DCO
25	Azote Kjeldahl
02	Phosphore total
0,1	Aluminium
0,2	Fer
03	Manganèse
0,5	Plomb total
0,5	Cuivre total
03	Huiles et Graisses
20	Hydrocarbures totaux
0,3	Fluor et composés
0,001	(*) Détergents

CHAPITRE II : LES PRETRAITEMENTS

II.1. Etapes de traitement d'une eau usée

On peut diviser, grosso modo, le traitement de l'eau en quatre étapes (**Figure. 2.1**):

- **Prétraitement** : les eaux brutes doivent généralement subir, avant leur traitement proprement dit, un prétraitement comportant un certain nombre d'opérations uniquement physiques ou mécaniques.
- **Traitement primaire** : élimine une grande partie de MES et constitue une préépuration non négligeable quoique insuffisant pour garantir la qualité en milieu naturel, il fait appel à différents procédés physiques ou chimiques.
- **Traitement secondaire** : Cette étape consiste en l'élimination des matières en solution dans l'eau (matières organiques, substances minérales).
- **Traitement tertiaire** : Au terme du traitement secondaire, l'eau débarrassée des éléments qui la polluaient, est épurée à 90%. Mais lorsque le lieu de rejet est fragile des traitements complémentaires peuvent s'avérer nécessaires.

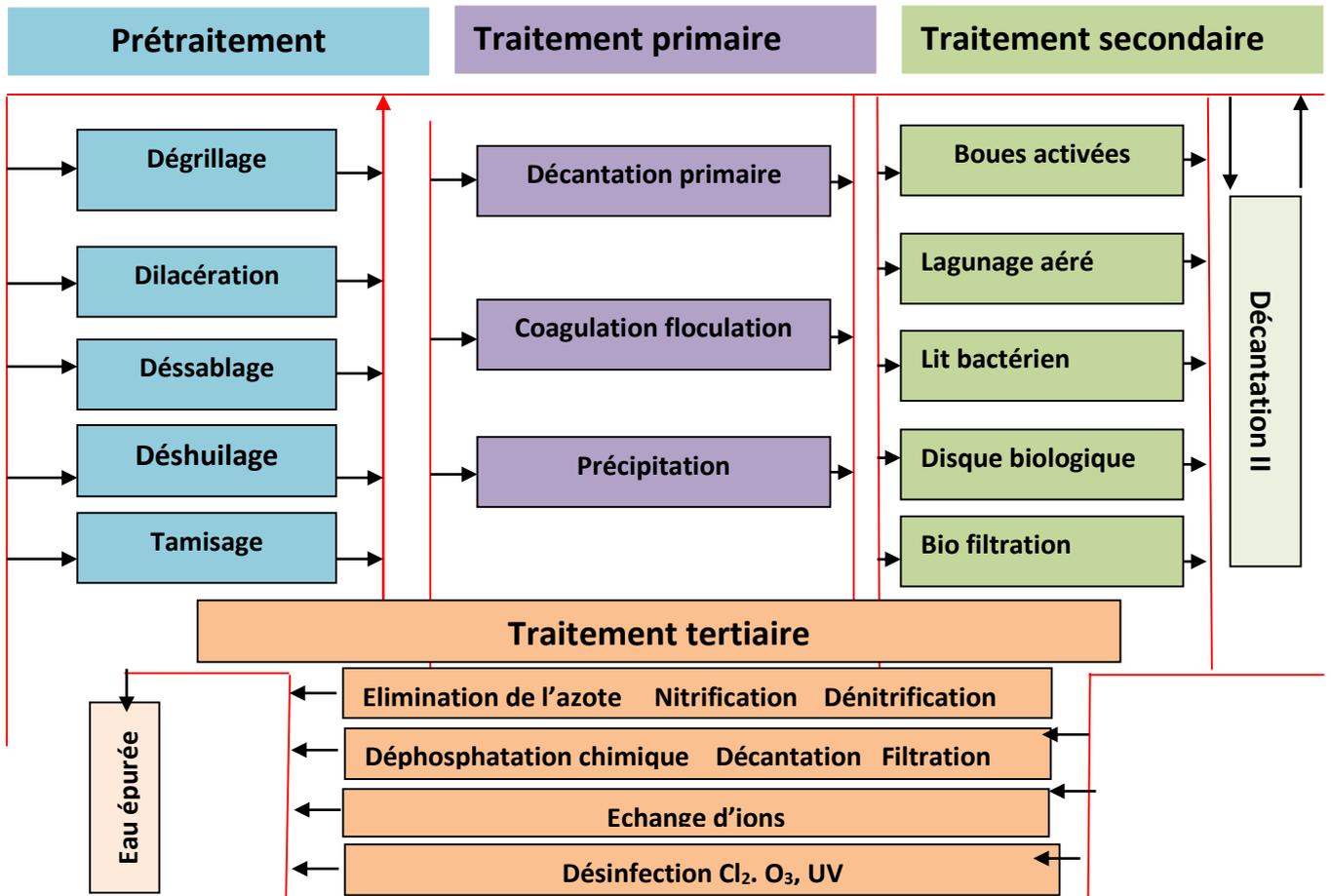


Figure. 2.1 : Chaîne ou filières de traitement des eaux usées

II.2. Prétraitements :

Les dispositifs de prétraitement sont présents dans toutes les stations d'épuration quels que soient les procédés mis en œuvre à l'aval. Ils ont pour but d'éliminer les éléments solides ou particulaires les plus grossiers, susceptibles de gêner les traitements ultérieurs ou d'endommager les équipements : déchets volumineux (dégrillage), sables (déssablage) et corps gras (dégraissage-déshuilage). On peut avoir recourt à une ou plusieurs de ces opérations dans une même station d'épuration. Le prétraitement regroupe les opérations suivantes dégrillage, dilacération, dessablage, débouage, dégraissage, déshuilage, et le tamisage.

II.2.1. Le dégrillage :

L'opération du dégrillage a pour but d'éliminer les matières volumineuses transportées par l'eau résiduaire ; c'est ce qui permet de protéger la station contre le problème de bouchage

au niveau de ces des différents ouvrages causé par les différents objets. En fonction de l'espacement des barreaux des grilles, on distingue différents types de dégrillages (**Tableau. 2.1**):

Tableau. 2.1 : Le type de dégrillage en fonction de l'espacement des barreaux.

Type de dégrillage	Espacement entre les barreaux
Dégrillage grossier	30 - 100mm
Dégrillage moyen	10 –25mm

L'élimination des matières retenues par les barreaux des grilles peut s'effectuer manuellement ou bien mécaniquement, on distingue :

II.2.1.1. Les grilles manuelles :

Elles sont composées des barreaux inclinés de 60° à 80° par rapport à l'horizontal et sont munies de by pass pour éviter les débordements en cas d'obstruction (**Figure. 2.2**). Elle nécessite un nettoyage quotidien à l'aide d'un râteau. Ce type de grilles est utilisé dans les petites installations, l'espacement minimum entre les barreaux est de 30cm.

II.2.1.2. Les grilles mécaniques :

Elles sont destinées pour les stations dont le nombre d'équivalent habitant est supérieur ou égale à 2000 habitants.

La manœuvre automatique de la grille permet d'éviter le colmatage rapide des canalisations. On trouve deux types de ces grilles :

- **Grilles courbes :**

Elles sont formées de barreaux plats, et sont utilisées pour des profondeurs du canal variant de 0,5 à 1,8m.

- **Grilles droites :**

Elles sont inclinées de 90° par rapport à l'horizontal et sont parfois verticales. Ce type de grilles peut être utilisé pour les grandes profondeurs du canal (2 à 3m) avec un espacement des barreaux (40 à 60mm).

