



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد ابن باديس - مستغانم

University Abdelhamid Ibn Badis- Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الجذع المشترك علوم و تكنولوجيا

Department of the Common Trunk Science and Technology



Techniques de Traitement des Eaux

*Polycopié de cours destiné aux étudiants en Licence
Raffinage et Pétrochimie*

Réalisé par :

Dr. Nor Eddine Guermoud

2023/2024

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I

I. Paramètres physicochimiques de l'eau.....	5
I.1 Les Gaz dissous.....	5
I.2 Température.....	6
I.3 Potentiel Hydrogène.....	6
I.4 La dureté de l'eau.....	7
I.5 Alcalinité de l'eau.....	8
I.6 Titre alcalimétrique complet.....	9
I.7 Mesure du TA et TAC.....	9
I.8 Le TA et TAC des eaux de chaudières.....	10
I.9 La salinité.....	11
I.10 la teneur en silice.....	11
I.11 La Turbidité.....	11
I.12 La conductivité électrique.....	12
I.13 Matières organiques.....	12
I.14 Micropolluants.....	13
I.15 Micro-organismes vivants.....	13

CHAPITRE II

II. Phénomènes physiques, chimiques et biologiques des eaux.....	14
II.1 Diminution de la solubilité des gaz dissous dans l'eau.....	14
II.2 Rupture de l'équilibre calco-carbonique.....	14
II.3 Effet de la température sur la solubilité des sels alcalino-terreux dans l'eau.....	14
II.4 Phénomènes biologiques de l'eau.....	15
II.5 Conséquences des phénomènes physico-chimiques de l'eau.....	15
II.6 La corrosion	19
II.7 Le primage.....	19

Chapitre III

III Le classement des eaux.....	21
III.1 Les eaux souterraines.....	22
III.2 Les eaux de surface.....	23
III.3 eaux de mer et eaux de saumâtres.....	24
III.4 Usages de l'eau.....	25
III.5 Critères de potabilité.....	26

Chapitre IV

IV Méthodes physico-chimiques de traitement des eaux.....	27
IV.1 Les prétraitements physiques.....	27
IV.2 Les traitements primaires.....	31
IV.2.1 Le Décolmatage mécanique.....	31
IV.2.2 Le Decolmatage.....	31
IV.2.3 Le Decolmatage physico-chimique.....	31
IV.2.4 La Coagulation- floculation.....	32
IV.2.5 La Decantation.....	36
IV.2.6 La Filtration.....	39
IV.2.7 La Desinfection.....	42
IV.2.8 La Deferisation- Demanganisation.....	49

Chapitre V

V Méthodes chimiques de traitement des eaux usées et industrielles	52
V.1 Traitement de base contre l'entartrage.....	53
V.2 La distillation.....	56
V.3 La déminéralisation.....	58
V.4 Le détartrage.....	61
V.5 L'osmose inverse.....	62
V.6 L'électrodialyse.....	64

Chapitre VI

VI Traitements biologiques des eaux usées et industrielles.....	66
VI.1 Traitements biologiques a boues activées.....	66
VI.2 Epuration biologique a biomasse fixée.....	68
VI.3 Le disque biologique.....	70
VI.4 Le lagunage.....	71
VI.5 Traitements des boues.....	72
Références bibliographiques.....	75

Introduction

La pénurie d'eau propre est un problème persistant et de plus en plus grave, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Il est généralement rare de trouver l'eau douce et propre. Une eau propre est essentielle pour l'homme. En effet, de nombreuses sources d'eau brute contiennent des micro-organismes nuisibles ou d'autres substances rendant l'eau impropre à la consommation humaine. Ces organismes et substances doivent être éliminés par des procédés de traitement, afin de rendre l'eau propre à l'usage domestique. Le traitement de l'eau brute regroupe de nombreux processus intégrés dans une usine appelé station de traitement pour produire une eau de la qualité souhaitée. L'utilisation de l'eau engendre un produit appelé l'effluent (eaux usées). Ce dernier contient plusieurs polluants qui modifieront l'eau de manière négative à la fois sur la santé et l'environnement. Le déversement de grandes quantités d'eaux usées dans le milieu naturel est devenu une source de préoccupation majeure pour plusieurs pays dont l'Algérie. Lorsque l'eau est polluée, sa décontamination devient nécessaire. L'épuration des eaux usées et industrielle est un procédé essentiel pour la protection et la réutilisation des ressources en eau. Les stations d'épurations intègrent de nombreux processus qui permettent d'atteindre les objectifs de qualité de l'eau susceptibles d'être rejetée ou réutilisée.

Le présent polycopie traite les techniques de traitement des eaux et s'adresse spécifiquement aux étudiants de la filière Raffinage et pétrochimie (3ème année Licence et Master). Ce document est scinde en cinq parties. La première et deuxième partie porte sur les propriétés physicochimiques de traitement des eaux, la troisième donne un aperçu sur le classement des eaux, alors que la quatrième, cinquième et sixième partie porte sur les méthodes de traitements physico-chimiques et biologique des eaux usées et industrielles. Ce support de cours permettra aux étudiants de maîtriser le domaine des techniques utilisées dans le traitement et l'épuration des eaux.

Chapitre I : Propriétés physicochimiques de l'eau

I. Paramètres physicochimiques

Les caractéristiques des eaux sont déterminées par des analyses analytiques dont certaines sont systématiques.

Les analyses les plus fréquentes concernent les paramètres suivants ;

- a- La température
- b- Oxygène dissous et anhydride carbonique dissous.
- c- Potentiel d'Hydrogène ou pH.
- d- La dureté TH et l'Alcalinité.
- e- La salinité.
- f- La teneur en silice.
- g- La turbidité et la conductivité.
- h- Matières organiques.
- i- Micropolluants et micro-organismes vivants

I.1. Les gaz dissous :

La teneur d'une eau en oxygène O_2 et en gaz carbonique CO_2 s'exprime en milligramme par litre d'eau, pour l'oxygène elle varie de zéro (eau naturelle de forage) à la saturation (eau de surface aérée). La présence d'oxygène dans l'eau conduit à des corrosions. Les eaux naturelles renferment des quantités variables de CO_2 , on le trouve en particulier dans les eaux douces et acides des régions granitiques. Le gaz carbonique dissous dans l'eau a une très grande importance, en effet, on peut considérer :

- Le gaz carbonique libre
- Le gaz carbonique équilibrant, nécessaire au maintien en solution des bicarbonates.

Trois cas peuvent se présenter : Eau agressive, eau équilibrante et eau incrustante.

I.2. Température

La température d'une eau potable devrait être inférieure en été et supérieure en hiver à la température de l'air. Pour que l'eau potable soit désaltérante sa température doit se situer entre 8 et 15 °C ; entre 20 et 25 °C elle désaltère mal.

Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme. Cependant, une température supérieure à 15 °C favorise le développement des micro-organismes dans les canalisations en même temps qu'elle peut intensifier les odeurs et les saveurs. Par contre, une température inférieure à 10°C ralentit les réactions chimiques dans les différents traitements des eaux.

I.3. Potentiel d'Hydrogène : pH

Quelque soit la pureté d'une eau, elle est toujours conductrice. Cette conductibilité est due à la dissociation très faible de l'eau en ions hydrogène H_3O^+ et en hydroxyde OH^- . Le produit des concentrations de ces ions est constant :

- $[OH^-] \times [H_3O^+] = 10^{-14}$ à 25°C.
- Par définition, le $pH = -\text{Log} [H_3O^+]$ et $pH + pOH = 14$.
- si $pH = 7$, la solution est neutre, $pH > 7$ solution basique, $pH < 7$ solution acide.

Le pH est fonction de la température, il diminue avec la température, en effet, à 22°C l'eau distillée contient un ion gramme d'hydrogène pour 10^7 litres. La concentration en ions H^+ est donc $1/10^7 = 10^{-7}$. A 200°C la concentration s'élève à $10^{-5,7}$.

En langage courant on dit que l'eau a un pH de 7 ou de 5,7. L'élévation de la température provoque donc une diminution de pH (Tableau 1).

Tableau 1 : Effet de la température sur le pH

Température en °C	pH
0	7,5
22	7,0
50	6,6
100	6,1
160	5,8
200	5,7
250	5,5

I.4. La dureté de l'eau

La dureté d'une eau est principalement due à la présence de sels de calcium et magnésium, pour cela on distingue :

La dureté totale ou **TH** : indique globalement la teneur en sels de calcium et magnésium.

La dureté permanente ou **P** : mesurée après ébullition et correspond aux sulfates et chlorures de Mg et Ca représentant la dureté non carbonatée. La dureté temporaire ou **T** : elle est due essentiellement due au bicarbonate de Ca et Mg. Elle peut être déduite de la différence entre la dureté totale et la dureté permanente ($T = TH - P$). Le tableau 2 donne la correspondance entre les diverses unités de la dureté de l'eau.

Tableau 2 : relations entre diverses unités de la dureté de l'eau

TH	Meq	Degré °F	Degré Ang	Degré U.S	Degré All	ppm en CaCO ₃
1 Meq	1	5	3,5	2,9	2,8	50
1 °F	0,2	1	0,7	0,58	0,56	10
1 ° Anglais	0,286	1,43	1	0,83	0,8	14,3
1 ° U.S	0,31	1,72	1,2	1	0,96	17,2
1 ° Allemand	0,356	1,79	1,25	1,04	1	17,9
1 ppm CaCO ₃	0,02	0,1	0,07	0,058	0,056	1

L'évaluation de la dureté de l'eau est directement liée au titre hydrotimétrique TH, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 3 : Dureté de l'eau en fonction du titre hydrotimétrique

TH °F	0 à 7	7 à 15	15 à 25	25 à 42	> 42
Eau	Très douce	Douce	Moyennement dure	Dure	Très dure

I.5. Alcalinité de l'eau : TA

Le titre alcalimétrique ou TA est égal au nombre de millilitres d'acide sulfurique N/50 nécessaire pour neutraliser à la phénolphtaléine 100 ml d'échantillon, d'eau. Il mesure ainsi la totalité de l'alcalinité libre plus la moitié de l'alcalinité de l'alcali combiné aux carbonates, plus le tiers de l'alcali combiné en monophosphate.

$$TA = [\text{OH}^-] + 1/2 [\text{CO}_3^{2-}] + 1/3 [\text{PO}_4^{3-}].$$

I.6. Titre Alcalimétrique Complet: TAC

Le TAC est égal au volume d'acide sulfurique N/50 nécessaire pour neutraliser au méthylorange 100 ml d'eau. Il mesure ainsi la totalité de l'alcalinité libre (OH⁻) plus la moitié de l'alcali combiné aux bicarbonates, plus le 2/3 de l'alcali du au monophosphate.

$$\text{TAC} = \text{TA} + [\text{HCO}_3^-] + 2/3 [\text{PO}_4^{3-}].$$

La différence entre le TH et le TAC correspond à la dureté apportée par les chlorures et les sulfates à condition que l'eau ne renferme pas de bicarbonates de sodium.

I.7. Mesure du TA et TAC

La détermination des titres TA et TAC est basée sur le principe de la neutralisation des alcalins en dissolution par de l'acide H_2SO_4 . Il existe deux réactifs chimiques ayant la propriété de changer de couleur à des pH précis qui nous indique la fin de la neutralisation à savoir :

I.7.1. la phénolphtaléine

Elle colore en rouge les eaux contenant des produits alcalins et vire à l'incolore à $\text{pH} = 8,3$, on l'utilise pour mesurer le TA.

I.7.2. L'hélianthine ou Méthylorange

Il colore en jaune les eaux contenant des produits alcalins et vire au rouge à $\text{pH} = 4,3$, on l'utilise pour mesurer le TAC.

Pour une eau de Chaudière on peut écrire :

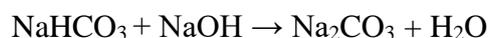
$$\text{TA} = \text{Base} + \text{Na}_2\text{CO}_3 / 2 + \text{Na}_3\text{PO}_4 / 3$$

$$\text{TAC} = \text{Soude} + \text{Total carbonates} + \text{Total bicarbonates} + 2/3 \text{ phosphates}$$

On peut écrire donc que le TAC d'une eau de chaudière devient égale à :

$$\text{TAC} = \text{Base} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2/3 \text{ Na}_3\text{PO}_4$$

On remarque l'absence des bicarbonates de sodium dans les eaux de chaudières, c'est qu'en effet ils ne peuvent être présents dans l'eau en même temps que les bases, celles-ci réagiraient sur eux comme suit :



- a) Si $TA = 0$, l'eau ne contient ni soude, ni carbonates, mais elle peut renfermer des bicarbonates, c'est le cas des eaux brutes.

Si le $TAC > 0$, on se trouve donc en présence de bicarbonates de calcium et de magnésium, le TAC représente la dureté temporaire en supposant l'absence dans l'eau de bicarbonates de sodium.

Si l'on connaît la dureté totale TH, la dureté permanente est : $P = TH - TAC$.

- b) Si $TA = TAC/2$; l'eau ne contient que les carbonates alcalins.
- c) Si $TA < TAC/2$; l'eau renferme un mélange de carbonates et de bicarbonates.
- d) Si $TA > TAC/2$; l'eau ne contient plus de bicarbonates, mais un mélange de bases fortes (NaOH) et de carbonates.
- e) Si $TA = TAC$; l'eau ne renferme plus que de bases fortes.

I.8. Le TA et TAC des eaux de chaudières

- **1^{er} Cas : $TA = TAC/2$**

C'est le rapport idéal vers lequel il faut tendre, l'eau ne contient que des carbonates neutres de sodium. Ce rapport est valable pour des chaudières ayant un timbre inférieur à 30 bars. Pour des timbres supérieurs à 35 bars et dans le cas de l'utilisation de la vapeur dans une turbine, le respect de ce rapport devient une obligation.

- **2^{eme} Cas : $TA > TAC/2$**

Prenons l'exemple suivant ; $TA = 71^\circ F$ et $TAC = 99^\circ F$

$TA - TAC = 43^\circ F$, donc la concentration en NaOH serait de : $43 \cdot 0,2 \cdot 40 = 344 \text{ mg/l}$.

Cet excès de soude peut trouver son origine par un trop fort excès de phosphates ou à un débit trop faible de purges continues. Ceci entraîne un risque de fragilité caustique et une augmentation de la salinité totale et donc risque de primage.

I.9. La Salinité

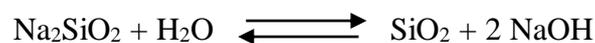
La salinité s'exprime en milligrammes ou en grammes de sels solubles par litre d'eau. Les faibles salinités sont exprimées en résistivité électrique. La concentration globale en sel d'acide fort (SAF) est un élément important à connaître spécialement lorsque l'eau doit être déminéralisée.

Les sels en solution se dissocient en deux groupes de particules appelées ions dont l'origine peut être à base de métaux (non métaux), donnant naissance à des cations de charges positives (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) ou à base d'acides donnant naissance à des anions de charges négatives comme par ex (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , OH^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-}).

I.10. La Teneur en Silice

Cette teneur s'exprime en milligrammes de SiO_2 par litre d'eau. Les eaux plus douces sont les eaux les plus riches en silices, le plus souvent dans les régions granitiques ou argileuses. La teneur en silice varie entre quelques milligrammes et 50 mg/l.

A l'échelle industrielle, l'eau destinée à la production de la vapeur ne doit pas dépasser 3 mg/l. La solubilité de la silice augmente avec la température et la pression. Les tartres à base de silice sont extrêmement durs, très mauvais conducteurs de la chaleur et en plus très difficile à éliminer, ce sont les plus dangereux. Dans certaines conditions, les silicates sont dissociés en silice SiO_2 et en hydroxydes selon la réaction suivante :



I.11. La Turbidité

La turbidité d'une eau mesure l'aspect plus ou moins trouble de l'eau. Ceci est dû à la présence des particules en suspension, associés parfois au transport de l'eau, notamment après pluie. L'évaluation de la présence de ces particules mesure son degré de turbidité.

Elle peut être favorisée par la pluviométrie. La turbidité engendre les mêmes conséquences que les MES proprement dites.

I.12. La Conductivité Electrique : CE

La conductivité électrique d'une eau représente la capacité (facilité) d'une eau a conduire un courant électrique. Elle est inversement proportionnelle à la résistivité électrique. Plus la résistivité d'une eau est élevée moins elle contient de sels solubles et vis versa. La conductivité s'exprime en Siemens/cm, alors que la résistivité s'exprime en OHMS/cm.

La mesure de la conductivité permet d'_évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau (sels dissous dans l'eau) (tableau 4).

Tableau 4 : Classification des eaux en fonction de la conductivité et résistivité

Nature de l'Eau	Conductivité	Résistivité
	$\mu\text{S/cm}$	$\Omega. \text{Cm}$
Eau très pure	Inférieure à 50	Supérieure à 20 000
Eau douce peu minéralisée	100 à 200	5 000 à 10 000
Eau de minéralisation moyenne	250 à 500	2 000 à 4000
Eau très minéralisée	1000 à 2500	400 à 1000

I.13. Matières Organiques : MO

Proviennent des rejets industriels et urbains et de la dissolution par les pluies de débris végétaux décomposés, très souvent à l'origine des mauvaises odeurs et de la coloration de l'eau. Ces matières au même titre que les éléments en suspension, argiles, boues, etc., sont éliminées dans les usines de traitements des eaux.