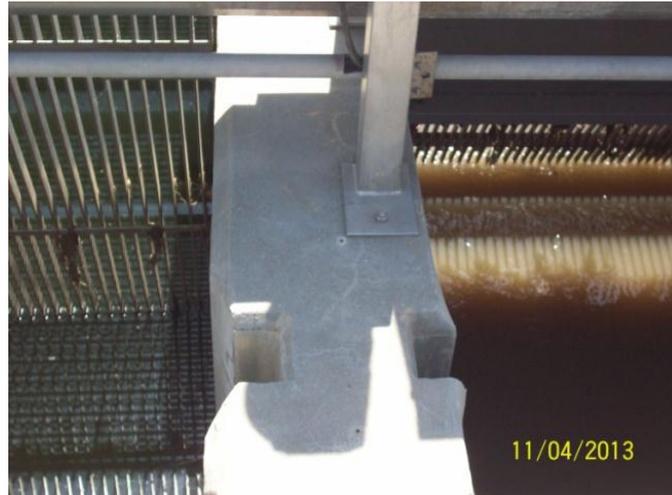


Figure. 2.2 : Le dégrillage. (Source STEP de Guelma)

II.2.2. Dilacération :

Il s'agit d'une opération de broyage des déchets qui sont évacués avec l'eau brute. Ce système nécessite beaucoup d'impératifs liés à la nature des déchets, et à l'efficacité de ce traitement. Les broyeurs sont deux types :

- broyeurs à marteau
- tambours à râteau

II.2.3. Tamisage :

Le tamisage est en fait un dégrillage poussé et consiste en une filtration sur toile mettant en œuvre des mailles de différentes dimensions (0,1 à 4mm). Trois principales fonctions du tamisage peuvent être mentionnées

- la récupération de déchets recyclables ;
- la protection de canalisations et des pompes ;
- la limitation des risques de dépôts et de fermentation ;

II.2.4. Le dessablage :

Le dessableur a pour but de piéger les matières minérales de diamètre supérieur à 0,2mm, du gravier et du sable de façon à éviter les dépôts dans les conduites et protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion. La vitesse de chute des particules dépend de la nature de ces particules et de leur diamètres et la viscosité du liquide dont lequel elle se trouve. La technique de dessablage consiste à faire circuler l'eau dans une chambre de tranquillisation où il est tenté

d'obtenir une vitesse constante quel que soit le débit. Une vitesse de 0,3m/s permet un dépôt de la majeure quantité des matières minérales contenues dans l'eau. On distingue différents types de dessableurs à savoir :

II.2.4.1. Dessableur rectangulaire à couloir :

Il s'agit de dessableurs à couloirs simples qui sont des canaux à section élargies et rectangulaires dans lesquels la vitesse de passage est inférieure à 0,3m/s, de manière à éviter le réentraînement des particules par le courant (**Figure. 2.3**).

II.2.4.2 Dessableur à couloir à vitesse constante :

Pour maintenir la vitesse constante dans ce type de dessableur on se base sur le canal de venturi.

II.2.4.3 Dessableur circulaire :

Ce type de dessableur est alimenté tangentiellement et dans lequel les sables sont projetés vers les parois et en décrivant une spirale à axe vertical. La vitesse de passage est de l'ordre de 0,8m/s.

II.2.4.4. Dessableur rectangulaire aéré :

Dans ce type de dessableur l'insufflation de l'air impose aux eaux un mouvement de rotation qui entraîne :

- décantation des grains de sable seulement par contre la matière organique reste en suspension.
- détachement de la matière organique fixée sur le sable par effet de tourbillonnement.
- un rafraîchissement des eaux par l'apport d'oxygène.

II.2.4.5 Dessableur aéré à fond plat :

L'eau est admise sur toute la largeur du bassin par le côté opposé. Les sables sont recueillis par raclage.

II.2.5. Le dégraissage-déshuilage :

C'est une opération destinée à l'élimination des graisses et des huiles de l'effluent. Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, par contre le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide. Il existe différents types de bassins de déshuilage-dégraissage conçus suivant la qualité de et la concentration de l'effluent en graisses et huiles.

II.2.5.1. Les séparateurs statiques :

Ces ouvrages jouent simplement sur la différence de densité entre la graisse et l'eau. Si la vitesse d'écoulement est faible, les particules grasses flottent à la surface où sont récupérées par raclage.

II.2.5.2. Les dégraisseur-déshuileur aérés :

Pour les eaux usées d'origine domestiques, le dégraissage est généralement couplé par un dessablage. Ce type d'ouvrage comprend une zone aérée par insufflation d'air par le bas, suivi d'une zone de sédimentation ou de tranquillisation. Les fines bulles d'air injectées s'absorbent sur les particules grasses et accélèrent leur montée ; Leur élimination se fait en surface par raclage manuel ou mécanique.

II.2.5.3. Le déshuileur longitudinal :

C'est un bassin rectangulaire équipé d'aérateur et de système de raclage de fond et de surface. Il est recommandé lorsque la concentration en graisse est très importante.



Figure. 2.3 : Bassin de dessablage-déshuilage-dégraissage. (Source STEP de Guelma)

CHAPITRE III : TRAITEMENTS PRIMAIRES

III. 1. Procèdes de décantation

La décantation est une opération de séparation solide/liquide par simple gravité. Si la densité des particules est supérieure à celle de l'eau, il y a une décantation, sinon on a une flottation. La décantation a pour but d'éliminer les MES et les colloïdes. Ce procédé est utilisé pratiquement dans toutes les usines d'eau potable ainsi que les stations d'épuration d'eaux usées. Le décanteur est un bassin rectangulaire ou circulaire dans lequel l'eau séjourne longtemps pour permettre la sédimentation entière des particules ou des flocons (**Figure. 3.1**).



Figure. 3.1 : Bassin décanteur. (Source STEP de Guelma)

On peut distinguer trois types de décantation :

↳ **Décantation des particules discrètes:**

Dans ce type de décantation, les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est constante

et indépendante de la concentration en solides et les lois classiques de Newton et Stokes sont applicables. Ce type de décantation est rencontré dans les dessableurs.

↳ **Décantation des particules floculantes:**

Appelée aussi décantation diffuse. Cette décantation est caractérisée par l'agglomération des particules au cours de leur chute ce qui modifie les propriétés physiques des particules. On retrouve ce type de décantation dans les décanteurs des usines de traitement des eaux potables et dans les décanteurs secondaires des STEP.

↳ **Décantation freinée:**

Dans ce type de décantation, la concentration en particules est élevée ce qui entraîne la formation d'une interface marquée entre la couche des particules et le liquide surnageant (décantation en piston). Cette décantation est rencontrée dans la partie profonde des décanteurs et dans l'épaississeur.

III.1.1. Décantation des particules discrètes

III.1.1.1. Principe de base

La décantation des particules discrètes consiste dans le fait d'éliminer des particules de même taille et de même origine. Toute particule présente dans l'eau est soumise à deux forces (**Figure. 3.2**) :

- ↳ Force de pesanteur qui permet la chute de cette particule;
- ↳ Forces de frottement (F_r) dues à la trainée de fluide s'opposent à la force de pesanteur.

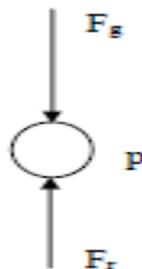


Figure. 3.2 : Forces agissant sur une particule.

La force résultante des deux forces, est fonction du régime de l'écoulement ainsi que les propriétés physiques de la particule. Pour une bonne décantation, le régime doit être laminaire et la loi de Stokes est appliquée:

$$V_s = g (\rho_p - \rho_e) d^2 / 18\mu$$

Où: V_s : vitesse de sédimentation de chute de la particule;

ρ_p : masse volumique de la particule;

ρ_e : masse volumique de l'eau;

d : diamètre de la particule;

μ : viscosité dynamique.

g : accélération de la pesanteur.

III.1.1.2. Théorie du décanteur parfait

Dans un décanteur parfait on suppose les hypothèses suivantes :

1. Toutes les particules sont indépendantes et tombent à une vitesse V_p
2. il n'y pas de perturbation thermique.
3. l'écoulement est laminaire partout, on néglige la perturbation à l'entrée et à la sortie.
4. il n'y a pas de remise en suspension des particules.
5. la loi de Stokes reste valable si on passe d'une sédimentation statique à une sédimentation dynamique.

Un bassin de décantation est caractérisé par le temps de séjour des particules dans ce dernier, ce temps de rétention ou de séjour est fonction du débit arrivant au bassin de décantation et du volume de ce dernier.

Le temps de séjour est :

$$ts = \frac{V}{Q} = \frac{L \cdot l \cdot H}{Q}$$

Avec L : longueur du bassin, l : sa largeur et H sa profondeur, et Q le débit arrivant au bassin.