I.14. Les micropolluants

Oligo-éléments : Les oligo-éléments sont principalement des cations ou des anions qui se présente dans les eaux en faible quantité, mais dont le rôle est très important. Les principaux sont : cuivre, zinc, cobalt, manganèse, argent, aluminium, molybdène, sélénium.....

Métaux lourds : Les métaux lourds sont largement répandus dans la nature (les roches), essentiellement sont : le cadmium, le chrome, le plomb, le mercure, le sélénium, l'arsenic.

Les détergents : Les détergents sont des composés tensio-actifs synthétiques dont la présence dans les eaux est due aux rejets d'effluents urbains et industriels.

Matières phénoliques : La présence des phénols dans l'eau a, le plus souvent, pour origine les pollutions industrielles (usines chimiques, cokeries, papeteries, raffineries, pétrochimie...). Les revêtements bitumineux des canalisations peuvent, lors des réparations et des mises en service, introduire dans le réseau des quantités de phénols.

Les pesticides : On désigne généralement sous ce terme, les produits utilisés pour lutter contre les organismes qui portent atteinte à la santé publique, ou qui s'attaquent à tous les stades et de toutes les manières aux ressources végétales ou animales nécessaires à l'alimentation humaine. On distingue : les insecticides, les fongicides, les herbicides, etc...

I.15. Les micro-organismes vivants

L'eau ne doit pas contenir aucun germe pathogène. Les germes recherchés proviennent de la contamination d'origine fécale et sont : Bacille de Coli ou Eschérichia Coli ; Entérocoque ; Clostridium Sulfitoréducteur ; Bactériophages fécaux ; Streptocoques fécaux.

Chapitre II : Phénomènes physiques, chimiques et biologiques des eaux

II.1. Diminution de la solubilité des gaz dissous dans l'eau

Les solubilités de l'oxygène et du CO₂ varient avec la pression et la température, à la pression atmosphérique, elles décroissent quand la température s'élève pour devenir nulles vers 100°C.

De plus, le gaz carbonique est facilement entraîné par un simple courant d'air.

II.2. Rupture de l'équilibre Carbonique

Dans les eaux naturelles, les bicarbonates sont en équilibre avec les carbonates et l'anhydride carbonique, selon les réactions suivantes :



Le chauffage ou même une simple aération provoque le départ du CO₂ et de ce fait la précipitation des carbonates et de la magnésie. Pour la majeure partie des eaux naturelles, ce phénomène intervient vers 60 °C, s'accélère vers 80 °C et devient total à l'ébullition.

II.3. Effet de la température sur la solubilité des sels alcalino-terreux dans l'eau

Les composés dont la solubilité des sels augmente avec la température ont un coefficient de solubilité positif. Les composés dont la solubilité diminue avec la température ont un coefficient de solubilité négatif. Quelques sels ont des coefficients de solubilité positive entre certaines limites et négatifs entre d'autres limites.

II.4. Phénomènes biologiques de l'eau

La prolifération des organismes vivants est fréquente dans les réseaux de distribution et dans les circuits industriels, on parle de bactéries, d'algues pour désigner les amas qui se forment dans les canalisations et les appareils. De nombreux facteurs conditionnent le développement de ces organismes.

II.5. Conséquences des phénomènes physico-chimiques de l'eau

II.5.1. Le Colmatage

Le colmatage des circuits et des réseaux de refroidissement a deux causes :

- la présence de matières en suspension dans l'eau ;
- la prolifération d'algues, champignons et bactéries.

Le colmatage se fait aux points bas et gêne la circulation de l'eau sur les circuits. Le colmatage comme l'entartrage réduit le coefficient d'échange entre l'eau et la paroi.

II.5.2. L'entartrage

Ce phénomène peut se manifester à l'intérieur des chaudières, sur les réseaux de distribution, dans les circuits de chauffage, de refroidissement et plus spécialement dans les échangeurs de chaleur. En effet, l'élévation de la température et cela à partir de 55°C va provoquer la dissociation des bicarbonates de calcium et de magnésium, amener la précipitation de carbonates de calcium et de magnésium qui sont insolubles et ainsi former le tartre.

Une cause générale de ce phénomène, la rupture de l'équilibre calco-carbonique. La figure suivante illustre clairement le processus de formation du tartre.

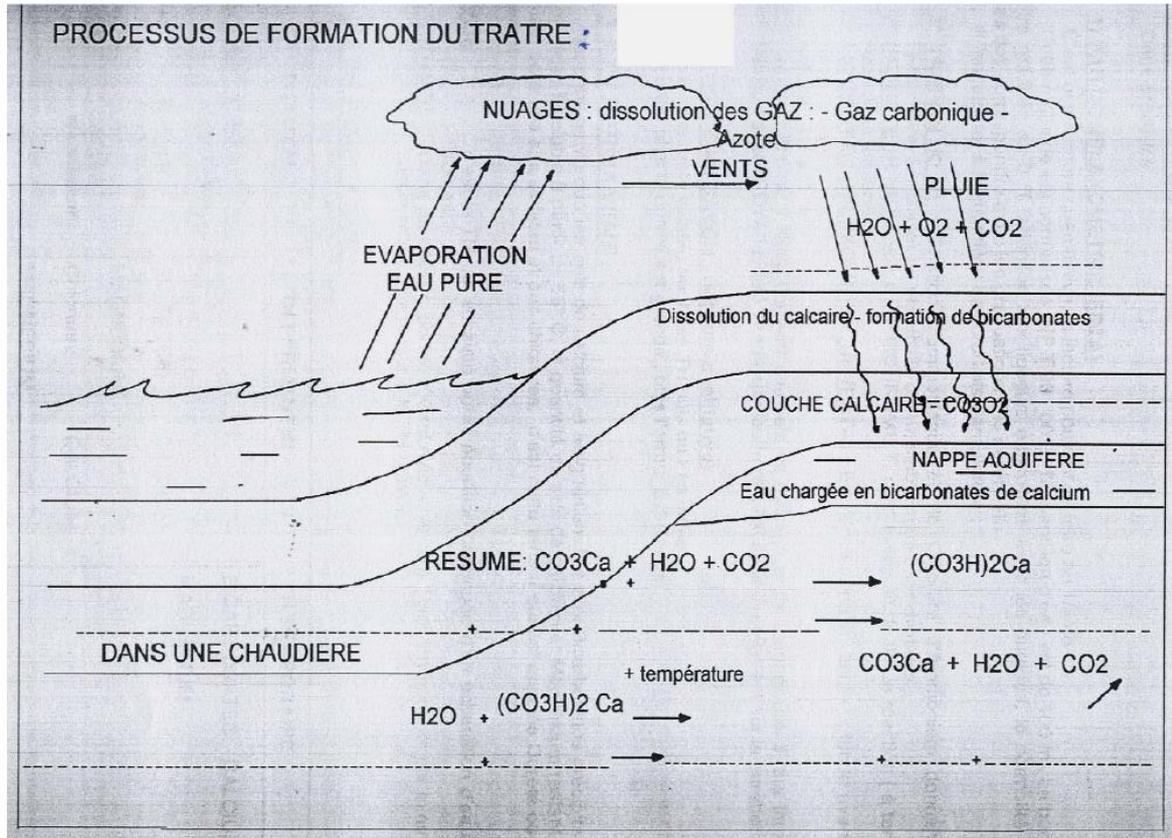


Figure 1: Processus de formation du tartre

II.5.2.1. Travaux de Hoover et Langelier

Langelier a calculé en tenant compte de l'alcalinité de l'eau des constantes de dissociation de l'acide carbonique et de l'eau ainsi que du produit de solubilité du carbonate de calcium, un pH de saturation au-dessus duquel l'eau ne serait plus agressive par le calcaire. Ce pH connu, Langelier définit un nouveau paramètre : l'indice de saturation « **Is** » :

$$\mathbf{Is} = \text{pHe} - \text{pHs}$$

- pHe = pH de l'eau mesurée
- pHs = pH de saturation.
- Si l'indice de saturation **Is** est négatif : l'eau est agressive,
- Si l'indice de saturation **Is** est positif : l'eau est incrustante,
- Si l'indice de saturation **Is** est nulle : l'eau est équilibrante.

Le calcul du pHs permet de déterminer le caractère de cette eau et son application pour des usages de consommation ou industrielle, il est fonction de la :

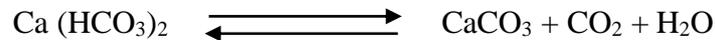
- Solubilité de CaCO_3
- la température en °C
- l'Alcalinité en mg/l de CaCO_3
- La dureté calcique en mg/l de Ca^{2+}

$$\text{pHs} = (\text{pK}'_2 - \text{pK}'_s) + \text{pCa}^{2+} + \text{pAlk}$$

A partir des logarithmes négatifs de la constante de dissociation de H_2CO_3 (pK'_2), le produit de solubilité de carbonate de calcium (pK'_s), la concentration molaire de Ca^{2+} (pCa^{2+}) et l'équivalent de concentration de CO_3^{2-} plus HCO_3^- (pAlk). Si l'indice de saturation est positif, CaCO_3 précipitera mais s'il est négatif CaCO_3 se dissoudra.

II.5.2.2. Mécanisme de l'entartrage

Une eau naturelle peut devenir entartrante par rupture de l'équilibre calco-carbonique :



L'anhydride carbonique nécessaire au maintien de cet équilibre est dit CO₂ équilibrant. Tout phénomène physique ou chimique, aération, chauffage, neutralisation, de nature à éliminer tout ou une partie du CO₂ équilibrant déplace la réaction à droite et provoque l'entartrage (dépôt du CaCO₃).

L'anhydride carbonique peut être éliminé par aération naturelle (eau à l'air libre, pompage). C'est la cause classique de l'entartrage des circuits d'eau de ville. Pour la même raison, la pulvérisation de l'eau favorise l'entartrage surtout aux points chauds.

L'anhydride carbonique peut être également éliminé par chauffage (cause de l'entartrage des ballons d'eau chaude, chauffe eau et des circuits ouverts). Enfin, l'anhydride carbonique des bicarbonates peut être neutralisé par un alcali (laveurs à ammoniaque, chaînes de lavage à produits alcalins).

Les dépôts de tartre prélevés sur des canalisations sont colorés par oxydes de fer (mêlés en faible proportion). Dans les canalisations en cuivre, ces tartres peuvent être colorés en bleu ou en vert. Les dépôts de sulfates résultent de l'utilisation d'eau séléniteuse ou traitée à l'acide sulfurique.

Dans les circuits industriels les dépôts de tartre sont le plus souvent constitués essentiellement de **CaCO₃** et de **Mg(OH)₂** et quelque fois de **CaSO₄** et **MgSO₄**.

II.6. La Corrosion

Le phénomène de la corrosion peut s'observer sur :

Les réseaux de distribution et dans les circuits de chauffage et de refroidissement, dans les chaudières, les réseaux de distribution de vapeur et les retours de purge.

Dans de nombreux cas il est dû à la présence ou à la formation de piles locales, mises en évidence par de la Rive. Selon les formes sous lesquelles elles se manifestent on classe les corrosions en :

- corrosion généralisée, par piqûre (pitting), crevasse ou inter- cristalline. Les piles peuvent avoir des origines diverses, hétérogénéité chimique ou physique du métal.

Divers facteurs peuvent être mis en cause dans les phénomènes de corrosion : l'Oxygène, l'anhydride carbonique, les métaux et composés métalliques, l'eau et la vapeur, les sels dissous, la soude caustique, les produits organiques et organismes vivants.

II.7. Le Primage : Causes et mécanismes du primage

Le primage qui affecte uniquement les chaudières, est l'entraînement d'eau et des matières minérales par la vapeur, provoquant des chocs thermiques (accidents mécaniques).

Le primage n'est pas dangereux si la vapeur reste à l'état saturée. Dans les chaufferies modernes la prévention du primage est aussi importante que la prévention de la corrosion. Sur le plan mécanisme, on lutte contre le primage par :

- une construction judicieuse des chaudières ;
- éviter des vitesses de vaporisation excessives.

Il est nécessaire de limiter la quantité de vapeur produite en fonction de la chambre de vapeur de la chaudière. Le tableau ci-dessous (tableau 5) donne un aperçu sur les conséquences des divers phénomènes caractérisant les eaux.

Tableau 5 : Conséquences des divers phénomènes caractérisant les eaux.

Eléments	Réseau	Circuit industriel	Chaudière	Circuit vapeur
Oxygène	Corrosion	Corrosion	Corrosion	Corrosion
CO₂	Corrosion	Corrosion	Corrosion	Corrosion
Dureté totale	Entartrage	Entartrage	Entartrage	Entartrage
Dureté Perm	Entartrage	Entartrage	Entartrage	Entartrage
Alcalinité	Entartrage	Entartrage	Corrosion	/
Salinité	Corrosion	Corrosion	Primage	Corrosion Entartrage
Fer et Mn	Colmatage	Colmatage	/	/
Silice	/	/	Entartrage	Entartrage
Turbidité	Colmatage	Colmatage	Primage	/
Produits organiques	/	/	Corrosion	/
Organismes vivants	Colmatage Corrosion	Colmatage Corrosion	/	/

Chapitre III

III. Classement des eaux

Les eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltrations, nappes), des eaux de surface retenues ou écoulement (barrage, lacs, rivières) et des eaux de mer. La répartition des eaux selon leurs usage est illustrée par la figure suivante ;

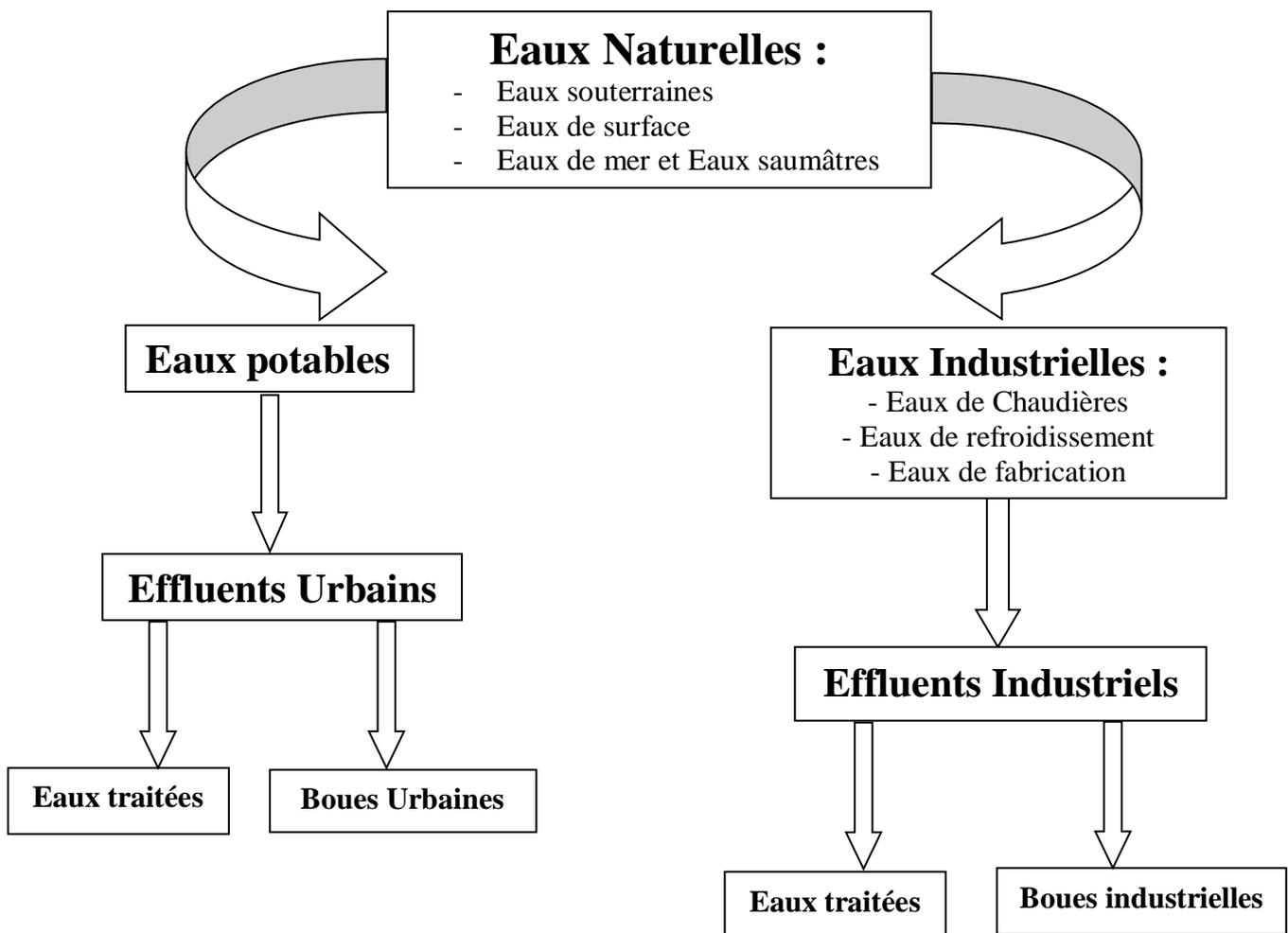


Figure 2: Schéma type de classification des eaux naturelles

III.1. Les eaux souterraines

1- Origine : On distingue, trois types de nappes des eaux souterraines, à savoir

- La nappe libre : elle est alimentée directement par l'infiltration des eaux de ruissellement.

Le niveau de cette nappe fluctue en fonction de la quantité d'eau retenue;

- La nappe captive : elle est séparée de la surface du sol par une couche imperméable.

Elle est généralement plus profonde.

- La nappe alluviale : c'est une nappe située dans les terrains alluvionnaires sur lesquels circule un cours d'eau. La qualité de ces eaux est alors directement influencée par la qualité de l'eau de la rivière.

2- Caractéristiques générales : La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. Par exemple, les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique sont acides et peu minéralisées. Les eaux circulant dans des sols calcaires sont bicarbonatées calciques. Les eaux souterraines sont souvent d'une grande pureté bactériologique.

3- Potabilité : Les eaux souterraines sont généralement propres et répondant naturellement aux normes de potabilité. Ces eaux sont en effet moins sensibles aux pollutions accidentelles.

Toutes les eaux contiennent en proportion variable :

- 1- Des gaz dissous de l'atmosphère ou du milieu ambiant (oxygène et gaz carbonique)
- 2- Des composés minéraux dont la nature et les proportions sont en rapport avec la constitution géologique des sols traversés (eau de surface, eau souterraine) ou la situation géographique (mer et océan). Les principaux composés dissous sont : les carbonates, bicarbonates, sulfates, chlorures etc..

- 3- Des substances organiques dissoutes provenant de la composition des matières végétales (eau d'étang) ou apportées par les égouts urbains et industriels (protéines, détergents, polluant).
- 4- Des substances minérales dissoutes provenant de l'activité industrielle (nitrate, phosphate et borates).
- 5- Des particules minérales ou organiques en suspension.
- 6- Des organismes vivants : bactéries, algues, champignons etc..

Au cours des dernières années, on a constaté dans tout les pays du monde un accroissement important des teneurs en matière polluantes des cours d'eau traversant les zones industrielles.

III.2. Les eaux de surface

Ce terme englobe toutes les eaux circulantes ou stockées _a la surface des continents.

1- Origine : Elles viennent, soit des nappes profondes dont l'_émergence constitue une source d'eau minérale ou de source soit par l'accumulation des eaux de pluie pour constituer de ruisseau, de rivière, etc. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenues, barrages) ;

2- Caractéristiques générales : La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux se chargent en gaz dissous (oxygène, azote, gaz carbonique). Elles sont chargées d'une concentration importante en matières en suspension et matières organiques d'origine naturelle provenant de la décomposition des organismes végétaux ou animaux ;

3- Potabilité des eaux de surface : Les eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement. Les eaux de surface sont généralement polluées du point de vue bactériologique.

De plus, elles peuvent présenter plusieurs pollutions :

- d'origine urbaine : les eaux d'assainissement ;

- d'origine industrielle : polluants et micropolluants organiques (hydrocarbures, solvants, produits de synthèse, phénols) ou inorganiques (métaux lourds, ammoniacque, produits toxiques ;
- d'origine agricole : engrais et produits pesticides ou herbicides.

III.3. Eaux de mer et eaux saumâtres

Les eaux des mers sont caractérisées par une salinité importante, qui peut varier selon les origines (tableau 6) ;

Tableau 6 : Salinité des eaux de quelques océans et mers

Origine	Salinité en g/l
Atlantique et Pacifique	32 à 35
Mer Méditerranée	38 à 40
Mer Rouge	43 à 45
Mer Morte	270

Certaines caractéristiques physiques de l'eau de mer sont particulièrement importantes: turbidité et matières en suspension. Elles sont très variables selon la localisation.

En pleine mer, les MES sont représentées essentiellement par le **zooplancton** et le **phytoplancton**, dont la valeur est de quelque mg.l⁻¹.

Près des rivages: la teneur en sable peut être importante selon l'agitation (vent, marées) et la profondeur (présence d'un plateau continental). De plus, à proximité des agglomérations, la pollution par des rejets urbains et industriels peut devenir prépondérante. Le tableau 7 donne la composition d'une eau de mer "standard".

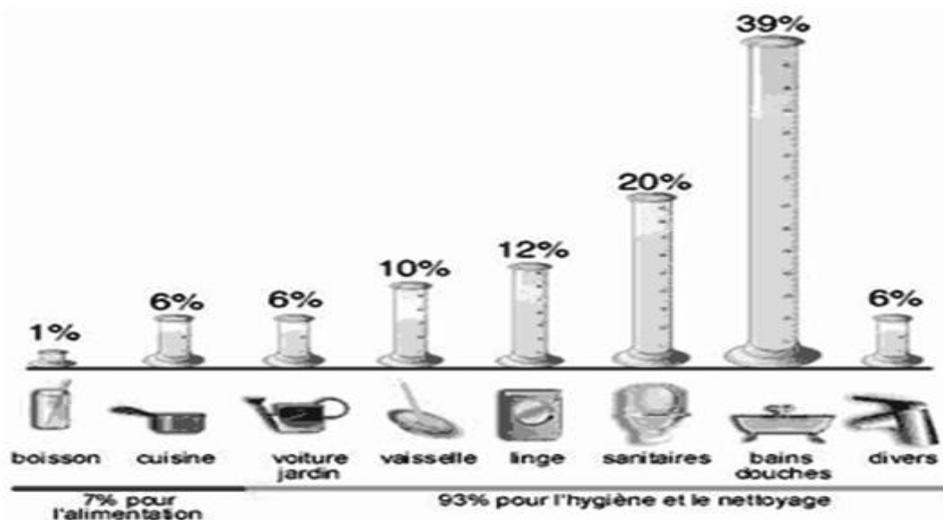
Tableau 7 : Résultats d'analyses standard d'eau de mer, pH = 8,2 - 8,3.

Anions	mg.l ⁻¹	meq.l ⁻¹	Cations	mg.l ⁻¹	meq.l ⁻¹
Chlorures Cl ⁻	19 880	560	Calcium Ca ²⁺	440	22
Sulfates SO ₄ ²⁻	2 740	57	Magnésium Mg ²⁺	1315	108
Nitrates NO ₃ ⁻	-	-	Sodium Na ⁺	11 040	480
Bicarbonates	183	3	Potassium K ⁺	390	10
Bromures Br ⁻	68	0,9	Strontium	1,3	0,3
Total	22 871	620,9		13 186,3	620,3
Salinité totale : 36,4 g.l⁻¹					

II.4. Usages de l'eau

II.4.1. Eau domestique

La quantité d'eau consommée pour les besoins domestiques directs est de (100 l/j/h _a 300 l/j/h). Cette quantité est répartie comme suit :

**Figure 3** : Consommation domestique de l'eau

III.4.2. Eaux industrielles

La qualité et la quantité des eaux utilisées dans l'industrie sont très variables, elles dépendent du type de l'entreprise productrice et de sa taille. Le plus souvent, les eaux industrielles sont destinées au refroidissement des installations ou pour faire fonctionner les chaudières.

III.5. Critères de potabilité

Une eau potable doit présenter un certain nombre de caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et en outre répondre à des critères organoleptiques essentiels (incolore, insipide, inodore, fraîche) (tableau 8).

Tableau 8: Normes Algériennes de Potabilité

Paramètres	Valeurs
Température °C	25
pH	6,5-8,5
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	2500
Résidu sec (180 °C) mg/L	2000
Calcium Ca^{2+} mg/L	200
Magnésium Mg^{2+} mg/L	150
Sodium Na^{+} mg/L	250
Potassium K^{+} mg/L	15
Chlorures Cl^{-} mg/L	600
Sulfates SO_4^{2-} mg/L	400
Nitrates NO_3^{-} mg/L	50
Nitrites NO_2^{-} mg/L	0,1

Chapitre IV

IV. Méthodes physico-chimiques de traitement des eaux

Les eaux brutes doivent généralement subir, avant leur traitement proprement dit, un prétraitement qui comporte un certain nombre d'opérations uniquement physiques ou mécaniques. Il est destiné à extraire de l'eau brute la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constituerait une gêne pour les traitements ultérieurs. Dans le domaine du traitement des eaux naturelles, ces procédés ne constituent en général qu'un préalable à un traitement physicochimique plus poussé.

IV.1. Les prétraitements physiques

Les procédés de prétraitements physiques les plus utilisés sont : le dégrillage, le dégraissage, le dessablage et le tamisage.

IV.1.1. Dégrillage

La première opération dans le procédé de prétraitement des eaux est le dégrillage, cette technique est indispensable en amont des circuits d'eaux de surface et résiduaire. Il doit être localisé dans le regard de rive, au poste de pompage d'eau brute ou à l'entrée de l'usine de traitement. Le dégrillage, permet :

- De protéger les ouvrages aval contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation (poste de pompage, conduites et installations de traitement);
- De freiner et extraire facilement les matières volumineuses qui sont véhiculés par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou en compliquer l'exécution.

Les grilles sont composées d'un ensemble de barres métalliques dont l'espacement est calculé suivant la nature de l'eau à traiter.

Dans les stations de traitement, on peut distinguer :

- Dégrilleur fin avec un écartement inférieur à 10 mm,
- Dégrilleur moyen avec un écartement de 10 à 40 mm,
- Pré dégrillage, avec un écartement supérieur à 40 mm.

Le dégrillage est assuré par :

- **des grilles à nettoyage manuelle** : Elles sont composées de barreaux droits, ronds ou rectangulaires, généralement inclinées de 60° à 80° sur l'horizontale pour faciliter le raclage.
- **des grilles à nettoyage mécanisé** : Elles sont constituées de barres fixes verticales ou inclinées, et équipées d'un système de raclage mécanique (Figure 4).



Figure 4 : Dégrilleur courbe

IV.1.2. Déshuilage - Dégraissage

Les opérations de dégraisseur - déshuilage ont pour objet l'extraction des graisses par flottation naturelle ou accélérée par injection de fines bulles (figure 5). Ces matières grasses sont susceptibles de nuire à la phase biologique du traitement (mousses, ...).

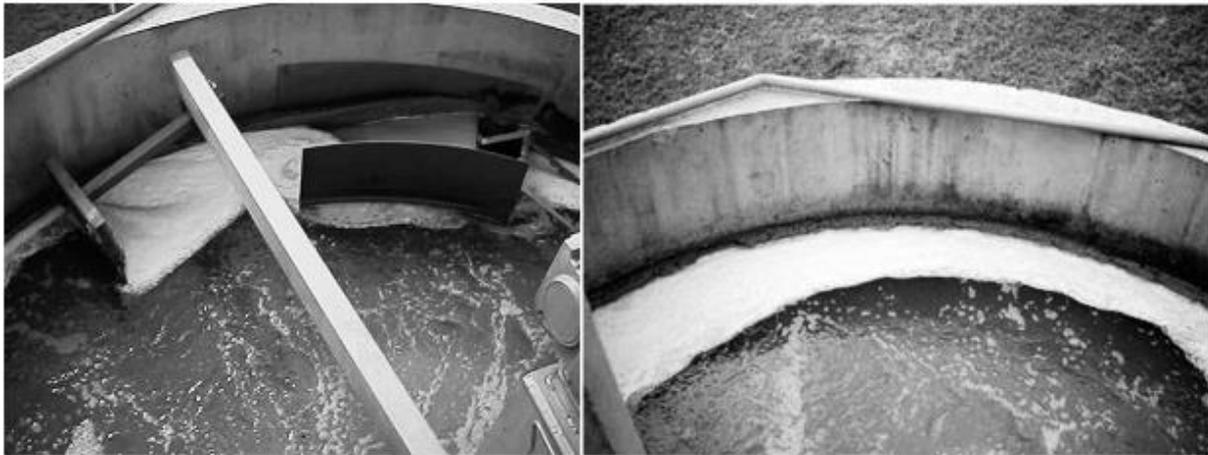


Figure 5 : Bassin dégraisseur - deshuilage

IV.1.3. Dessablage

Le dessablage débarrasse des eaux brutes les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines par sédimentation et ceci dans le but d'éviter de perturber les opérations de traitement suivants. Les sables récupérés sont essorés, puis lavés avant d'être mis en décharge ou réutilisés selon la qualité du lavage.

Le domaine usuel du dessablage porte sur les particules dont la granulométrie égale ou supérieure à 200 μm (figure 6).



Figure 6: Désableur

IV.1.4. Tamisage

Il consiste de faire passer l'eau à travers un filtre dont les mailles sont assez fines (dégrillage poussé) de façon à retenir les matières en suspension flottantes, les débris végétaux, les herbes....

Il existe deux modes de tamisages :

- **Macro-tamisage**

Les tôles perforées appelés communément, les toiles à mailles croisées en acier inoxydable ou en tissu synthétique, se caractérisent par des ouvertures de 0,15 à 2 mm. Les tamis sont réalisables sous forme de tambours de 1,5 à 6 m de diamètre ou de bandes de 1 à 3 m de largeur et dont la hauteur de 3 à 15 m est adaptée aux rivières à niveau variable.

Selon le sens de circulation de l'eau, le système de lavage par pulvérisation est situé au-dessus du filtre ou à l'intérieur. Une goulotte évacue les effluents de lavage.

Dans les deux cas, la mise en place de panneaux en forme de dièdres ou de demicylindres permet d'accroître la surface spécifique de filtration. La capacité de ces appareils peut aller jusqu'à plusieurs milliers de $m^3.h^{-1}$.

- Micro-tamissage

Les toiles filtrantes, en tissu synthétique, ont des ouvertures de mailles de 30- 40 μ m à 150 μ m. Elles sont montées sur des tambours. Les équipements de lavage doivent assurer une pulvérisation plus intense sur la toile du fait de risques de colmatage accrus par les sables et limons fins (Figure 2.3). L'étanchéité des joints doit être assurée plus sévèrement.

IV.2. Les Traitements primaires

Après les prétraitements, les eaux conservent une charge polluante dissoute et des matières en suspension. Les procédés de traitement primaire sont physiques, comme la décantation, ou physico-chimique (coagulation- floculation). Ces traitements éliminent 50 à 60% des matières en suspension.

IV.2.1. Le Décolmatage mécanique

Cette opération consiste à éliminer les dépôts par drapage du fond et raclage des parois.

IV.2.2. Le Décolmatage chimique

Cette opération n'est possible que si les agents colmatants sont solubles dans un réactif approprié, on utilise l'acide chlorhydrique qui transforme le carbonate de calcium et les hydrates ferriques insolubles en chlorures solubles.



Malheureusement l'acide HCl attaque également les circuits des pompes et canalisations (ciment et fer).

IV.2.3. Le Décolmatage Physico-chimique

L'introduction d'une solution de polyphosphate dans un puit colmaté permet l'élimination des trois principaux agents de colmatage :

- Le carbonate de calcium et l'hydroxyde ferrique ; Les argiles par dispersion.

Les polyphosphates : pour que leur action soit efficace il faut bien agiter l'eau dans le puit soit par injection d'air soit par circulation de la solution en circuit fermé. L'avantage du procédé : pas de démontage, remontage, plus grande efficacité que l'acide passivé, moins de risque et bon marché. Il peut être utilisé pour le décolmatage des canalisations et appareils.

IV.2.4. La Coagulation- Floculation

Afin de rassembler les particules en suspension et accélérer leur chute on ajoute à l'eau à traiter des coagulants et des floculants. Par réaction ou par décomposition, les coagulants forment des précipités qui empoisonnent et absorbent les particules et les grosses molécules organiques. Généralement, on injecte dans l'eau des produits comme le sel d'Aluminium, qui provoque la coagulation des particules en suspensions. La charge positive du coagulant neutralise la charge négative des particules dissoutes et suspendues dans l'eau. Ces flocons" plus lourds que l'eau, se déposent au fond d'un bassin de décantation et sont évacués régulièrement sous forme de boues (figure 7).

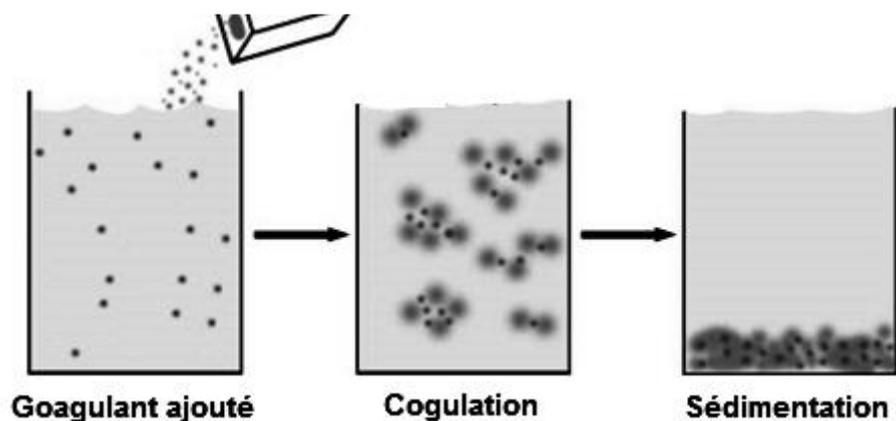


Figure 7: Processus de coagulation, floculation et de sédimentation

Dans une usine de traitement des eaux, lorsque qu'un coagulant est ajouté à l'eau il est rapidement mélangé de sorte qu'il soit distribué partout dans l'eau. La coagulation peut enlever un grand nombre de particules organiques. La coagulation peut également enlever les particules suspendues, y compris les précipités inorganiques, tel que le fer et le carbone organique dissout peut donner une odeur et un goût à l'eau, désagréable. Le tableau 9 donne la durée qui est exigée pour que des particules de différentes tailles se lient ensemble.