III.1.2. Décantation des particules floculantes

Ces particules sont des particules floculées en grande concentration dans l'eau (supérieure à 50mg/l). Il n'existe pas de formules mathématiques pour le calcul de la vitesse de sédimentation car cette dernière augmente durant la chute de la particule.

Essai de décantation en colonne

Pour ce faire, il faut procéder à un essai au laboratoire appelé essai de décantation en colonne. Considérant une colonne de 1 à 2m qui compte des prises d'échantillons à des hauteurs différentes. On la remplit avec de l'eau plus de MES de concentration initiale X_0 , on agite pendant un temps et lorsque on arrête l'agitation, les particules commencent à décanter ($t=0$). On effectue des prises d'échantillons à des hauteurs différentes (h_i) et pour différents temps (t_i).

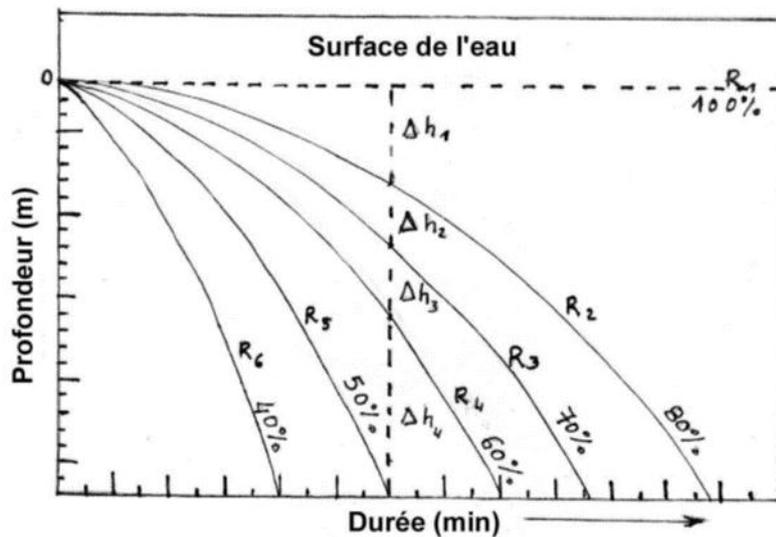


Figure. 3.3 : Vitesse de décantation des particules floculantes.

Après homogénéisation du fluide dans cette colonne, on le laisse au repos puis on effectue des prélèvements à intervalles réguliers des échantillons par siphon et à des profondeurs en général de 0,6m; 1,2m; 1,6m de la surface, on établit ainsi un pourcentage en poids de particules éliminées que l'on reporte ensuite sur un diagramme (**Figure 3.3**).

A partir de ces résultats on peut évaluer le pourcentage des particules éliminées par un bassin idéal, en fonction de divers temps de rétention et de diverses profondeurs à l'aide de l'équation suivante :

$$R = \frac{\Delta h_1}{H} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{2} + \frac{\Delta h_2}{H} \cdot \frac{(R_2 + R_3)}{2} + \dots + \frac{\Delta h_n}{H} \cdot \frac{(R_n + R_{n+1})}{2}$$

Où : R : pourcentage total des particules éliminées dans un bassin de décantation idéal (rendement) ;

R_1, R_2, R_n : pourcentage de particules éliminées dans un bassin de décantation idéale, à une profondeur h et après un temps de rétention t ;

$\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_n$: hauteur moyenne entre deux couches de même pourcentage d'élimination de particules.

H : hauteur totale de la colonne.

III. 2. Décantation avec des réactifs chimiques :

Le traitement physico–chimique est le procédé le mieux adapté aux variations saisonnières de la charge polluante ou à l'existence des matières toxiques. Le traitement physico–chimique passe par trois opérations principales :

- Une coagulation ;
- Une floculation ;
- Une décantation ou une flottation.

Le tableau qui suit donne les principaux avantages et inconvénients du traitement physico chimique.

Tableau 3.1 : .Avantages et inconvénients du traitement physico–chimique

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Réponse immédiate aux variations de charge ; - Capacité des installations, meilleure intégration au site ; - Bonne élimination de la pollution toxique ; - Déphosphatation simultanée 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus grande quantité de boues produites ; - Le coût élevé occasionné par les réactifs ; - Rendement d'épuration inférieur à l'épuration biologique ; - Risque de coloration (sels de fer sur eaux septiques).

III.3. Types de décanteur

III.3.1. Décanteur à flux horizontal

Soit un décanteur rectangulaire à flux horizontal de longueur L , de section verticale S (où H est la hauteur d'eau et l la largeur), traversé uniformément par un débit Q (**Figure. 3.4**). La vitesse d'une particule entrant dans le bassin à son niveau supérieur à deux composantes :

V_1 : vitesse horizontale du fluide égale à Q/s ,

V_0 : vitesse verticale limite donnée par la loi de Stokes.

Cette particule est retenue dans le bassin si: $V_0/H > V_1/L = Q/Sv.L = Q/H.l.L$

Or $Q/L.l = Q/S_H = V_H$, ce qui implique $V_0 > V_H$

S_H : surface horizontale du bassin,

V_H : vitesse de Hazen (ou charge hydraulique superficielle).

Théoriquement, l'efficacité d'un décanteur horizontal ne dépend que de sa vitesse de Hazen et non de sa hauteur ou de son temps de rétention (soit de 0.5 à 1.5 m/h).

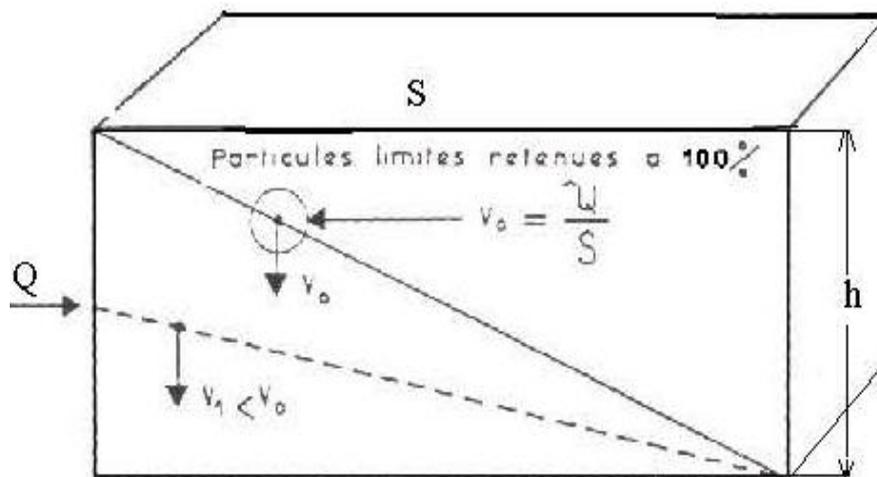


Figure. 3.4 : Décanteur à flux horizontal.

Toutes les particules ayant des vitesses de sédimentation supérieures à V_H seront théoriquement éliminées. Cette loi est vérifiée quelle que soit la forme du décanteur (rectangulaire ou circulaire) et quel que soit le sens d'écoulement de l'eau (horizontal ou vertical). En pratique, il n'y a pas de décanteur idéal car le régime d'écoulement n'est pas toujours laminaire. Les tourbillons dans l'eau vont retarder la chute des particules. Pour tenir compte du fait que la vitesse (en station) est inférieure à la vitesse théorique (cas idéal), il faut affecter cette vitesse d'un coefficient correspondant au rendement de la décantation (R% entre 50 et 60%).

$$V_{\text{réelle}} = R\% V_{\text{théorique}}$$

Des essais en laboratoire, ont pu montrer que :

Le temps de séjour varie de 2 à 6h;

La profondeur 3 et 4m voir 6m.

Pour un décanteur rectangulaire : L/l varie de 3 à 6 ; $L < 30m$; $l < 10m$; L/H voisine de 10.

Pour un décanteur circulaire : H/R varie de $1/8$ à $1/6$; R varie de 7 à 15 m.