Tableau 9 : Temps de liaison de plusieurs particules selon le diamètre

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

Coagulants utilisés :

Généralement, les produits utilisés dans le processus de coagulation ont pour objectif de déclencher la déstabiliser des particules et accélérer la formation des floccs. Ces coagulants sont des électrolytes minéraux à polycations. Les coagulants les plus utilisés sont indiqués dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Les principaux coagulants utilisés

Coagulant	Forme chimique
Sulfate d'Aluminium	$Al_2(SO_4)_3, 18 H_2O$
Aluminate de Sodium	$NaAlO_2$
Chlorure Ferrique	$FeCl_3, 6 H_2O$
Sulfate Ferrique	$Fe_2 (SO_4)_3, 9 H_2O$
Sulfate Ferreux	$FeSO_4, 7 H_2O$
Sulfate de Cuivre	$CuSO_4$

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

Chimie de la coagulation

Il est souvent important de connaître l'influence de l'emploi d'un coagulant sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau traitée.

Les réactifs coagulants les plus généralement utilisés sont :

1- **Sulfate d'alumine** (ou, mieux, **d'aluminium**) : $Al_2(SO_4)_3 18H_2O$ Présentation :

- Cristallisé (poudre, grains, noisettes, pains, etc.)

- Solution à 600 ou $720 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ environ de sulfate d'alumine cristallisé. En clarification d'eaux de surface, suivant la qualité des eaux, les doses utilisées varient de 10 à $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ exprimés en produit commercial solide $[Al_2(SO_4)_3, 18 H_2O]$.

• **Chlorure ferrique** : FeCl_3 Présentation :

- Sublimé ou cristallisé : FeCl_3 ou $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;

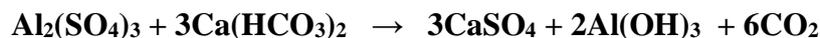
- Solution à $600 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de FeCl_3 environ.

Autres réactifs parfois mis en œuvre : Sulfate ferreux : $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Sulfate ferrique : $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Aluminate de sodium : NaAlO_2 .

Coagulation au sulfate d'aluminium (cas le plus courant)

La précipitation de l'hydroxyde d'aluminium (qui formera les micro-micelles en englobant les colloïdes déchargés électriquement) résulte d'hydrolyse du produit coagulant et de neutralisation de l'acidité ainsi libérée par l'alcalinité (TAC) de l'eau.

La réaction globale qui a lieu est :



On constate que 1 mole de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, soit 342 g de correspondent à 666 g de produit commercial cristallisé [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$].

Et, 1 mole de sulfate d'aluminium $\square 2\text{Al}^{3+}$, soit 6 charges positives 1 eq = $666/6 = 111 \text{ g}$; 1 meq·L⁻¹ = 111 mg·L⁻¹

1 °F = 0,2 meq·L⁻¹ = 22,2 mg·L⁻¹

Ou encore $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} = 1/22,2 = 0,045 \text{ °F}$

On déduit finalement que 1 g·m⁻³ (ou 1 mg·L⁻¹) de sulfate d'aluminium commercial (correspondant à 0,45 °F) : diminuent le TAC de 0,045 °F.

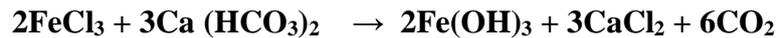
La diminution du TAC et la libération de CO_2 libre abaissent le pH de l'eau ; dans les eaux très douces et acides, où l'alcalinité est insuffisante, l'emploi d'un réactif alcalin comme la chaux permet la neutralisation de l'acide fort libéré et le maintien d'un pH favorable à la précipitation totale de l'hydroxyde d'aluminium.

La réaction qui a lieu :



Coagulation au chlorure ferrique

La réaction globale du coagulant avec l'alcalinité de l'eau sera :



IV.2.5. La Décantation

La décantation est la méthode de séparation gravitaire la plus fréquente des Matières en suspension (MES) et colloïdes (rassemblés sous forme de floc après l'étape de coagulation /floculation). Il s'agit d'un procédé de séparation solide/liquide basé sur la pesanteur (fig 8). Cette séparation est induite par réduction de la vitesse horizontale qui doit être inférieure à la vitesse verticale (de chute, de décantation ou ascensionnelle) afin de favoriser la sédimentation des particules dans un piège. Ces particules s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite clarifiée. Les facteurs clefs de la sédimentation sont la différence de masse volumique entre le solide et le liquide, la taille des particules et la viscosité du fluide.

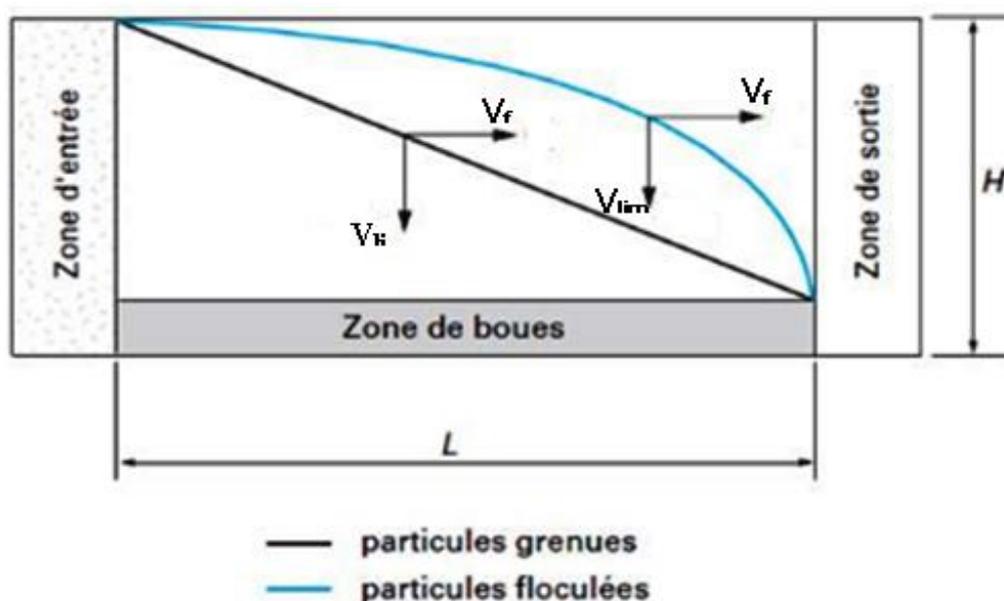


Figure 8: Principe de décantation des particules

Types de décanteur

Il existe deux types de décanteurs :

A) Décanteur simple : Les décanteurs classiques sont caractérisés par la surface de décantation égale la surface de base (figure 9). Comme le montre la figure suivante, Le décanteur le plus simple est muni d'un pont racleur, d'une sortie d'eau décantée et d'une sortie d'évacuation des boues.

Il existe deux types de décanteur dit simple :

- **A flux verticaux** : Dans ces bassins, la condition pour qu'une particule soit retenue et qu'elle ait le temps d'atteindre le fond avant le débordement ou la sortie de l'ouvrage (figure 9)

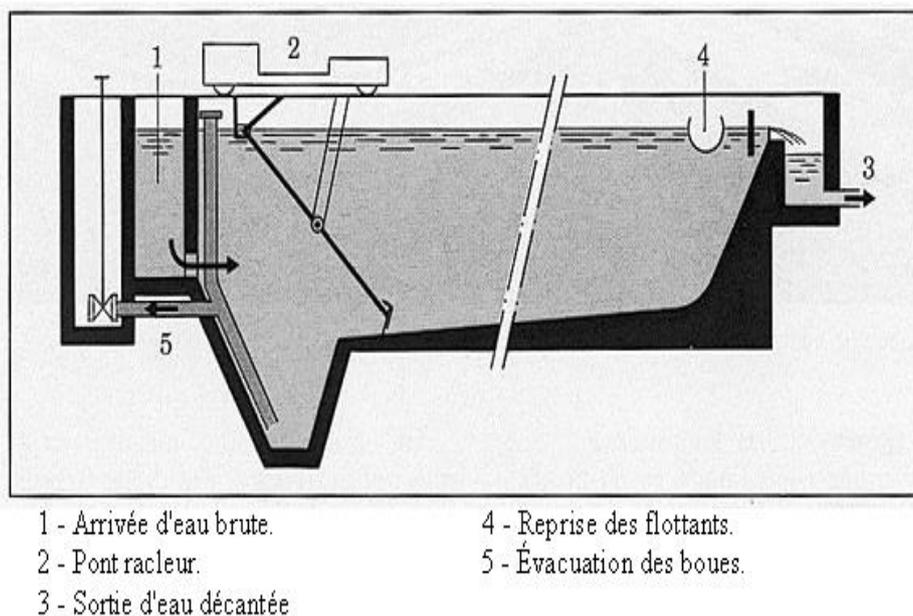


Figure 9: Décanteur longitudinal a pont racleur

- **A flux verticaux** : Les décanteurs de forme cylindrique ou pyramidale sont dotés d'une souverse pour permettre un fonctionnement plus aisé du voile de boues (fig 10).

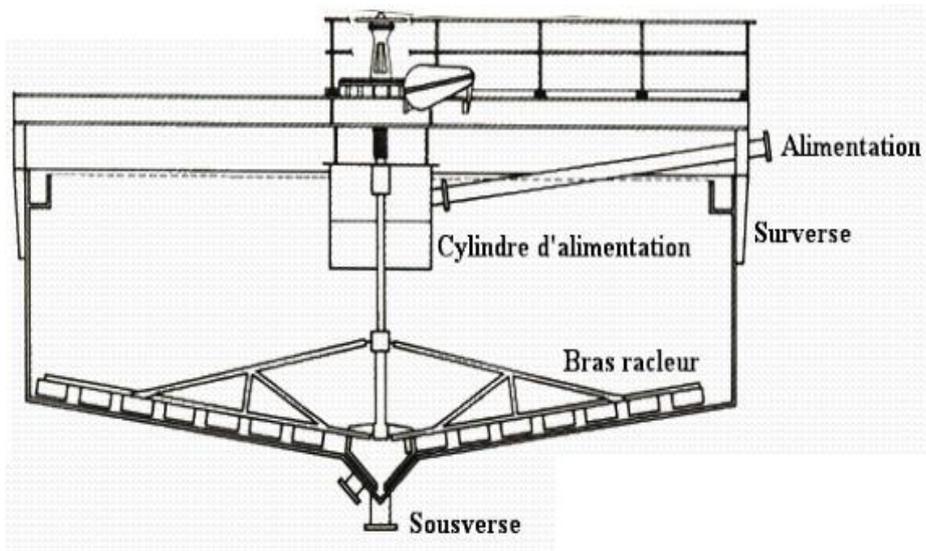


Figure 10: Décanteur cylindrique

B) Décanteur lamellaire : Les décanteurs dits lamellaires comportent souvent une série de lamelles qui permet de multiplier la surface de décantation utile tout en réduisant la surface au sol par rapport à un bassin de décantation classique à flux horizontal (voir figure 11).

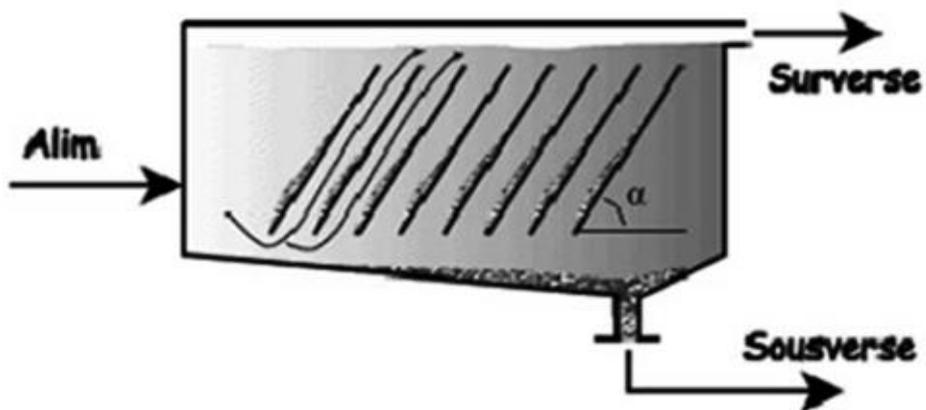
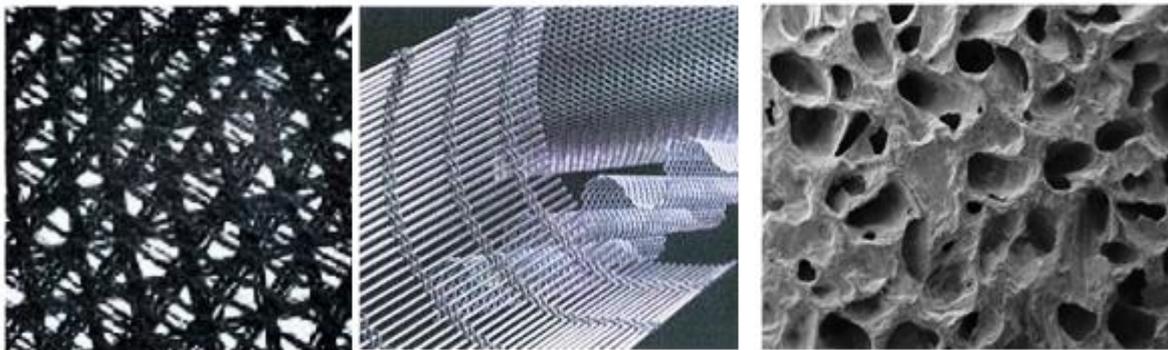


Figure 11: Schéma d'un décanteur lamellaire

IV.2.6. La Filtration

La filtration a pour but de retenir sur un support les matières minérales ou organiques en suspensions apportées par l'eau brute ou résultant d'un traitement préalable. L'écoulement de l'eau est suivant les cas gravitaire ou sous pression. La filtration est généralement l'étape ultime de la préparation physique de l'eau, elle est précédée de traitements préliminaires dont les étapes sont déjà citées.

IV.2.6.1 Matériaux des filtres : Les filtres les plus utilisés peuvent être : des tissus de fibres, des toiles métalliques ou des pierres poreuses a interstices très fins (figure 12).



Tissus en fibres de carbone

Toiles métalliques

Pierres poreuses

Figure 12: Différents matériaux de filtration

IV.2.6.2 Types de filtration : pour le traitement des eaux, on utilise principalement :

- a) Filtration sur le sable (lente ou rapide) ;
- b) Filtration membranaire : En pratique, la filtration sur sable est la plus utilisée. En ce qui concerne la filtration lente sur sable, de construction et de fonctionnement simples, nécessite de grandes superficies ; c'est pourquoi on les utilise surtout dans les pays où le climat est moins rigoureux, et lorsqu'on n'est pas limité par l'espace.

Filtration sur le lit de sable : Cette étape achève de clarifier l'eau en éliminant les derniers flocons. Elle consiste à faire passer l'eau à travers une épaisse couche de sable fin (80 cm à 1,50 m) disposée sur un plancher poreux. Ce filtre est nettoyé régulièrement par l'envoi d'eau et d'air à contre-courant (de bas en haut) pour permettre aux flocons de se détacher des grains de sable et éviter ainsi les risques de colmatage (voir figure 13).

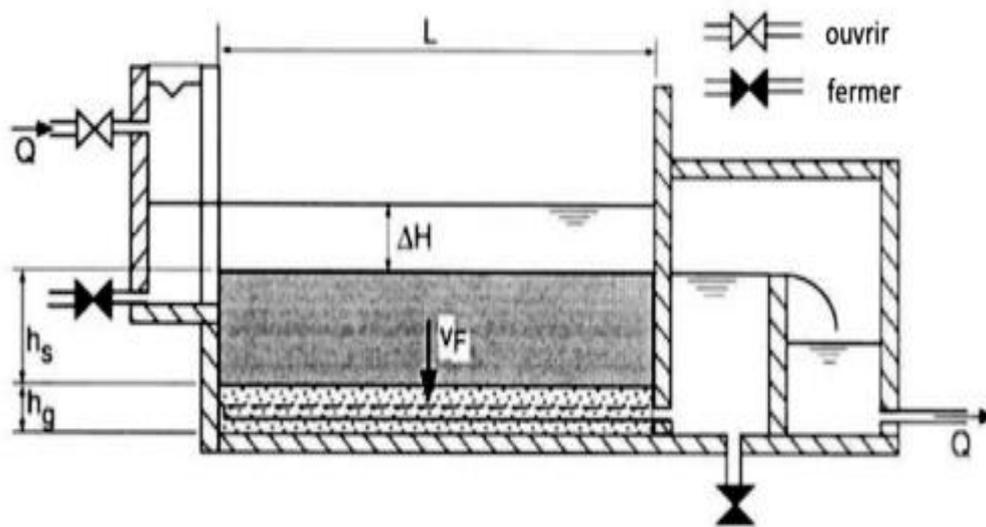


Figure 13: Schéma du système d'une filtration à sable

Le sable déposé dans le lit filtrant est relativement fin, c'est à dire, ses gammes de taille effective comprise entre 0,15 et 0,30 millimètres. La perte de charge (ΔH) sur le filtre indique la nécessité d'un retro lavage : plus le filtre est bouche, plus la perte de charge est importante. En général, la perte de charge ne peut pas être supérieure à 1 mètre.