III.3.2. Décanteurs à flux vertical

La même notion s'applique à la décantation verticale, dans le décanteur vertical simple, la vitesse de Hazen est égale à la vitesse ascensionnelle. La vitesse ascensionnelle est la vitesse de circulation de l'eau vers le haut dans la partie supérieure cylindrique de l'ouvrage (**Figure. 3.5**).

Avec V_S : vitesse de stocks ou vitesse de chute théorique en statique

V_H : vitesse de Hazen dans l'ouvrage

V_C : vitesse de chute réelle.

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

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

Tous les décanteurs verticaux font appel au voile de boue du fait de cet équilibre des vitesses et ce, quelle que soit la technique utilisée avec ou sans flocculateur ou recirculation des boues. Le rôle du voile de boue est essentiel, il joue également le rôle de filtre pour les flocons de faible dimensions. En son sein se produit le phénomène de coalescence. Ce sont des ouvrages de forme conique ou pyramidale pour permettre un contrôle plus aisé du voile de boues. On rencontre les ouvrages suivants :

- décanteurs dits statiques,
- décanteurs à circulation de boues,
- décanteur à lit de boues.

V maximum dans ce type d'ouvrage = $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (m/h).

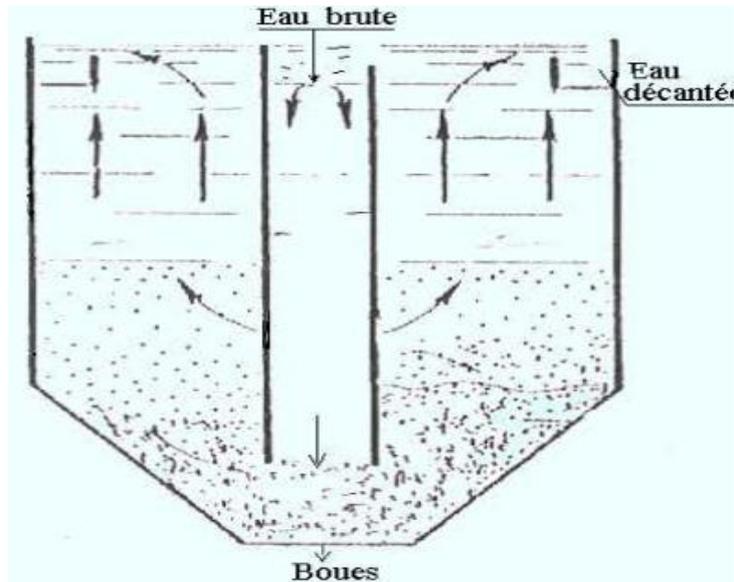


Figure. 3.5 : Décanteur à flux vertical.

III.3.3. Clarificateurs à contact des boues (décanteurs-floculateur)

Ce type de décanteur réunit en un seul appareillage les fonctions de mélange et coagulation, de floculation et de décantation. On les trouve de plus en plus dans les stations de conception récente. L'idée dans ces appareils est de mettre en contact l'eau flocculée avec des boues déjà formées (Figure. 3.6). La décantation dans ce cas, est à écoulement ascendant.

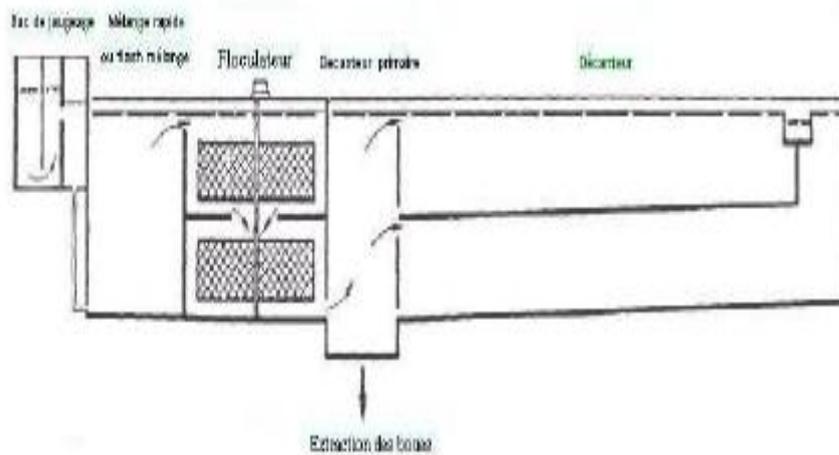


Figure. 3.6 : Clarificateur à contact des boues

On trouve deux types de clarificateurs à contact de boues:

- ✓ Clarificateurs à recirculation de boues;
- ✓ Clarificateurs à lit de boues.

Ces décanteurs peuvent comporter, de l'amont vers l'aval :

- Une chambre de mélange rapide des réactifs,
- Un flocculateur,
- Une chambre de coalescence,
- Les couloirs superposés de décantation dans lesquels l'eau pénètre par la partie supérieure.

L'eau décantée est reprise à la partie aval par des déversoirs longitudinaux, la purge des boues est assurée par des tuyaux perforés ou un racleur en fonctionnement continu.

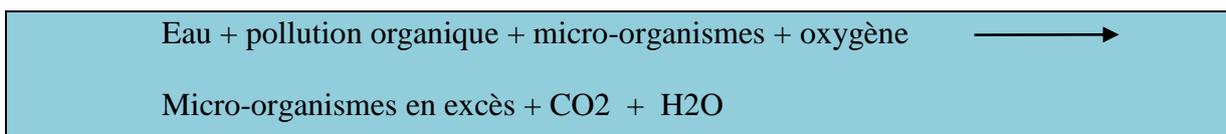
CHAPITRE IV : TRAITEMENTS SECONDAIRES

IV.1. Introduction :

Les techniques du traitement secondaire notamment biologique au niveau des stations d'épuration peuvent être anaérobies, c'est-à-dire se déroulant en absence d'oxygène, ou aérobies c'est à dire nécessitant un apport oxygène. Quel que soit le réacteur, il est alimenté d'une manière continue ou semi continue, les micro-organismes sont nourris par les matières organiques et transforment les polluants par le processus suivant :

- ↳ par adsorption ou absorption des matières polluantes sur le floc bactérien ;
- ↳ par conversion des matières cellulaires : croissance des microorganismes associés ;
- ↳ par oxydation en CO_2 et H_2O qui produit l'énergie nécessaire au fonctionnement et à la production de nouveaux matériaux cellulaires.

Le bilan global de la métabolisation de la matière organique est le suivant :



Les systèmes à boues activées étaient utilisés en premier pour l'élimination de la charge carbonée, qui était considérée comme la forme de pollution la plus dangereuse. Par la suite on s'est rendu compte que la forme azotée exerce également une demande (stress) sur le niveau d'oxygène dissous dans le milieu récepteur.

Des modifications ont été apportées pour prendre en charge la forme azotée de la pollution en considérant seulement son oxydation en nitrates à travers la nitrification. Les recherches ont montré davantage que les nitrates devraient être éliminés pour ce qu'ils représentent comme risques pour la santé publique et pour la préservation de nappes et des barrages ; Ceci a poussé les utilisateurs des systèmes à boues activées à adapter ce dernier à ces nouvelles contraintes en

considérant la dénitrification, la transformation des nitrates en azote gazeux sous des conditions anaérobies avec un apport de carbone présent dans les eaux usées en considérant différents recyclages.

De même le problème de l'élimination du phosphore s'est posé vu le risque, plus important que celui du carbone, qu'il représente pour l'eutrophisation des barrages et des lacs.

Parmi les traitements biologiques, on distingue :

IV.2. Epuration biologique à biomasse suspendue (les boues activées) :

L'épuration par les boues activées est un procédé dont l'objectif est de reproduire, à l'échelle industrielle, les mécanismes du pouvoir auto-épurateur des eaux naturelles de surface (lacs, rivières, ...etc.). Cette appellation de boues activées trouve son origine dans l'observation lors d'une aération suffisante des eaux, de dépollution. Le traitement s'effectue dans des réacteurs (O_2) où l'on met en contact des micro-organismes épurateurs et l'eau à épurer.

IV.2.1. Principe :

Ce traitement a pour but d'éliminer les matières organiques biodégradables (solides, colloïdales ou dissoutes) contenues dans une eau usée par l'action de micro-organismes, essentiellement des bactéries, en présence d'oxygène dissous. De plus, il peut (dans la mesure où il est conçu pour cela) transformer l'azote organique et ammoniacal en nitrates (nitrification).

Ce procédé consiste à alimenter un bassin brassé et aéré (un bassin d'aération appelé généralement un bassin de décantation) avec 'eau à épurer. L'aération peut être assurée en surface par des turbines, ou par le fond par des procédés de rampe de distribution de bulles d'air (**Figure. 4. 1**).

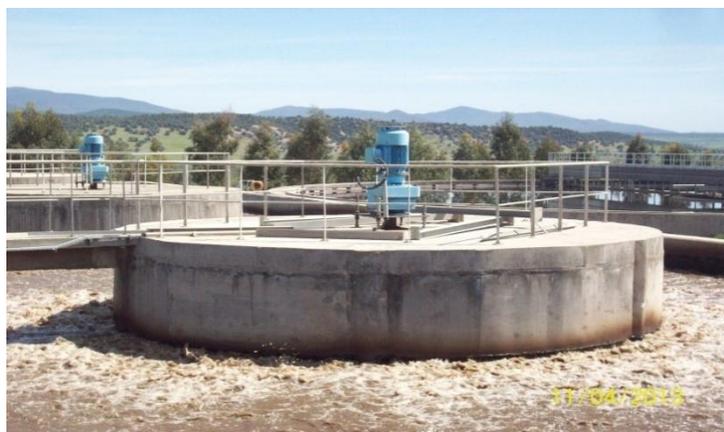


Figure. 4. 1: Bassin d'aération. (Source STEP de Guelma).

Une culture bactérienne, dispersée sous forme des flocons (boues activées) se développe et forme avec l'eau usée une liqueur mixte. Après un temps de contact suffisant, permettant la fixation et l'assimilation de la matière organique, cette liqueur mixte est envoyée dans un clarificateur (ou décanteur secondaire) où s'effectue la séparation de l'eau épurée et des boues (**Figure. 4.2**) Les boues décantées sont réintroduites en partie dans le bassin d'aération (recirculation des boues) pour maintenir un équilibre constant entre la quantité de pollution à traiter et la masse de bactéries épuratrice. Les boues sont évacuées du système vers le traitement des boues (extraction des boues en excès).

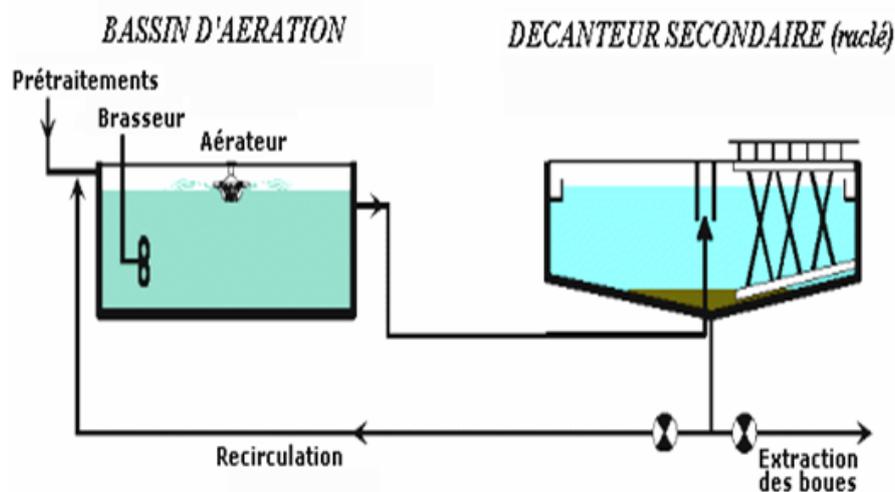


Figure. 4.2: Schéma de fonctionnement d'une station à boues activées.

IV.2.2. Classification

Les systèmes à boues activées sont classés en fonction de la charge appliquée que ce soit:

- La charge massique (C_m): qui est le rapport de la pollution appliquée par jour (kgDBO_5/j) sur la masse de la matière épuratrice (kg de matières sèches totales contenus dans le réacteur),
- La charge volumique (C_v): qui est le rapport de la pollution appliquée par jour (kgDBO_5/j) sur le volume du réacteur (m^3).

Charge d'une installation :

On définit la charge massique comme étant le rapport de la pollution entrante par unité de masse de population bactérienne chargée de son élimination, la masse bactérienne étant évaluée par le poids de MVS.

$$C_m = \text{DBO}_5 \text{ (entrée (kg/j))} / \text{kg MVS dans l'aérateur.}$$

On distingue les systèmes (**Tableau. 4.1**) :

- | | |
|--|--------------------|
| ▪ à oxydation totale (aération prolongée) | $0,05 < C_m < 0,1$ |
| ▪ à faible charge (kgDBO5/kg boues .j) | $0,1 < C_m < 0,2$ |
| ▪ à moyenne charge (kgDBO5/kg boues .j) | $0,2 < C_m < 0,5$ |
| ▪ à forte charge (kgDBO5/kg boues .j) | $0,5 < C_m < 1$ |
| ▪ à très forte charge (kgDBO5/kg boues .j) | $1 < C_m < 5$ |

La charge volumique est intéressante pour le dimensionnement rapide des bassins d'aération, elle n'a aucune signification biologique.

➤ **Avantages :**

Le procédé à boues activées permet de réduire le temps de séjour de la pollution ainsi que les surfaces du terrain utilisé .Il offre l'avantage d'une recirculation de la culture bactérienne ce qui conduit à un enrichissement du bassin par les micro-organismes épurateurs.

➤ **Inconvénients :**

Les installations à boues activées sont très coûteuses vu l'équipement qu'elles comportent (ouvrages en béton, ouvrages métalliques, appareillages électromécaniques...). L'exploitation de ce type de station exige un personnel qualifié et une vigilance permanente, le bon rendement repose sur le bon fonctionnement des aérateurs.

Tableau. 4.1 : Les modes d'épuration.

Mode d'épuration Paramètre	Forte charge (I)	Moyenne charge (II)	Faible charge (III)	Aération prolongée (très faible charge) (IV)
Cm (Kg DBO ₅ /KgMVS J)	≥ 1	0,2 à 0,5	0,1 à 0,2	≤ 0,1 (=0,07)
Cv (Kg DBO ₅ /m ³ J)	1,5	0,55 à 1,5	0,3	0,25
ts (heures)	1 à 3	3 à 6	6 à 18	≥ 18
Concentration des boues dans le bassin d'aération Cb= Cv/Cm (Kg/m ³)	2 à 3	3 à 4	4 à 5	≥ 15
Quantité de boues produites (Kg de boue sèche /Kg de DBO ₅ éliminé)	≥ 0,5	0,3 à 0,5	0,1 à 0,2	≤ 0,1
Consommation de O ₂ (Kg de O ₂ / Kg de DBO ₅ éliminé)	0,3 à 0,8	0,8 à 1,2	1,2 à 1,5	1,5 à 2
Nitrification	Nulle	Début	Avancée	Très avancée
Rendement (%)	70 à 80	80	90	95

IV.3. Epuration biologique à biomasse fixée :

IV.3.1. Le lit bactérien :

Ce traitement est basé sur le principe d'infiltration à travers le sol. Un lit bactérien se présente comme une colonne circulaire pouvant atteindre 4 à 5 mètres de hauteur dans laquelle se trouve un matériau poreux (**Figure. 4.3**). Les eaux à traiter ruissellent à la surface de la pellicule biologique qui prolifère sur le support, celle-ci renferme une forte concentration de bactéries et de champignons. Ces organismes absorbent et métabolisent la matière organique de l'effluent.