Filtration membranaire : Les membranes (figure 14) sont fabriquées à partir de polymères organiques ou à partir de matières inorganiques (métaux, oxydes métalliques, verre, carbone, carbure de silicium, etc.). Les principaux polymères utilisés pour fabriquer des membranes sont :

-Les polymères dérivés de la cellulose (acétate, bi- ou tri-acétate, cellulose régénérée) ;

- Les polyamides ;
- Les polysulfones et les polyethersulfones ;
- D'autres polymères (polypropylènes, fluorures de polyvinylidene, polycarbonates, etc.).

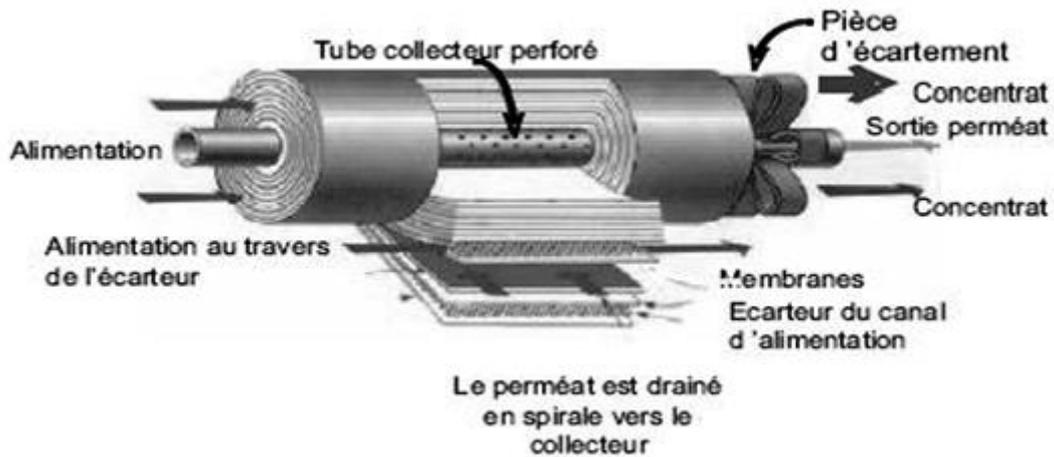


Figure 14 : Les membranes planes

Pour les rendre opérationnelles, les membranes sont insérées dans des dispositifs compacts appelés modules membranaires (figure 15).

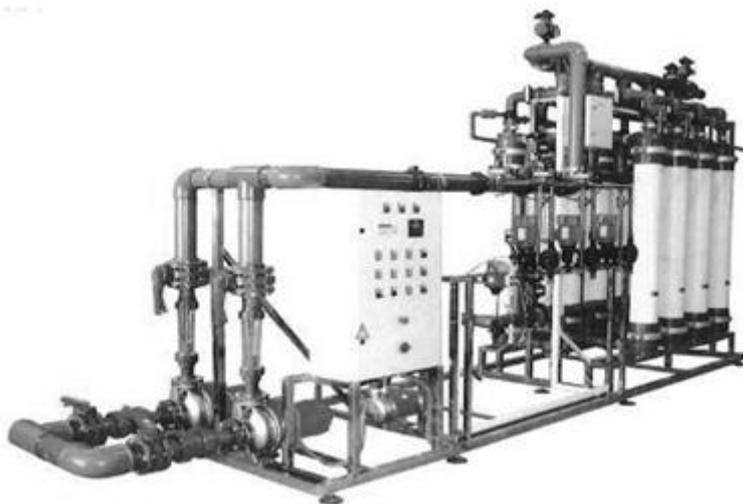


Figure 15: Les membranes planes

IV.2.7. La désinfection

Cette étape, commune à tous les traitements, est la plus importante. Elle a pour but de neutraliser tous les virus et bactéries pathogènes. Elle n'est efficace que si l'eau a été préalablement bien traitée, notamment dans le cas des eaux de surface. Bien que les eaux souterraines soient souvent naturellement exemptes de microorganismes, la désinfection prévient le risque d'une contamination par infiltration dans la ressource et dans le réseau. La stérilisation peut être pratiquée à ce stade par addition supplémentaire de Cl₂. On peut également désinfecter l'eau grâce à des moyens physiques : ébullition, ultrasons, ultraviolets ou rayons gamma

IV.2.7.1 Différents modes de désinfection

Il existe diverses méthodes de désinfection : les plus répandues sont la chloration, l'ozonation, et la stérilisation aux rayons ultra-violets.

a) La stérilisation par le chlore ou chloration : C'est le procédé le plus utilisé, on injecte dans l'eau, de l'eau de javel ou du chlore gazeux suivant un dosage précis. Le bioxyde de chlore est parfois utilisé à la place du chlore. Il permet d'obtenir une eau de meilleure qualité gustative. L'efficacité de la chloration dépend beaucoup de la valeur du pH et de la température 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.

Tableau 11: temps de désinfection avec de l'eau chloré (1mg/l), pH=7,5 et T=25°C

E. coli bacterium	<1 minute
Hepatitis A virus	environ 16 min
Giaria parasite environ	45 min
Cryptosporidium environ	16 9600 min (6-7jours)

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 (voir figure 16).

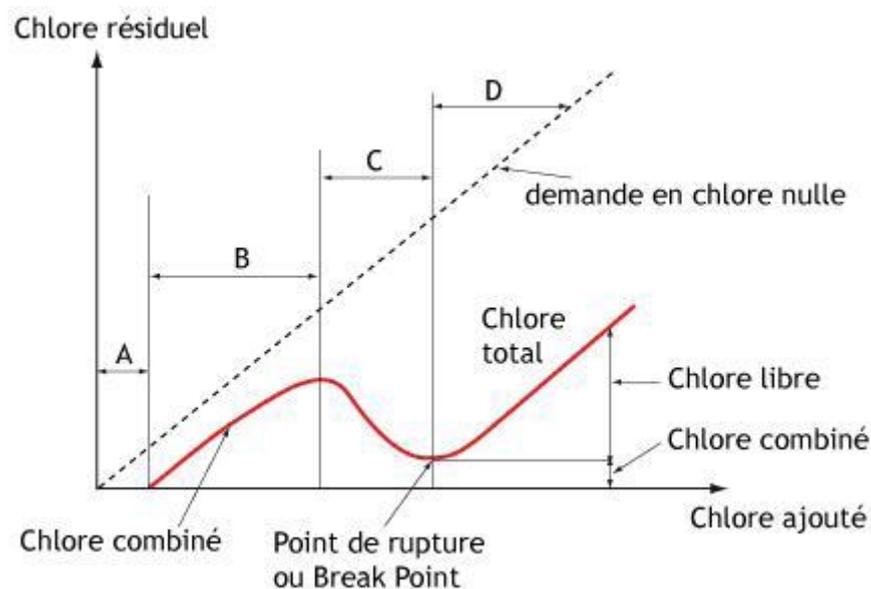


Figure 16: Courbe d'absorption du chlore

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.

b) La stérilisation par le 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.

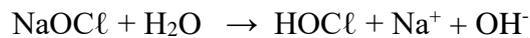
IV.2.7.2. Aspects chimiques de la chloration

La dissolution du chlore gazeux et des hypochlorites dans l'eau donne naissance à l'acide hypochloreux. HOCl qui demeure un produit très actif dans le processus de désinfection.

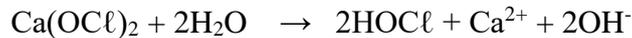
Cette dissolution se traduit par les réactions suivantes :



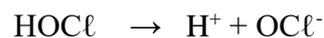
Réaction de dissolution de l'hypochlorite de sodium :



Et celle de l'hypochlorite de calcium :



Ces équations montrent que la différence principale entre les hypochlorites et le chlore gazeux concerne les produits secondaires. En effet, l'addition de chlore gazeux libère des ions hydrogène, H^+ , ce qui abaisse le pH de l'eau, alors que l'addition d'hypochlorites libère des ions hydroxydes, OH^- , ce qui augmente le pH de l'eau. L'acide hypochloreux, HOCl est un acide faible qui réagit de la façon suivante:



Cette réaction est fonction du pH de l'eau. En effet il y a coexistence de HOCl et de l'ion hypochlorites OCl^- suivant le pH de l'eau et de sa température.

c) La stérilisation par l'ozone ou ozonation : est un procédé plus coûteux. Des bulles d'air ozonées (20g d'ozone par m^3 d'air) sont mises au contact de l'eau dans laquelle l'ozone se dissout. Une dissolution de 1 à 4mg de ce gaz dans un litre d'eau garantit la destruction de tous les éléments pathogènes. Il ne donne aucune saveur particulière à l'eau et supprime les couleurs. 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'ozonation, 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.

Souvent, dans le cas d'une désinfection par l'ozone, on doit assurer le maintien d'un résiduel d'ozone de $0,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pendant au moins 4 min pour qu'en particulier l'effet virucide soit atteint (figure17) : la désinfection prend place dans la chambre b après satisfaction de la demande chimique de l'eau en ozone dans la chambre a ;

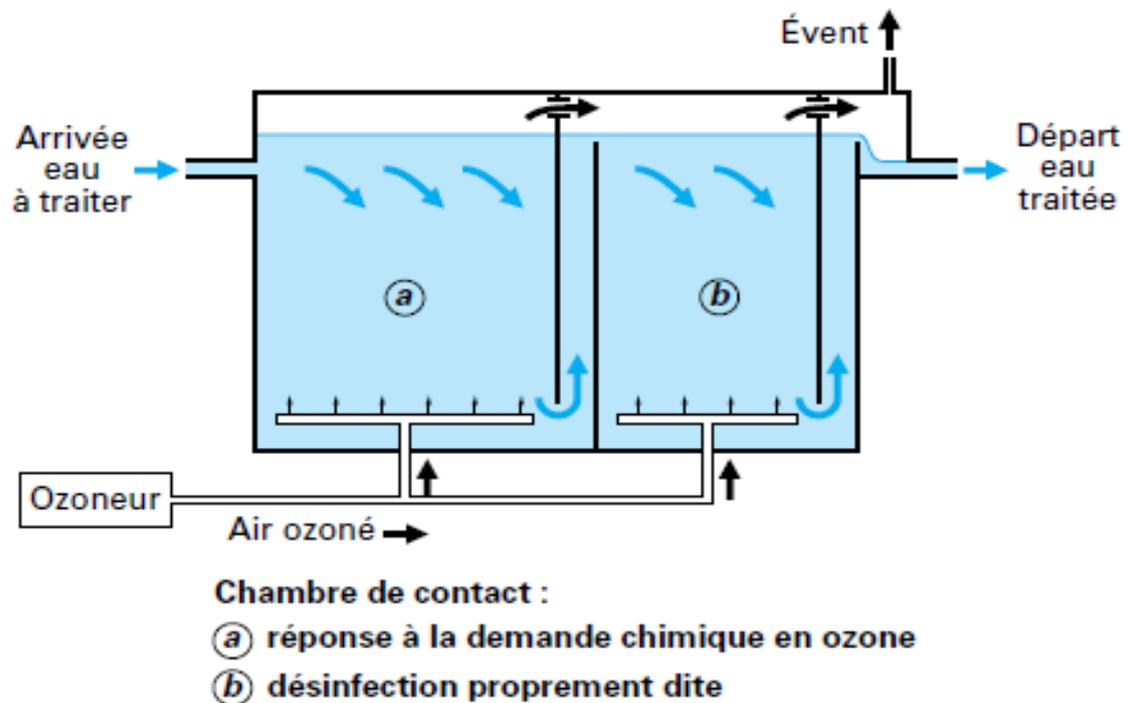


Figure 17 : Disposition classique d'une tour de contact eau-ozone

d) La stérilisation par rayonnements ultra-violet : est un procédé peu coûteux, du fait de sa faible persistance. Il est utilisé par les communes ayant un réseau peu étendu. Il consiste à soumettre l'eau à un rayonnement ultraviolet d'une longueur d'onde précise capable de détruire les bactéries et les virus (voir figure 18).

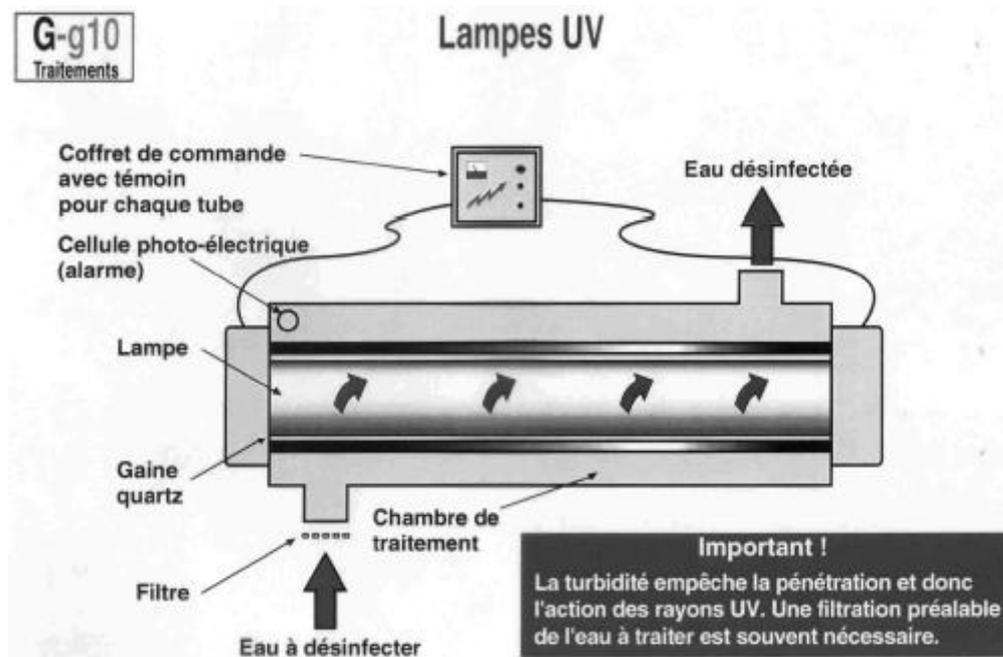


Figure 18: Module UV de désinfection de l'eau

e) 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.

Recommandations sur l'utilisation des principaux désinfectants**- Chlore**

Le maintien d'un taux de 0,5 mg.l-1 de chlore libre, pendant un temps de contact de 30 min à pH inférieur à 8, permet d'éliminer les bactéries pathogènes et les virus de la poliomyélite ; mais on risque de voir apparaître des goûts et des THM dans le réseau en présence de COT.

- Dioxyde de chlore

Le maintien d'un taux de 0,2 mg.L⁻¹ pendant 15 min assure une protection efficace. L'effet rémanent est important. Mais il n'est pas souhaitable, et même interdit dans certains pays, d'utiliser une dose trop importante de ClO₂ pour la désinfection. L'action oxydante de ClO₂ sur les MO libère l'ion ClO²⁻ qui a été reconnu comme toxique et communique à l'eau une saveur métallique désagréable.

- Ozone

Le maintien d'un taux de 0,4 mg.L⁻¹ pendant 4 min est recommandé pour l'élimination des bactéries pathogènes et des poliovirus. Il serait impératif de vérifier que la mise en oeuvre d'un tel traitement n'entraîne pas la formation de sous-produits d'oxydation indésirables, notamment les bromates (BrO₃⁻) qui sont considérés comme dangereux à des valeurs < 10 µg/L. La désinfection par l'ozone exige que l'eau à ozoner ne contienne plus de manganèse soluble (Mn²⁺) sous peine de communiquer à l'eau une couleur rose. Cette couleur évolue ensuite vers le brun-marron par suite de la précipitation de MnO₂.

IV.2.8. Déferisation - Démanganisation

Les sels de fer et de manganèse dans les eaux souterraines sont instables ; ils réagissent avec l'eau pour former des précipites insolubles qui sédimentent sous la forme d'un limon de couleur rouille (fer) ou noire (manganèse). L'OMS : précise la concentration en fer (Fe) égale à 0,3mg /l et manganèse (Mn) de 0,1mg/l. Pour diminuer leurs concentrations on applique le traitement de deferrisation - demanganisation Les procédés de traitement d'élimination du fer et du manganèse sont basés sur l'oxydation des formes réduites dissoutes de (Fe^{2+}) et (Mn^{2+}) en formes insolubles ferriques (Fe^{3+}) et manganiques (Mn^{4+}) grâce à une réaction d'oxydoréduction. Ces formes insolubles sont ensuite retenues sur un milieu filtrant granulaire.

a) Oxydation physicochimique

- **Oxydation par l'aération** : L'aération permet de mélanger l'air à l'eau pour favoriser les réactions d'oxydation et enlever les gaz dissous ou éliminer les goûts et odeurs.
- **Oxydation chimique** : Les oxydants chimiques jouent le même rôle que l'aération. Ce type d'aération est nécessaire si l'eau contient H_2S (hydrogène sulfuré).

b) Déferrisation et/ou démanganisation par des procédés biologiques :

De nombreuses bactéries qui se trouvent naturellement dans la nature sont susceptibles d'oxyder le fer et le manganèse en formant un précipité plus compact et moins colmatant que les procédés d'oxydation conventionnels.