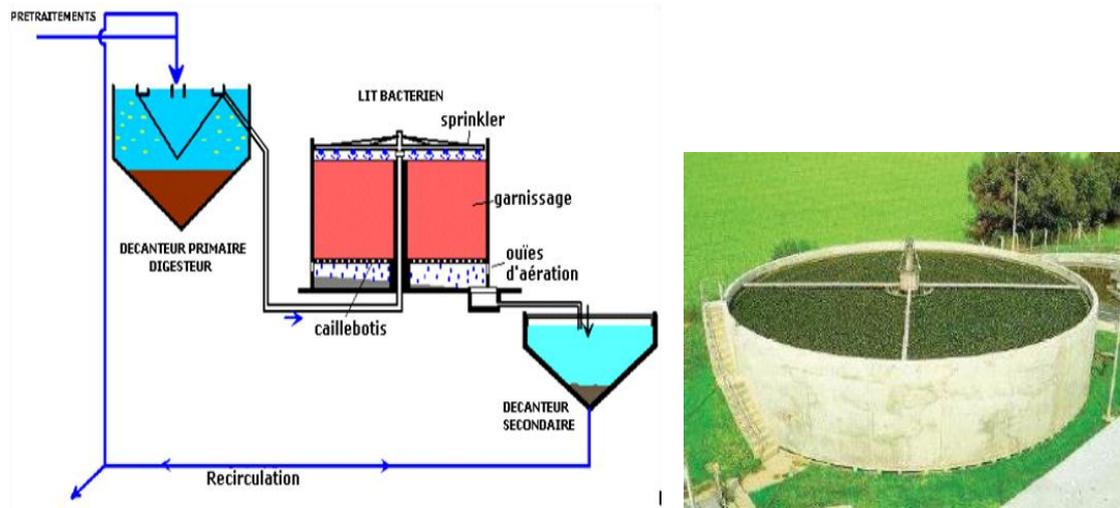


Figure. 4.3: Lit bactérien.

➤ **Avantages :**

Un bon rendement est atteint avec un choix convenable du matériau et des dimensions des pores (augmentation de la surface spécifique). Les lits bactériens sont aussi performants dans le cas d'effluents urbains ou dans le cas de certaines industries spécifiques (parfumeries, agro-alimentaires). L'exploitation d'une station à lits bactériens reste très simple, il n'y a pas de gestion de stock de boues.

➤ **Inconvénients :**

Les traitements préalables doivent être performants, faute de quoi, un encrassement progressif apparaît qui contraint à vider, laver et remettre en place le matériau du lit.

On enregistre de plus de fréquentes odeurs liées au changement de saisons.

IV.3.2. Le disque biologique :

Dans le procédé à bio disques le support est constitué par des disques parallèles régulièrement espacés sur un axe horizontal, tournant à faible vitesse et immergés sur la moitié de leur hauteur (Figure. 4.4). Ce mouvement induit une oxygénation de la culture pendant la période d'immersion. Les performances de ce procédé sont liées à :

- La profondeur d'immersion des disques (généralement deux mètres) ;
- vitesse de rotation de l'arbre qui doit être optimale pour permettre une aération et une fixation des bactéries convenable ;

- La température qui doit être comprise entre 15 et 29°C.

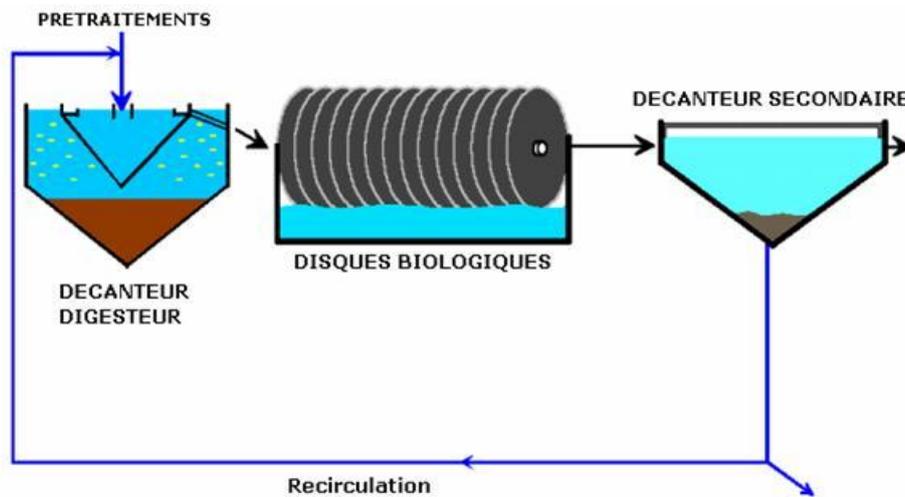


Figure. 4. 4: Disque biologique.

- **Avantages :**

Ce procédé économique est d'une extrême simplicité d'exploitation.

- **Inconvénients :**

Les disques biologiques ne s'adaptent pas au traitement à forte charge. Ils sont très sensibles à la qualité des eaux à traiter, aux pointes excessives des concentrations et de débits. Ils ne s'adaptent qu'au traitement des effluents de petites agglomérations.

IV.4. Epuration biologique à biomasse libre :

Les traitements extensifs sont souvent préférés aux traitements conventionnels pour assurer l'épuration des eaux usées des petites et moyennes collectivités. La raison de cette préférence est leur fiabilité, la simplicité de leur gestion et la modestie des coûts de fonctionnement. Parmi ces procédés on distingue :

IV.4.1. Epannage :

La première technique d'épuration des eaux usées des faibles agglomérations a été celle des champs d'épandage. Le système épurateur est donc constitué à la fois du sol et des cultures.

- **Avantage :**

- enrichissement du sol par les éléments nutritifs.

➤ **Inconvénients :**

- risque de contamination des nappes aquifères ;
- risque utilisation de grandes surfaces de terrain ;
- dispersion des germes pathogènes ;
- procédé non utilisé en période pluvieuse.

IV.4.2. Le lagunage :

Ce sont des procédés utilisant de grandes surfaces (lagunes) s'appuyant sur les propriétés épuratrices d'un plan d'eau peu profond. On a deux types de lagunage :

IV.2.2.1. Le lagunage naturel :

Ce mode a pour principe d'utiliser la végétation aquatique comme agent épurateur des eaux polluées. L'épuration des effluents est réalisée essentiellement par des bactéries aérobies dont l'oxygénation est assurée par l'action chlorophyllienne de végétaux qui participent aussi à la synthèse directe de la matière organique (**Figure. 4.5**) :

- Les microphytes ou algues microscopiques sont essentiellement des algues bleues ou vertes difficilement séparables ;
- Les macrophytes ou végétaux macroscopiques qui comprennent des formes libres (exemple : lentilles d'eau) ou fixées (exemple : roseaux).

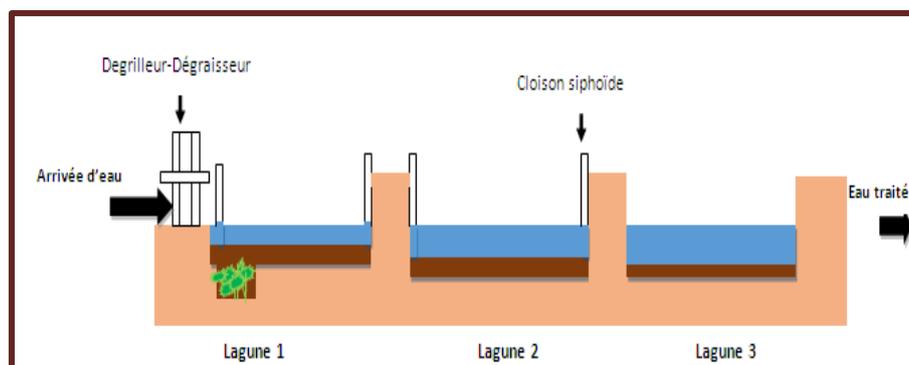


Figure. 4.5: Lagunage naturel.

➤ **Avantages :**

- généralement pour des petites stations de taille inférieure à 2000 EH ;

- bien adapté au réseau unitaire (charge hydraulique - dilution) ;
- faibles coûts d'exploitation ;
- bonne intégration dans l'environnement ;
- bonne élimination des pathogènes ;
- boues peu fermentescibles ;
- raccordement électrique inutile ;
- bonne élimination de l'azote (70 %) et du phosphore (60 %).

➤ **Inconvénients :**

- emprise au sol importante ;
- contraintes de nature de sol et d'étanchéité ;
- variation saisonnière de la qualité de 'eau traitée ;
- nuisances en cas de défaut de conception et/ou d'exploitation (rongeurs, odeurs, moustiques) ;
- élimination de l'azote et du phosphore incomplète ;
- difficultés d'extraction des boues ;
- pas de réglage possible en exploitation ;

IV.2.2.2. Le lagunage aéré :

L'apport d'oxygène est essentiellement assuré de façon artificielle : aérateurs mécanique flottants ou fixes, insufflation d'air.