Les installations types de déferrisation et de démanganisation sont présentés par les figures suivantes ;

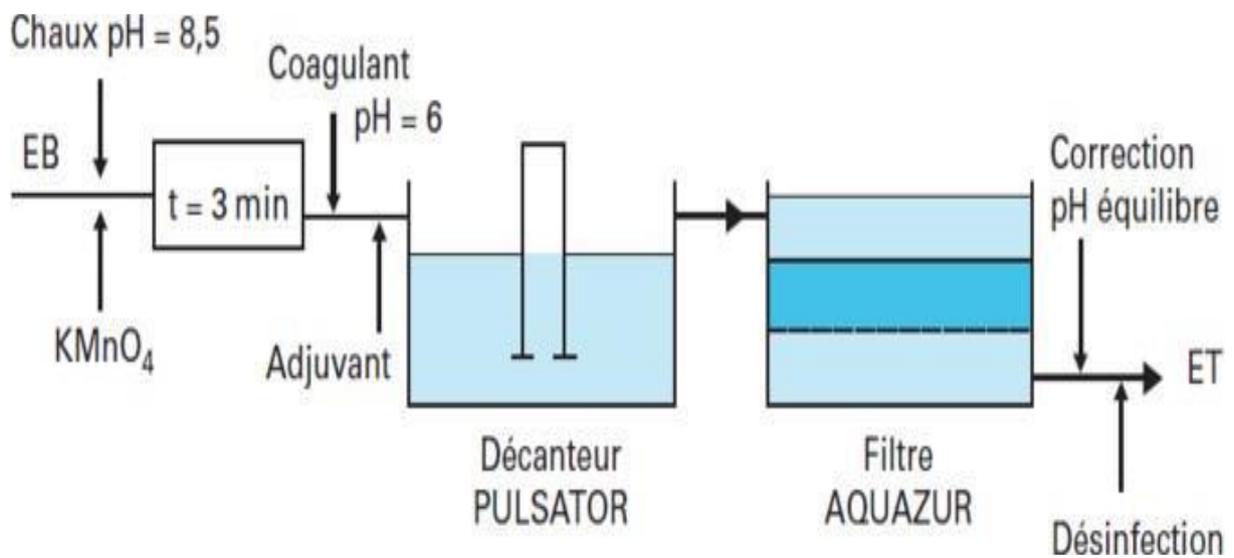


Figure 19 : Schéma d'élimination du manganèse sur une eau de surface

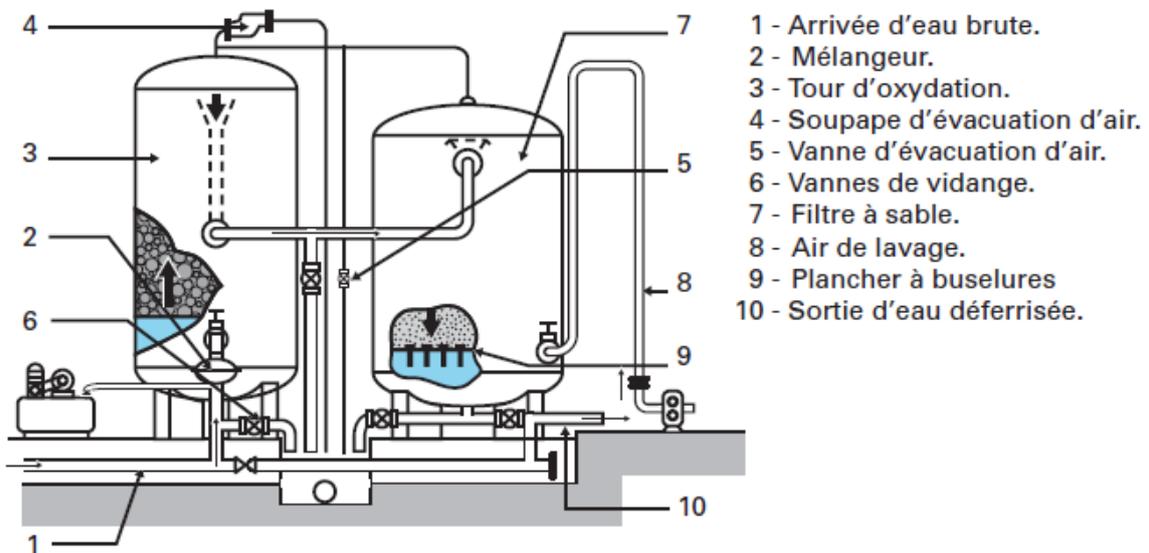


Figure 20: Station de déferrisation sous pression

Dans le tableau suivant, l'ensemble des traitements préalables à appliquer à une eau en fonction des éléments solides ou espèces chimiques dissoutes qu'elle contient sont cités.

Tableau 13: modes de traitements préalables.

Eléments	Nuisance provoquée	Mode d'élimination
Gros débris	Incidents mécaniques	Dégrillage
Sable	Incidents mécaniques	Dessablage
MES	Colmatage	Décantation
Particules fines	Colmatage	Décantation
Algues et bactéries	Colmatage+Corrosion	Traitements biocides
Fer et Manganèse	Colmatage+Corrosion	Aération+Filtration
Sels dissous	Entartrage+Corrosion+Primage	Distillation+Osmose+Electrodialyse

Chapitre V

V. Méthodes chimiques de traitement des eaux industrielles

Parmi les eaux ayant subi ou non de traitements préliminaires certaines peuvent être utilisées directement, généralement après conditionnement (eaux douces). C'est aussi le cas des eaux potables auxquelles on applique un conditionnement biocide et parfois antitartre ou anticorrosion. C'est encore le cas des eaux industrielles utilisées pour la réfrigération ou certains procédés. Pour des raisons techniques et économiques les eaux dures sont rarement utilisées directement surtout dans les chaudières, il faut améliorer les caractéristiques par un traitement de base avant conditionnement. Le traitement de base est plus complexe et coûteux que les caractéristiques plus sévères sont demandées.

Plusieurs traitements de base peuvent être appliqués successivement lorsque l'eau de départ étant très dure, l'eau traitée doit être d'une grande pureté. Divers traitements de base contre l'entartrage sont utilisés :

- La décarbonatation ;
- Traitement calco-sodique ;
- Traitement au phosphate ;
- Adoucissement ;
- Distillation ;
- Déminéralisation ;
- Dêtartrage.

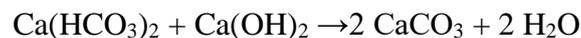
V.1. Traitement de base contre l'entartrage

V.1.1. La Décarbonatation

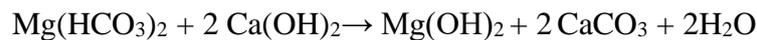
La décarbonatation consiste à éliminer les bicarbonates des eaux naturelles, deux techniques sont utilisées : Décarbonatation à la chaux ; Décarbonatation sur résines.

- Procédé de traitement à la Chaux

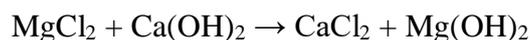
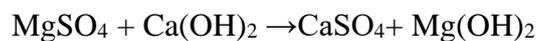
La Chaux se combine aux Bicarbonates pour former les carbonates qui précipitent et peuvent être éliminés sous forme de boue que l'on recueille à la partie basse des décanteurs. Les réactions sont les suivantes :



Pour les Bicarbonates de Magnésium, nous aurons :



La consommation est double pour précipiter les Bicarbonates de Magnésium. Si l'eau contient des sels de Magnésium sous forme de sulfates ou Chlorures, il ya également réaction selon :



La minéralisation d'une eau décarbonatée est donc considérablement surtout si cette eau est très chargée en Bicarbonates, en sortie des unités de traitement, l'eau à un TAC de 3°F environ, le TH temporaire ayant disparu, on retrouve la dureté de l'eau brute moins le TAC. Cette dureté peut être de l'ordre de 5 à 10°F selon la teneur de l'eau en Sulfates et en Chlorures. Normalement le bon réglage des débits du réacteur devrait être :

Si $\text{TA} = \text{TAC}/2 \pm 0,5^\circ\text{F}$ TH = TH permanent et TAC = 2 °F

Si $\text{TA} < \text{TAC}/2$Il a présence de Bicarbonates, il faut donc augmenter la Chaux.

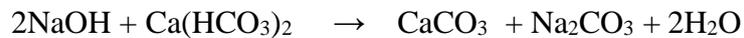
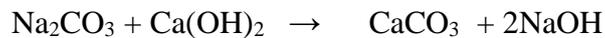
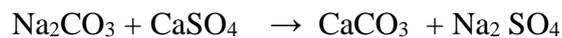
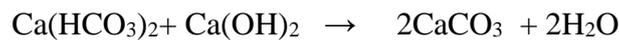
Si $\text{TA} > \text{TAC}/2$Il ya présence de Carbonates et d'Hydroxydes de Calcium, il faut donc diminuer le dosage de la Chaux.

- Procédé de traitement calcosodique

Le procédé par addition de chaux et de soude, basé sur l'utilisation de la chaux et de la soude, Na_2CO_3 , permet de réduire la dureté non carbonatée d'une eau. On exploite ici deux phénomènes différents:

- La précipitation (pour une partie de la dureté carbonatée);
- La réaction d'échange entre le calcium et le sodium (pour la partie de la dureté non carbonatée associée au calcium).

Les équations chimiques qui régissent les réactions sur lesquelles repose ce procédé sont les suivantes:



V.1.2. Inconvénients des procédés à la Chaux

Ces procédés ne fonctionnent bien que pour des gros débits (supérieur à $10 \text{ m}^3/\text{h}$). Le matériel utilisé est très encombrants et l'élimination des résidus doit se faire en continu.

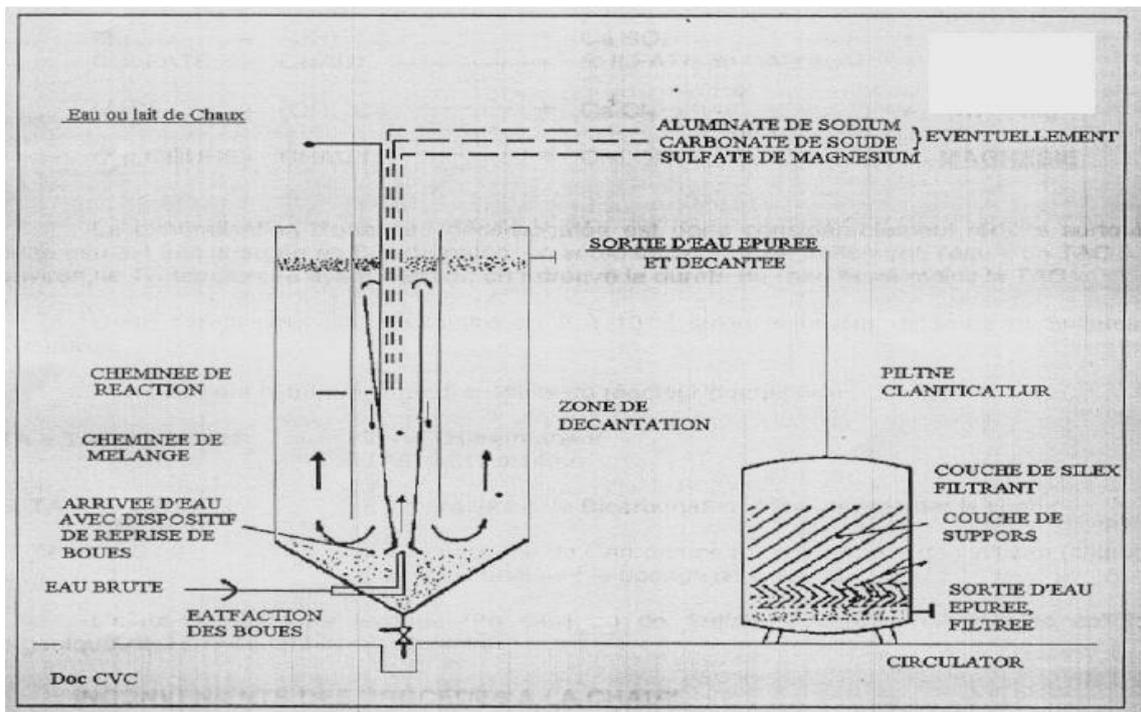


Figure 21 : schéma de procédé à la Chaux

V.1.3. 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.

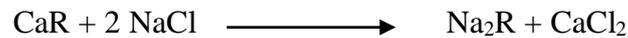
V.1.4. Adoucissement sur Résines

La mise en œuvre de l'adoucissement est indiquée dans la figure ci-dessous. Pendant un premier stade l'eau traverse le lit de résine, ou elle abandonne ses ions Ca et Mg et les remplace par les ions sodium conformément à la réaction suivante :



Dans un deuxième stade, lorsque la résine est saturée, on assure son détassage par un courant d'eau brute afin de faciliter la régénération.

Dans un troisième stade, on fait percoler lentement la saumure à travers le lit de résine. On évacue une saumure de chlorures de calcium et de Magnésium et la résine se trouve à nouveau sous forme de Na_2R conformément aux réactions chimiques suivantes :



En fin dans un 4ème stade, un rinçage à l'eau permet d'éliminer cette saumure et rend l'appareil prêt pour un nouveau cycle.

En cas de diminution du pouvoir d'échange du lit : colmatage par des matières en suspension (oxyde de fer) ou des matières en suspension ou des matières vivantes (algues et champignons), le nettoyage se fait avec des dispersants et des biocides périodiquement.

V.2. La distillation

L'eau brute (eau de mer) est portée à l'ébullition et la vapeur est condensée dans les appareils étanches. Les sels dissous se concentrent dans l'eau des évaporateurs dont on limite la salinité par des purges à l'égout. Le contrôle de l'eau distillée se limite à celui de la salinité (résistivité électrique). Dans les distillateurs modernes, la température de travail oscille entre 95 et 125°C. La salinité de l'eau douce obtenue par ce procédé est toujours nettement inférieure à 100 mg/L. On doit donc reminéraliser cette eau lorsqu'elle est destinée à la consommation.

V.2.1. Les Procédés de distillation

– **Distillation à simple effet** : L'eau de mer est portée à ébullition jusqu'à évaporation dans une enceinte étanche et où la pression est réduite. Le fluide caloporteur produit une évaporation de l'eau de mer.

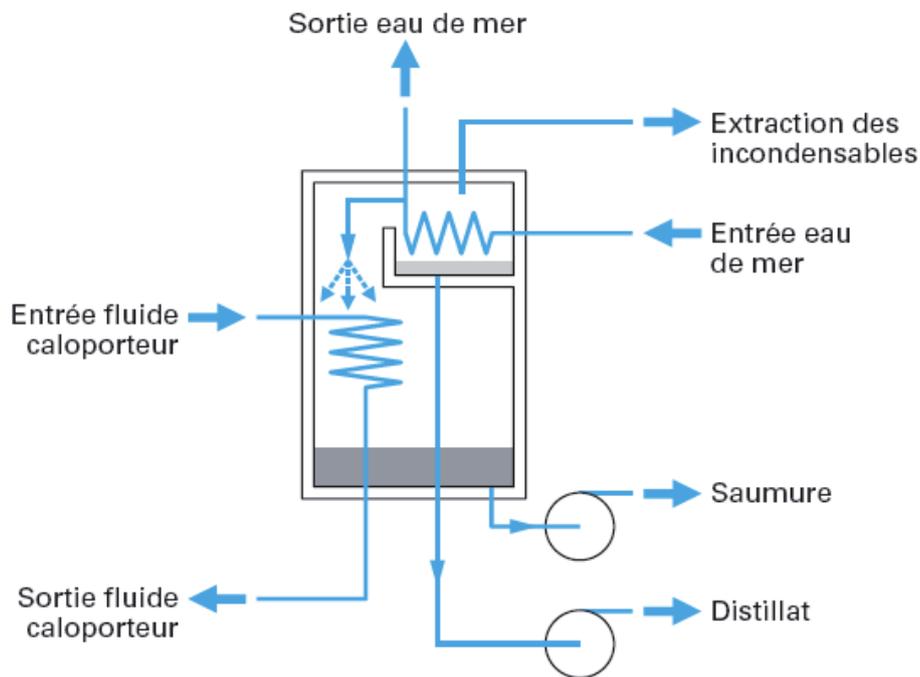


Figure 22: Principe de distillation à simple effet

Dans une enceinte fermée, un serpentin à l'intérieur duquel circule un fluide caloporteur porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide (voir fig 22). L'eau distillée (Distillat) s'écoule vers le bas, dans une goutte d'où elle est pompée pour des usages divers.

- Distillation à multiples effets

Dans ce type de procédé, on utilise la **chaleur produite** par la condensation de la vapeur **dans un premier évaporateur** pour **alimenter** le faisceau de chauffe d'un **deuxième évaporateur**, puis la **chaleur** de condensation du **deuxième évaporateur** pour **alimenter un troisième** et ainsi de suite (figure 23).

La déperdition de température d'un effet à l'autre est de 7 à 10 °C. Le nombre d'effets est en général limité à une dizaine.

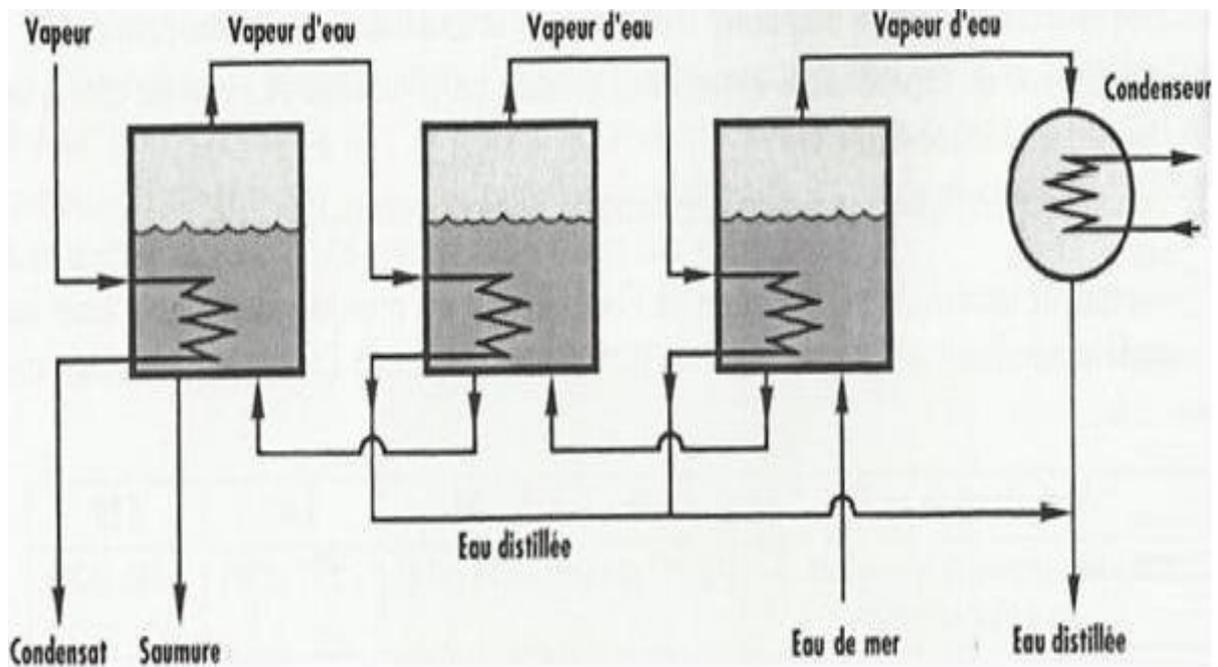
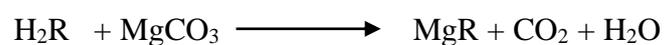
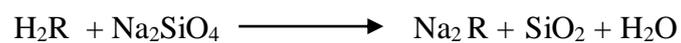
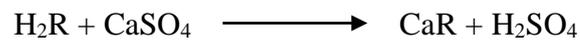


Figure 23: Principe de distillation à multiples effets

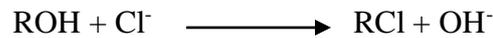
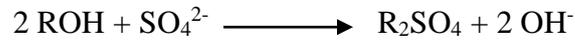
V.3. La déminéralisation

La déminéralisation permet d'obtenir une eau de très grande pureté nécessaire à l'alimentation des chaudières hautes et moyennes pression.

Principe : la déminéralisation se pratique par échange d'ions, les cations et les anions sont successivement remplacés par les ions hydrogène et des radicaux hydroxyles.



L'eau ainsi traitée ne contient plus que ces acides forts ou faibles, elle passe ensuite sur une résine anionique de type ROH.



Généralement, le CO_2 a été éliminé en majeure partie par dégazage après le passage sur la résine cationique.

Les échangeurs de cations sont dits cationiques, ils sont de deux types :

- résines cationiques fortes (fortement acide) : ils sont actifs vis-à-vis de tous les cations et sont constitués de polymères de styrène et de divinyl-benzène sulfoné ;
- Les résines cationiques faibles ou carboxyliques sont actives sur les carbonates et bicarbonates.

Les résines anioniques sont de deux types :

- résines anioniques fortement basique : sont actifs vis-à-vis de tous les anions;
- résines anioniques faiblement basiques : leurs action est limitée aux anions forts : SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- .

Selon l'importance des quantités d'eau à traiter et les performances finales à obtenir, on peut utiliser, soit un appareil simple à lits mélangés contenant à la fois les résines cationiques et anioniques fortes, soit une chaîne d'appareils plus ou moins complète comme le montre la figure suivante :

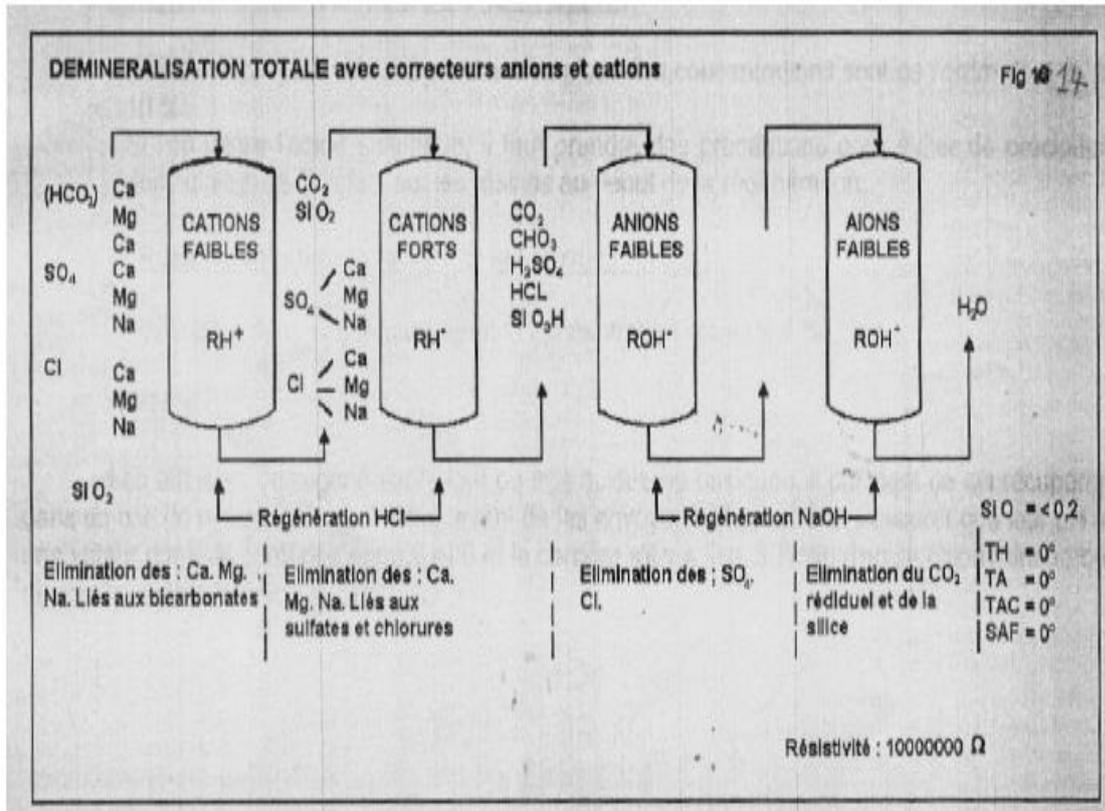


Figure 24 : Chaîne de déminéralisation

V.4. Le D etartrage

Il n'existe guère d'industries qui travaillent avec de l'eau brute n'ayant subi aucun traitement et acceptent d'arrêter périodiquement leurs installations, chaudières et circuits pour d etartrage.

Il arrive par contre que du fait d'une inefficacité d'un procédé anti tartre ou à un défaut de son application, les surfaces d'échanges s'entartrent, il est alors raisonnable de d etartrer avant d'effectuer un traitement plus efficace.

L'épuration à la chaux, l'épuration calco-sodique réduit la salinité pour la part correspondant à la dureté temporaire. La distillation et la déminéralisation l'éliminent compl tement. Le tableau suivant résume l'ensemble des opérations de traitement de base contre l'entartrage, corrosion et colmatage.

Tableau 14: Traitements de base contre l'entartrage, corrosion et colmatage

Eléments	Nuisances provoquée		Mode d'élimination	
	Réseaux	Circuits	Réseaux	Circuits
Carbonates Ca, Mg	Entartrage	Entartrage	Décarbonatation	Décarbonatation
Dureté permanente	Entartrage	Entartrage	Décarbonatation	Déminéralisation
Oxygène	Corrosion	Corrosion	/	Dégazage
CO₂	Corrosion	Corrosion	Décarbonatation	Dégazage
MES	Corrosion	Primage	Décarbonatation	Filtration
Huile	Corrosion	Primage	Décarbonatation	Séparation
Sels dissous	Corrosion	Primage	Décarbonatation	Déminéralisation
Silice	/	Entartrage – Primage	/	Déminéralisation

V.5. L'Osmose inverse

L'osmose est un phénomène naturel à travers une membrane semi-perméable : l'eau douce migre vers l'eau salée, la plus concentrée. L'équilibre s'établit à la pression osmotique. Plus l'eau est chargée en sels et plus la pression osmotique est élevée.

Il est possible d'inverser l'opération en exerçant une pression sur l'eau salée et faire migrer les plus petites molécules d'eau, c'est l'osmose inverse (voir figure).

L'osmose inverse consiste à filtrer l'eau par son passage à travers une membrane semi-perméable d'une extrême finesse dont sont séparés deux solutions de concentrations différentes. Ainsi, la solution la plus concentrée passe vers le milieu de la solution diluée, par l'action d'une pression, exercée coté solution concentrée, supérieur à la pression osmotique. Cette membrane filtre tous les éléments indésirables que peut contenir l'eau (voir figure25).

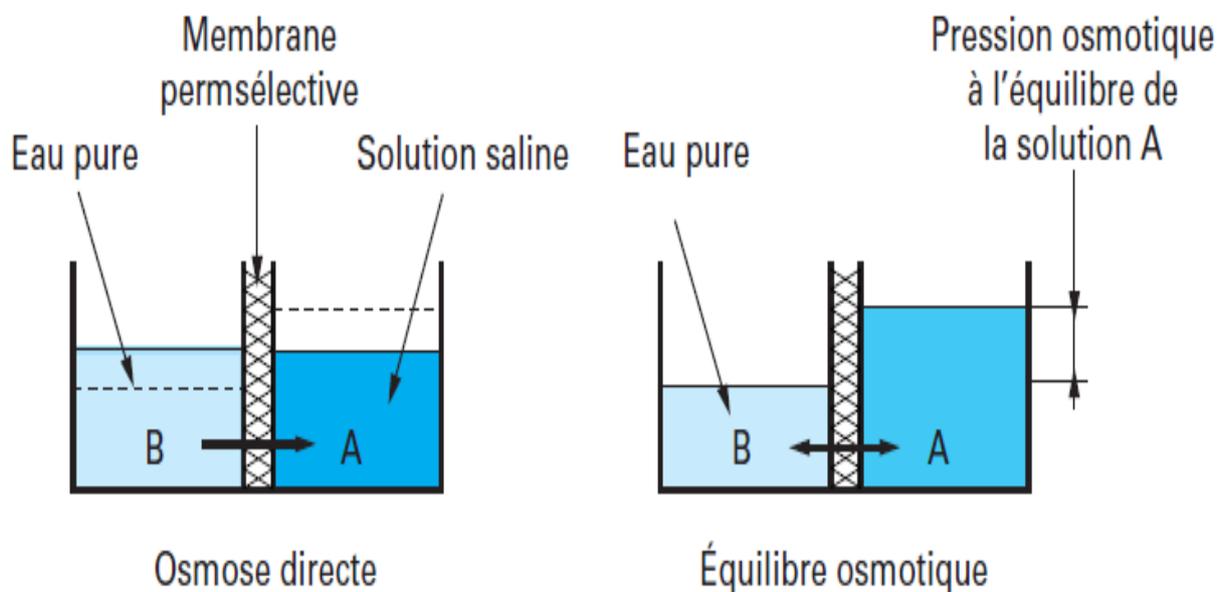


Figure 25 : Phénomène osmotique

V.5.1. Technique des membranes

Une installation de dessalement comporte un système de prétraitement, une unité de étalement et un traitement postérieur. Une pompe haute pression augmente la pression de l'eau d'alimentation jusqu'à la pression de travail requise. La pression de travail est considérablement plus élevée que la pression osmotique, afin d'obtenir un débit satisfaisant à travers la membrane. L'utilisation d'une pression plus élevée aboutit à une quantité d'eau traitée plus importante. Un interrupteur haute pression régule la pression au niveau des membranes. L'installation comporte aussi des débitmètres et des appareils mesurant la pression pour la régulation des procédés. De plus, il y a un certain nombre de mesures de sécurité telles qu'un interrupteur basse pression et un conductimètre avec une barrière de sécurité. Le principe de la mise en œuvre d'un système de dessalement peut être schématisé comme le montre la figure suivante.

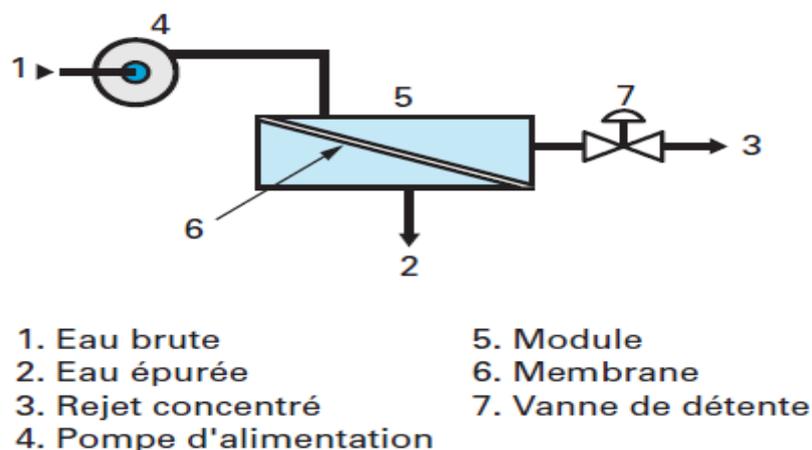


Figure 26: Schéma simplifié de fonctionnement d'une unité d'osmose

L'unité de dessalement est constituée de plusieurs membranes d'osmose inverse, placées dans plusieurs réservoirs sous pression, qui sont placés dans un certain ordre. L'eau d'alimentation qui est pompée dans le module sera séparée en deux : une partie donnera l'eau avec une faible

concentration en sel et l'autre aura une forte concentration en sel. L'eau avec une faible concentration est appelée « perméat » et l'eau avec la forte concentration est appelée « concentrât ». Le débit du concentrât est régulé par un appareil sous pression. L'appareil régule le pourcentage d'eau d'alimentation qui quitte le module sous forme de concentrât.

V.6. Electrodialyse

L'électrodialyse ne s'applique qu'aux eaux faiblement saumâtres car la capacité de débit des membranes décroît quand la salinité de l'eau à traiter augmente. Elle n'est économique que pour les eaux ayant une salinité inférieure à 3 g.l^{-1} qu'elle ramène à $0,5 \text{ g.l}^{-1}$. Moins l'eau est saline, plus la consommation de courant s'élève par suite de l'accroissement de résistivité de l'eau déminéralisée. De ce fait, ce procédé n'est guère utilisable pour traiter des eaux de minéralisation inférieure à $0,5 \text{ g.l}^{-1}$. Le procédé d'électrodialyse est adapté à des débits allant jusqu'à quelques milliers de $\text{m}^3.\text{j}^{-1}$.

V.6.1. Principe

L'électrodialyse repose sur la mise au point et l'utilisation de membranes imperméables à l'eau et sélectives pour les ions. Seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique, et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique.

Si un liquide riche en ions est soumis à un champ électrique grâce à deux électrodes entre lesquelles on applique une différence de potentiel continue, les cations vont se diriger vers l'électrode négative (ou cathode) tandis que les anions vont se diriger vers l'électrode positive (ou anode). Si rien ne s'oppose à leur mouvement, ils viennent se décharger sur les électrodes de signe contraire, il y a électrolyse.

En revanche, si l'on place entre les électrodes un ensemble de membranes de dialyse sélectives (cationiques : perméables aux cations seulement), et (anioniques : perméables aux seuls anions), disposées alternativement comme l'indique la figure 27, on limite la migration

des ions, car les anions ne peuvent traverser les membranes négatives, ni les cations les membranes positives.