IV.2.2.3. Le lagunage anaérobie :

Dans ces algues, le rendement d'épuration dépend essentiellement du développement d'une fermentation méthanique. Il n'est, de ce fait, applicable que sur des effluents à forte concentration, et le plus souvent, à titre de prétraitement avant un deuxième stade d'épuration de type aérobie.

CHAPITRE V : TRAITEMENTS COMPLEMENTAIRES

V.1. Introduction

Les eaux usées contiennent divers composés azotés provenant des déjections humaines, ainsi que du phosphore provenant pour l'essentiel des détergents utilisés pour les lessives. En effet, les phosphates sont employés pour annihiler l'action du calcaire en fixant des ions calcium permettant ainsi une meilleure performance du pouvoir nettoyant du détergent. Si ces substances ne sont pas directement nocives, leur action sur le milieu aquatique est néfaste. Elles diffusent jusqu'à la surface éclairée où elles favorisent la prolifération excessive d'algues et autres plantes vertes qui à leur tour décomposent nitrates et phosphates dont l'oxygène passe dans l'atmosphère. Elles jouent un rôle prépondérant dans l'eutrophisation des eaux.

Dans la STEP, ce traitement se généralise de plus en plus en combinaison avec le traitement secondaire. Il s'agit d'un procédé biochimique dit de boues activées à alternance de phase.

V.2. La nitrification et la dénitrification

V.2.1. Rappels théoriques

Dans la plupart des eaux usées, l'azote est sous forme organique ou ammoniacale (NH_4^+). Une correcte oxygénation dans le bassin d'aération permet aux bactéries de transformer l'azote organique en ammoniacque puis d'oxyder l'ammoniacque en nitrate (NO_3^-). Cette oxydation est une nitrification.

Les nitrates sont alors transformés en azote gazeux en condition anoxie :

- absence d'oxygène dissout
- présence d'oxygène combiné aux nitrates

Il faut stopper l'aération pour réaliser cette étape appelée dénitrification. Il est à noter que dans de nombreuses installations, cette phase n'est pas distincte du traitement secondaire puisque

réalisée à faible charge dans le bassin à boues. Il suffit d'alterner les phases d'aération et d'anoxie.

V.2.2. Les réactions d'ammonification

Equations chimiques

Ce sont les réactions de transformation de l'azote organique, c'est à dire liée à un radical carboné, en azote ammoniacal. Elles sont de type hydrolyse, désamination oxydative et désamination réductive.

La réaction la plus connue est celle de l'hydrolyse de l'urée, source principale de la pollution azotée en eau résiduaire urbaine.



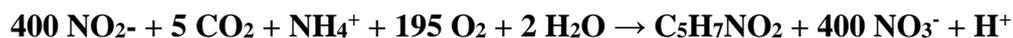
V.2.3. Les réactions d'oxydation de l'ammoniaque

Equations chimiques

Réaction de nitritation, oxydation de l'ammoniaque en nitrite.



Réaction de nitratisation, oxydation du nitrite en nitrate.

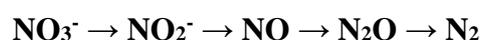


Ces réactions montrent que l'oxydation par voie biologique de l'ammoniaque en nitrate consomme une très forte quantité d'oxygène, libère des protons principalement en nitritation et produit une très faible synthèse de biomasse.

V.2.4. Les réactions de dénitrification

Equations chimiques

La dénitrification par voie biologique hétérotrophe est une réduction du nitrate en azote gazeux via une série d'intermédiaires :



Les nitrates jouent le rôle d'accepteur final d'électrons à la place de l'oxygène. Cela reste donc un métabolisme aérobie malgré la stricte absence d'O₂ dissous.

Ainsi la dénitrification hétérotrophe nécessite pour se réaliser la présence de pollution carbonée qui peut être puisée directement dans l'eau brute ou ajoutée (éthanol, méthanol,...). En outre, une dénitrification dite endogène peut se mettre en place basée sur la seule demande en oxygène des boues pour maintenir leur métabolisme. Il est évident que cette dernière voie se traduira par des cinétiques beaucoup plus réduites que celles obtenues en présence d'une source carbonée, cependant, elle est d'une importance majeure dans l'efficacité des stations d'épuration.

V.3. La déphosphatation biologique

La technique la plus utilisée pour l'épuration du phosphore consiste en la précipitation chimique par adjonction de sels métalliques (fer ou aluminium), ou de chaux. Les phosphates précipitent sous forme de sels métalliques ou d'hydroxydes et sont séparés de la phase liquide par décantation.

Les principaux réactifs sont le sulfate d'alumine, d'aluminate de soude, le sulfate ferreux, le chrome ferrique, le chlorosulfate ferrique et la chaux.

L'ajout du réactif peut-être effectué :

- après les prétraitements et avant le décanteur primaire ou le bassin d'aération, c'est la précipitation.
- à l'aval du clarificateur, sur l'effluent épuré : c'est la post-précipitation. Nécessité d'un décanteur supplémentaire.
- Directement sur le bassin d'aération : c'est la précipitation simultanée, qui est la plus utilisée.

L'élimination peut également être partiellement faite par voies biologiques, l'installation doit alors être équipée d'un bassin ou d'une zone d'anoxie. L'alternance entre aérobiose et anoxie favorise un mécanisme de relargage /sur accumulation de phosphore dans la biomasse épuratrice.

V.4. Elimination de l'ammoniac

L'ammonium dans l'eau traduit habituellement un processus de dégradation incomplet de la matière organique. L'ammonium provient de la réaction de minéraux contenant du fer avec des nitrates. C'est donc un excellent indicateur de la pollution de l'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industriel.

Les ions ammonium réagissent avec le chlore pour donner des chloramines

- qui réduisent le pouvoir bactéricide du chlore
- qui conduisent à des mauvais goûts
- qui peuvent induire la production de nitrite

Les ions ammonium sont des nutriments qui induisent une post prolifération bactérienne dans le réseau de distribution. Les procédés unitaires utilisés pour l'élimination de l'ammonium sont:

- Oxydation chimique ;
- Echange ionique ;
- Le stripping ;
- La filtration biologique.

V.4.1. Oxydation chimique :

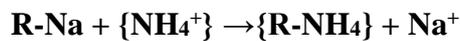
Un procédé efficace à utiliser dans des conditions très précises. L'oxydant utilisé est le chlore que l'on injecte à une concentration au-delà du point critique (break-point) afin qu'il ait réagi avec tous les composés azotés présents dans l'eau. En théorie, cela revient à ajouter 9,8 mg $\text{Cl}_2/\text{mg NH}_4^+$ (dose stœchiométrique). Cependant, les taux couramment pratiqués sont en général proches de 13 mg $\text{Cl}_2/\text{mg NH}_4^+$, afin de tenir compte des autres demandes en chlore, et en particulier de celles des matières organiques. Du fait des doses importantes nécessaires, ce procédé est réservé aux faibles teneurs en ammonium ($< 0,5 \text{ mg/l}$). Tout le chlore ajouté au-delà du break-point est alors présent sous forme de chlore libre, l'ammonium étant donc totalement oxydé. En revanche, il n'est pas mis en œuvre pour des eaux présentant de fortes demandes en chlore, car il peut alors être à l'origine de la formation d'organochlorés et de trihalométhanes (THM) dont la concentration maximale admissible est de 100 $\mu\text{g/l}$.

La chloration doit dans ce cas être effectuée en fin de filière. Il est à remarquer que l'ozone et le dioxyde de chlore sont inefficaces pour éliminer l'ammonium

V.4.2. L'échange ionique :

Il est possible d'utiliser des résines naturelles, les zéolithes (chabaniste, modernite, clinoptilolite), ou des résines synthétiques, ces dernières étant à privilégier pour des raisons de longévité et de facilité de mise en œuvre. Celles-ci, de type cationique, fixent en priorité les ions calcium et magnésium, et, dans une moindre mesure, les ions ammonium. Leur utilisation

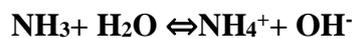
ne se justifie donc que dans le cadre d'un traitement d'adoucissement. Elles permettent alors l'élimination de l'ammoniaque et même éventuellement de certains micropolluants cationiques (arsenic, gallium...). Ce procédé repose sur l'échange des ions ammonium contenus dans l'eau avec des ions sodium contenus dans la résine, selon la réaction suivante :



Après saturation, les résines doivent être régénérées.