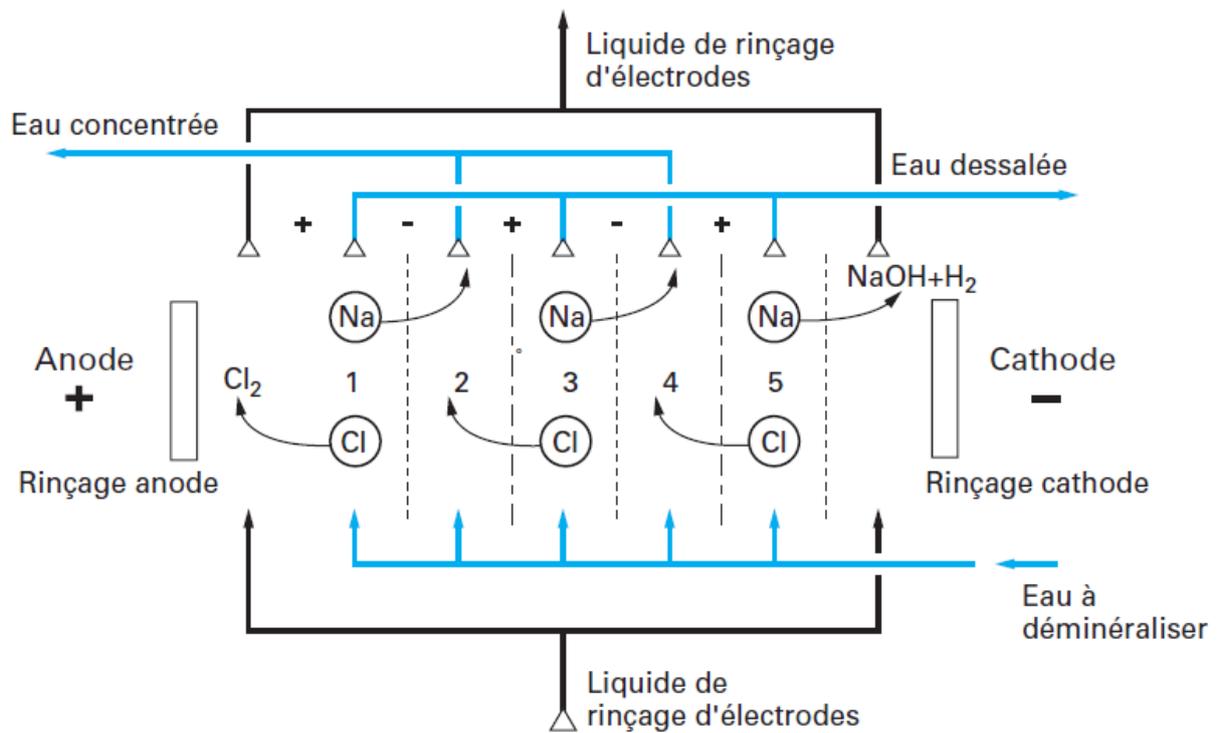


Figure 27: Principe de l'électrodialyse

Chapitre VI

VI. Traitements biologiques des eaux usées et industrielles

L'épuration biologique a pour but d'éliminer la matière polluante biodégradable contenue dans l'eau en la transformant en matières en suspension. La dégradation peut se réaliser par voie aérobie (en présence d'oxygène) ou anaérobie (en l'absence d'oxygène). Dans ce dernier cas, ou les réactions s'exécutent à l'abri de l'air, le carbone organique, après dégradation, se retrouve sous forme de CO₂, méthane et biomasse. Ce type de traitement appelé " digestion anaérobie " n'est utilisé que pour des effluents très concentrés en pollution carbonée. On peut décrire ce processus par la réaction suivante :



VI.1. Traitement biologique a 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, rivière,...etc.). Le traitement s'effectue dans des réacteurs avec aérateur (Oxygène) où l'on met en contact des micro-organismes épurateurs et l'eau à épurer (figure 28). On utilise un bassin brassé, pour conserver en suspension la culture, dans lequel est maintenue :

- soit une concentration d'oxygène, pour les procédés aérobies ;
- soit une absence d'oxygène, pour les procédés anaérobies.

Le procédé par boues activées est le plus répandue des procédés biologiques.

VI.1.1. 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).
- l'âge des boues qui est le rapport entre la masse de boues présentes dans le réacteur et la masse journalière de boues extraites. Il s'exprime en jours.

VI.1.2. 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.

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

➤ **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.

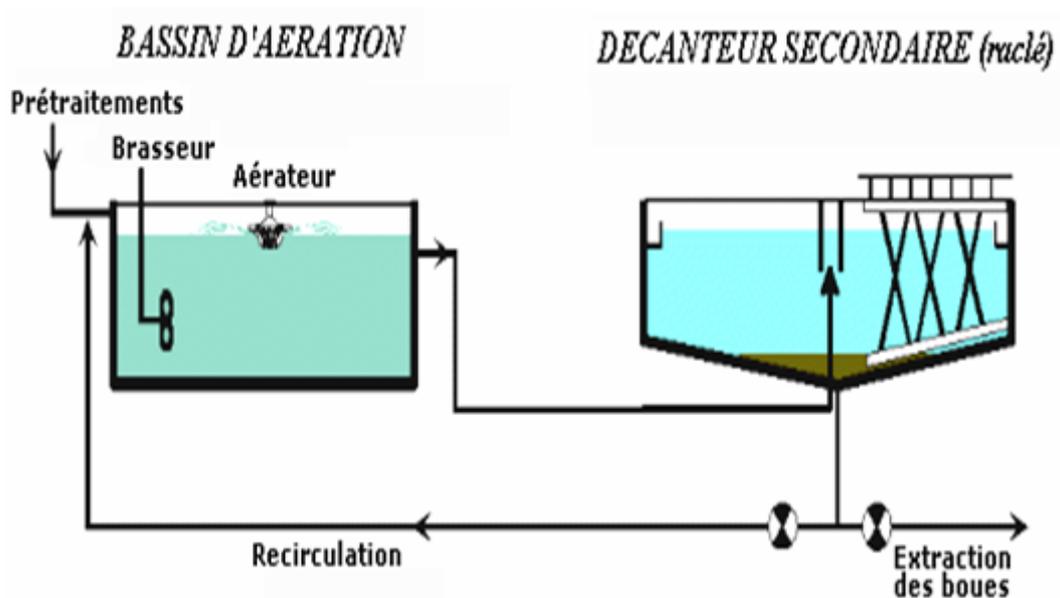


Figure 28: Schéma de fonctionnement d'une station à boues activées.

VI.2. Epuration biologique à biomasse fixée

Ce traitement est basé sur le principe de la dégradation biologique dans un bioréacteur contenant une biomasse active en présence d'air (aérateur). La pollution organique est décomposée par l'activité des microorganismes dans le bassin. Les produits de la dégradation biologique sont H_2O et le CO_2 et la substance physique en excès des microorganismes, la boue en excès. Les conditions biotiques optimales pour les microorganismes sont :

- La teneur en oxygène suffisante
- Apport d'alimentation suffisant (eaux usées concentrés).

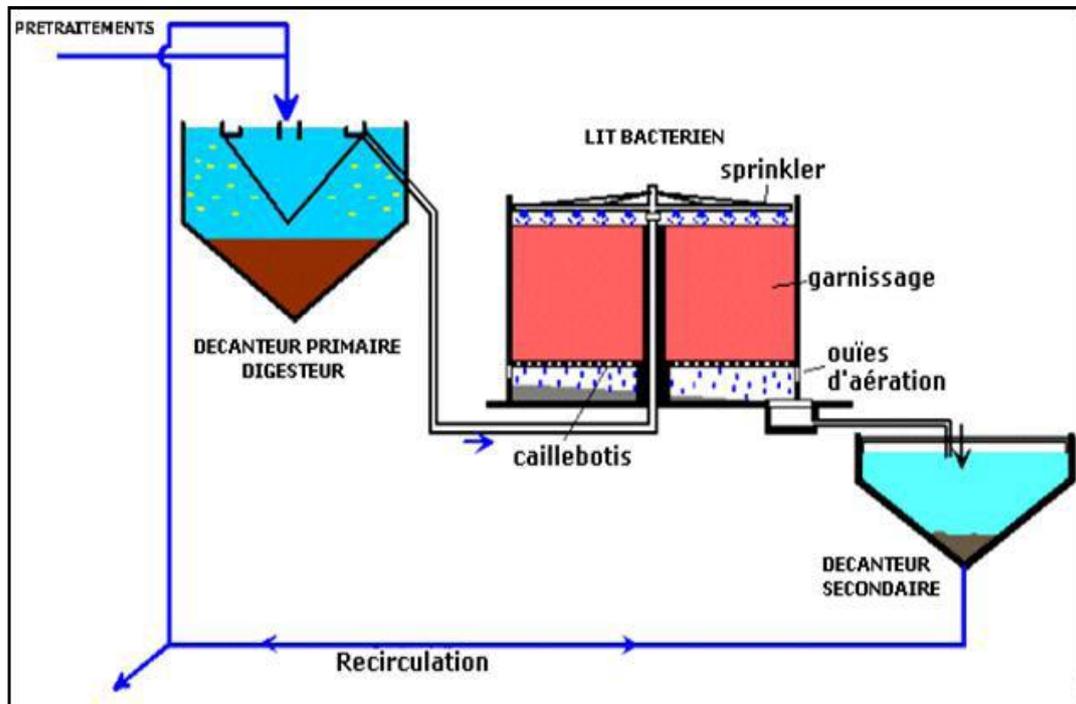


Figure 29: Lit Bactérien

➤ **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 paraît 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.

VI.3. Le disque biologique

Comme le montre la figure 30, le procédé à bio disques est constitué par des disques parallèles régulièrement fixées sur un axe horizontal. Ces disques fonctionnent à faible vitesse et leurs mouvements induits une oxygénation de la culture pendant la période d'immersion. L'efficacité de ce procédé est fonction de :

- 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.

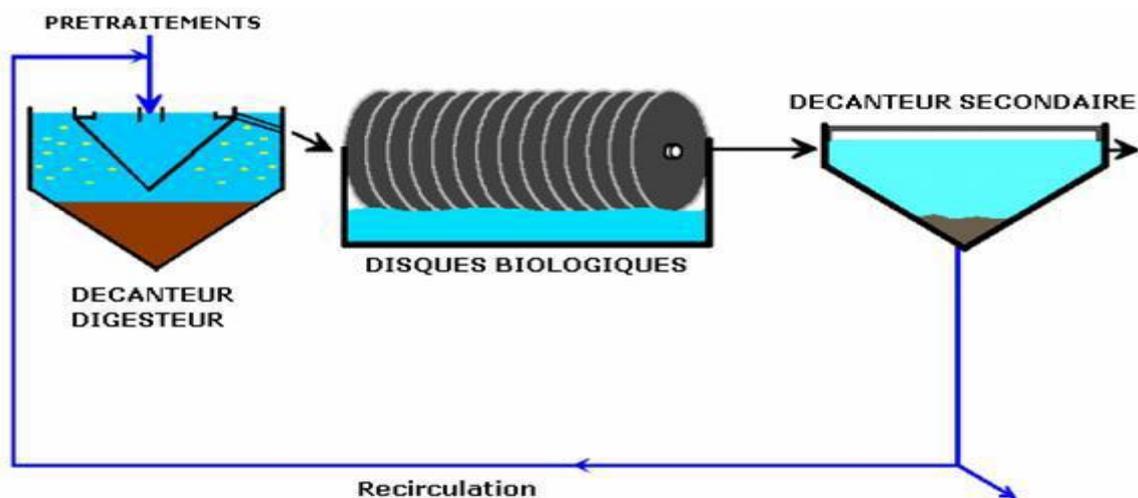


Figure 30: Disque biologique.

➤ **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.

VI.4. Le lagunage

C'est un procédé utilisant de grandes surfaces (lagunes) s'appuyant sur les propriétés épuratrices d'un plan d'eau peu profond. Il existe principalement deux types de lagunage :

VI.4.1. Le lagunage naturel

Le principe de cette méthode consiste à 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 (figure31) :

- 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).

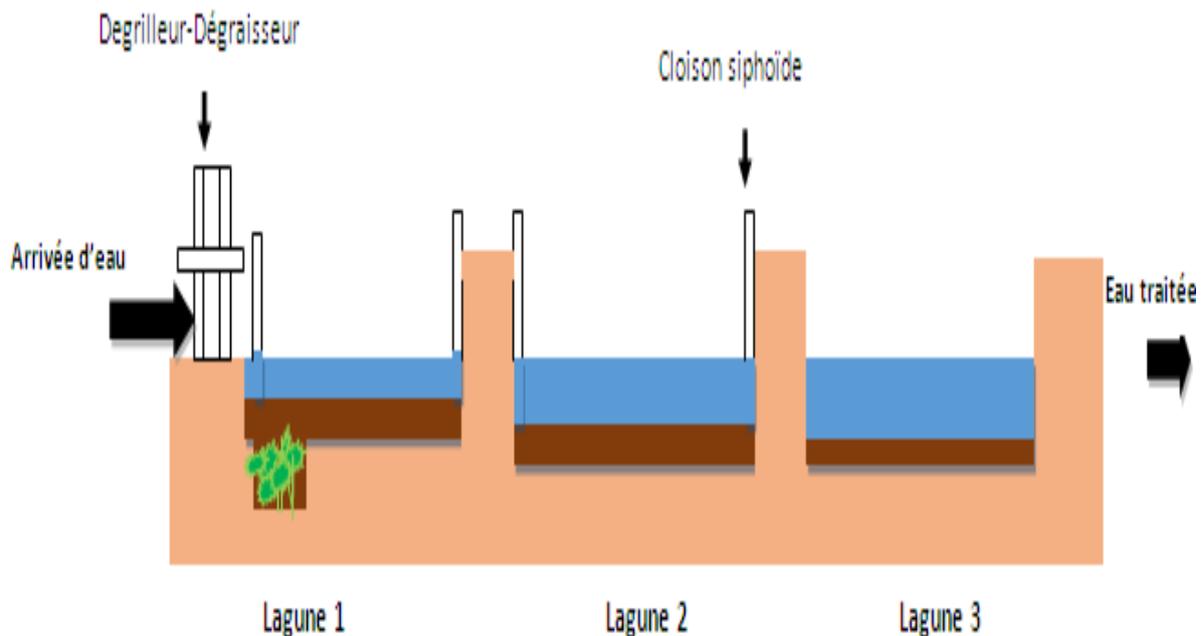


Figure 31: Lagunage naturel.

➤ **Avantages**

- bien conçu au réseau unitaire ;
- faibles coûts d'exploitation ;
- bonne élimination des pathogènes ;
- boues peu fermentescibles ;
- raccordement électrique inutile ;

➤ **Inconvénients :**

- captage important au sol;
- contraintes de nature de sol et d'étanchéité ;
- variation saisonnière de la qualité de l'eau traitée ;
- nuisances en cas de défaut de conception et d'exploitation (rongeurs, odeurs, moustiques);
- limination partielle de l'azote et du phosphore ;
- Gestion difficile des boues;

VI.4.2. Le lagunage aéré

C'est une technique d'épuration biologique par culture libre qui utilise un apport artificiel d'oxygène. La dégradation de la pollution est fonction :

- De la vitesse de l'apport d'oxygène dans l'eau
- D'une homogénéité suffisante pour assurer un contact intime entre le milieu vivant, les éléments polluants et l'oxygène introduit.

VI.5. Traitement des boues

Il existe différents types de boues selon l'étape de traitement des eaux duquel elles sont issues.

On rencontre ainsi des boues primaires, secondaires et des boues physico-chimiques.

Les étapes de traitement des boues sont : l'épaississement, déshydratation et la stabilisation ainsi que l'hygiénisation.

➤ **L'épaississement des boues** : Cette opération permet de réduire trois à six fois le volume des boues, réduisant ainsi les coûts de stockage et de transport.

L'épaississement peut se faire soit par simple égouttage, par flottation comme présenté sur la figure 32, par centrifugation ou par voie gravitaire au moyen d'un concentrateur. Cette étape a pour effet d'augmenter la proportion en matières sèches dans les boues.

➤ **La déshydratation** : C'est une étape qui consiste à réduire le volume d'eau de manière plus poussée que l'épaississement. La déshydratation se réalise au moyen de centrifugeuses, filtres presses ou des filtres à bandes, la siccité,



Figure 32: Disque biologique rotatif

➤ **La stabilisation**

Les boues d'épuration sont composées de matières organiques dégradables, de matières minérales et d'organismes pathogènes. La stabilisation a pour but de stopper la dégradation des fermentescibles contenues dans les boues, en bloquant les réactions. On distingue différents procédés de stabilisation : par voie aérobie, anaérobie, et chimique.

La stabilisation par voie aérobie peut se réaliser dans des bassins d'aération.

Cette opération s'effectue en deux étapes :

La première consiste à dégrader la matière organique fraîche à hautes températures (50 à 70°C) sous l'action de bactéries. Cette élévation de température est essentiellement d'origine biologique due à l'activité microbienne ; la deuxième phase dite de maturation qui est une phase de dégradation moins soutenue. La stabilisation par voie chimique est également employée et se réalise par chaulage. Contrairement au compostage, le chaulage ne transforme pas la matière organique mais bloque toute évolution des boues par augmentation du pH. Comme son nom l'indique, la digestion anaérobie permet la digestion de l'essentiel de la matière organique contenue dans les boues.

Références bibliographiques

- [1] Rodier, J. L'Analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9 ème Edition Dunod, (2009).
- [2] Atteia, A. Chimie et pollutions des eaux souterraines, édition Tec et Doc (2005), 400 p.
- [3] Traitement des eaux : Chaudières à vapeur et circuits de réfrigération, L.Germain, édition Dunod, 1976, Paris, France.
- [4] Manuel sur le traitement des eaux industrielles, SH/CPE, Département technique, Arzew, 1989.
- [5] Desjardins, R. Le Traitement des Eaux, Ed. Ecole Polytechnique de Montréal, (1997), 303p.
- [6] Edeline, F. L'épuration biologique des eaux : Théorie et technologie des réacteurs, Ed. Cebedoc, liège, (1993), 298 p.
- [7] Ouali, M. Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux 2emeEdition, office des publications universitaires, Alger (2008) 156p.
- [8] Cardot, C. Les traitements de l'eau Procédés physico-chimiques et biologiques, Cours et problèmes résolus, Edition : Ellipses, Paris, ISBN 2-7298-598 1-0,1999.
- [9] Bessedik M. Traitement et épuration de l'eau. Cours, [https ://ft.univ-tlemcen.dz/assets/u](https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/u), 2015.
- [10] LEGUBE Bernard, *production d'eau potable : filières et procédés de traitement* Dunod, Paris, ISBN 978-2-10-059321-7, 2015.
- [11] MACKENZIE L. Davis. Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, McGraw-Hill Companies, 2010.