V.4.3. Le stripping : (dégazage par aération).

Un procédé peu adapté à la potabilisation. L'ammoniac est une base faible qui s'hydrolyse dans l'eau pour former des ions ammonium et hydroxyde, suivant la réaction suivante :



Le pH doit être supérieur à environ 8 pour pouvoir détecter la présence d'ammoniac (NH₃) et éliminer l'azote ammoniacal par stripping. Le procédé nécessite donc en général, un ajustement du pH. Il est de plus dépendant de la température (Figure. 5.1).

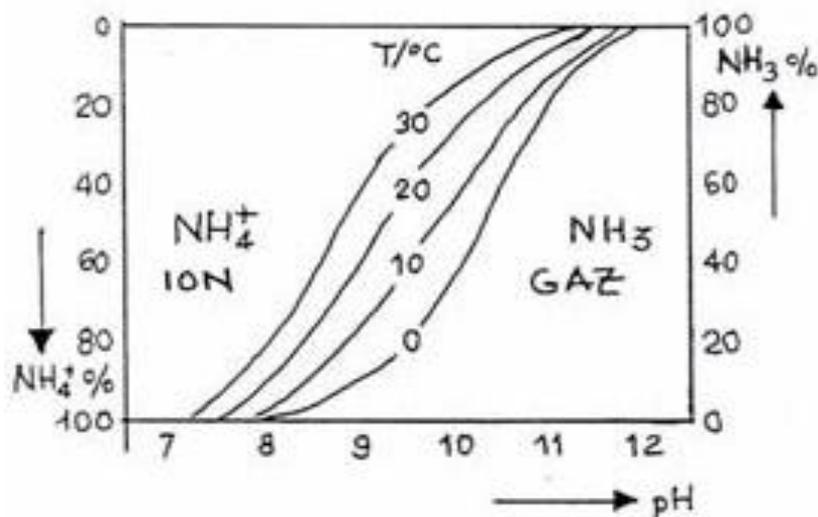
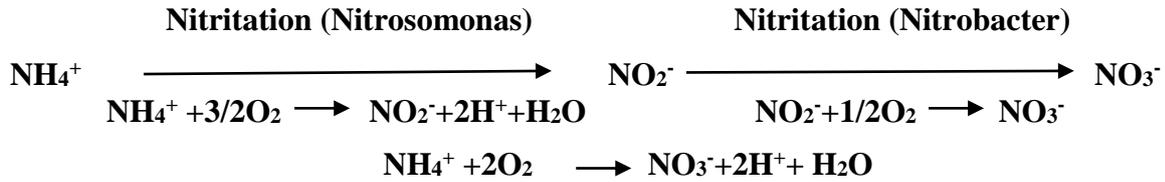


Figure. 5.1: Ammonium NH₄⁺ et Ammoniac NH₃ dans l'eau.

V.4.4. La filtration biologique :

Un procédé performant mais nécessitant certaines contraintes d'exploitation. L'élimination biologique de l'ammonium (nitrification) s'effectue en deux étapes, mettant en œuvre deux types de bactéries aérobies et autotrophes (c'est-à-dire consommatrices de carbone minéral), qui transforment l'ion ammonium en nitrites, puis en nitrates.



En fonction de la teneur en ammonium dans l'eau à traiter, plusieurs procédés peuvent être mis en œuvre.

- $\text{NH}_4^+ \leq 1 \text{ mg/l}$ Filtration sur sable.
- $1 \leq \text{NH}_4^+ \leq 2 \text{ mg/l}$ Filtration sur argile expansé, matériau poreux présentant une surface développée importante favorisant le développement de la biomasse.
- $\text{NH}_4^+ > 2 \text{ mg/l}$ Biofiltration aérée sur argile expansé, avec apport d'air dans la masse de contact pour assurer la croissance des bactéries

V.5. Stérilisation des eaux

Les eaux épurées contiennent plus d'un million de micro-organismes par litre dont certains sont néfastes pour l'homme. Lorsque l'eau épurée est rejetée en zone de captage pour l'alimentation en eau potable ou de baignade, la réduction des micro-organismes s'impose alors.

Cette réduction s'effectue :

- sur filtre à sable qui retient les dernières particules, donc les micro-organismes qui y sont fixés
- par désinfection chimique (chlore, ozone ...)
- par lagunage lorsque aucun problème d'encombrement ne se pose.

Conclusion

En conclusion, si tous les êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable et que tant de personnes en souffrent et en meurent, c'est parce que tous les pays n'ont pas les mêmes infrastructures, pas le même niveau de développement, l'eau ne manque pas, simplement la faire parvenir jusqu'aux endroits demandés est très difficile dans certains pays. L'importance de l'eau dans l'économie humaine ne cesse de croître, et l'approvisionnement en eau douce devient ainsi de plus en plus difficile, tant en raison de l'accroissement de la population et de son niveau de vie que du développement accéléré des techniques industrielles modernes.

L'eau ne suffit pas, il faut évidemment qu'elle soit potable, et comme nous l'avons expliqué, l'eau est aussi la cause de graves maladies, c'est pour cela qu'une eau avant d'être consommée doit avoir subi un traitement et respecter des normes. Sans eau, la vie n'est pas possible, c'est pour cela que c'est un besoin indispensable à l'homme.

À travers l'histoire, la société s'est peu souciée de la protection de l'environnement et des ressources en eau en particulier. Pendant des années, nous pouvions rejeter nos déjections, peu ou non traitées dans le cours d'eau le plus proche. Tant qu'il y avait assez d'eau pour opérer la dilution, la nature s'occupait de nos problèmes d'élimination. La charge de déchets allant en augmentant, le processus d'épuration naturelle a fini par ne plus suffire et les cours d'eau ont commencé à ressembler à des égouts à ciel ouvert. Au cours des cinquante dernières années, et plus récemment dans la plupart des régions, notre société a réalisé qu'elle devait aider la nature en traitant les eaux usées avant de les déverser dans l'environnement.

Nous en sommes venus à la conclusion que le traitement adéquat de nos eaux usées permet de mieux protéger la santé de la population. En plus, le traitement accroît la protection de la faune et du milieu aquatique et nous permet de profiter d'activités de loisirs sur l'eau et près des cours d'eau.

Références bibliographiques

- [1] Atteia, A. Chimie et pollutions des eaux souterraines, édition Tec et Doc (2005), 400 p.
- [2] Sigg, L, Behra, P et Werner S. Chimie des milieux aquatiques- Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement, édition Dunod (2006).
- [3] Rodier, J. L'Analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9 ème Edition Dunod, (2009).
- [4] Degremont Mémento Technique de l'eau 2 ème édition tome 1 édition Lavoisier, Paris, France, (2005). Valiron, F. Gestion des eaux d'alimentation en eau et assainissement, Ed. Presses Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (1990), 350p.
- [5] Desjardins, R. Le Traitement des Eaux, Ed. Ecole Polytechnique de Montréal, (1997), 303p.
- [6] Bonnin J. Hydraulique urbaine, 5ème édition Eyrolles, Paris, (1977), 228p.
- [7] Edeline, F. L'épuration biologique des eaux : Théorie et technologie des réacteurs, Ed. Cebedoc, liège, (1993), 298 p.
- [8] Gaid, A. Epuration biologique des eaux usées urbaines, Tome 1, Ed. OPU, Alger, (1984), 261 p.
- [9] Gaid, A. Epuration biologique des eaux usées urbaines, Tome 2, Ed. OPU, Alger, (1984), 234 p.
- [10] Gomella, C. et Guerree, H. Les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales, Tome 2 : Le traitement, Ed. Eyrolles, Paris (1982), 260p.
- [11] Ouali, M. Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux 2^{ème} Edition, office des publications universitaires, Alger (2008) 156p.