

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
كلية التكنولوجيا
قسم الري

N : 07/2023/CSD/DH

M'sila le, 18/04/2023

Extrait du procès-verbal du comité scientifique du département

Le président,

Après avoir pris connaissance des trois avis favorables des trois experts désignés par le comité scientifique du département d'hydraulique (avoir l'extrait du PV en date du 07 /02/ 2023) pour évaluer le polycopié '**Traitement et dessalement des eaux**' déposé par Mr **Guemache Abderezak** (MCA), maître de conférences classe A, le comité émet **un avis favorable**, et valide son contenu pour être publié dans la plateforme E-learning de l'université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Le président du CSD



ودعة مصطفى

Avant-propos

Ce polycopié répond au canevas ministériel de cours de traitement et dessalement des eaux enseigné en deuxième année S3_Master ressources hydrauliques LMD. À l'échelle mondiale, le traitement et le dessalement des eaux constituent la principale préoccupation en matière de santé publique. L'eau à l'état naturel doit être traitée par des usines de production qui la rendront potable.

Les eaux usées sont dépolluées dans les stations d'épuration, appelées également usines de dépollution en raison des traitements complexes qu'elles appliquent. La problématique des eaux usées est plus que jamais à l'ordre du jour, à cause des impacts néfastes de ces eaux usées sur le milieu naturel. Ces impacts sont de plus en plus grandissants en raison du développement industriel et de la croissance démographique.

La désalinisation est une technique encourageante. Par osmose inversée, par distillation ou encore par électrodialyse, ces techniques de désalinisation agrément de séparer le sel de l'eau de mer pour la rendre potable

Le but de ce polycopié est de fournir à l'étudiant l'ensemble des procédés visant à traiter non seulement l'eau potable mais aussi dépolluer l'eau usée avant son retour dans le milieu naturel dans un souci de protection des milieux récepteurs et aussi connaître les procédés de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres. Les chapitres s'enchainent et forment un tout.

Dans la première partie de l'ouvrage, on y trouve les informations indispensables sur les caractéristiques des eaux suivies des normes de potabilité.

Dans une deuxième partie, sont exposés les différents traitements de clarification (coagulation, floculation, décantation et filtration) ainsi que les traitements complémentaires.

Dans la troisième partie les différentes étapes de traitements de finition.

Le dernier chapitre est réservé aux différentes techniques de dessalements ainsi les problèmes techniques rencontrés en dessalement

Mots - clés : Propriétés des eaux de consommation, Traitements de Clarification, Traitements de finition, Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres

Matière d'enseignement

Unité d'enseignement : UEF 2.1.1

Matière : Traitement et dessalement des eaux

VHS: 67h30 (Cours : 3h00, TD : 1h 30)

Crédits : 6

Coefficient : 3

Table des matières

Chapitre I. Propriétés des eaux de consommation	
I. L'eau.....	1
I.1. Le cycle de l'eau.....	1
I.2. Normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine.....	4
I.2.1. Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux.....	4
I.2.2. Paramètres concernant des substances indésirables.....	5
I.2.3. Paramètres concernant des substances toxiques.....	6
I.2.4. Paramètres microbiologiques.....	7
I.2.5. Pesticides et produits apparentés.....	7
I.2.6. Paramètres concernant les eaux adoucies livrées à la consommation humaine.....	7
I.3. Usages de l'eau et leur exigence	8
I.3. 1.L'usage agricole.....	8
I.3. 2.Les usages domestiques.....	8
I.3. 3.Les usages industriels.....	8
I.3.4. Les usages énergétiques.....	9
I.4.Traitement de l'eau brute pour le rendre potable.....	9
I.5. Traitement des eaux usées.....	10
Chapitre II : les Traitements de Clarification	
II.1 La Coagulation –Floculation –Décantation-Filtration.....	13
II.2. Phénomène de la coagulation.....	13
II.2.1. Réactifs utilisés.....	14
II.3. Phénomène de la Floculation.....	15
II.4. Technologie de la Coagulation – Floculation	15
II.5. Décantation.....	16
II.6 Filtration	17
II.6.1.Choix du mode de filtration.....	19
Chapitre III : Les traitements de finition	
III.L'adsorption et échange d'ion.....	21
III.1.Généralité	21
III.2.Définition d'adsorption.....	21
III.3. Echange d'ion.....	23
III.3.1. Principe.....	23
III.4.La désinfection	26
III.4.1.Définition.....	26
III.4.2.Avantages et inconvénient.....	29
III.5.Adoucissement de l'eau par précipitation chimique	29
III.6. Élimination du fer.....	32
III.7. Elimination du Mg ²⁺	33
Chapitre IV : Dessalement des eaux de mer e t des eaux saumâtres	
IV. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres	34
IV.1. Les eaux marines.....	34
IV.2. Les eaux saumâtres.....	35
IV.2. Les principales technologies de dessalement des eaux.....	35
IV.2.1. L'osmose inverse.....	36
IV.2.1.1. Principe de l'osmose inverse	36
IV.3. Les procédés de distillation	37
IV.3.1. Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)	38

IV.3.2. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).....	39
IV.4. Distillateur solaire simple	39
IV.4.1. Distillateur solaire d'eau de mer.....	40
IV.5. Procédé électrodialyse	41
IV.5. 1. Pré –Traitement	42
IV.5. 2. Avantages et inconvénient	43
IV.6. Problèmes techniques rencontrés en dessalement.....	43
IV.1. La corrosion.....	43
IV.2. L'entartrage (Scaling)	44
IV.3. Le colmatage (Fouling).....	45
Références bibliographiques	

Abréviations

X/m : La masse fixée de soluté par unité de masse d'adsorbant

m : Masse d'adsorbant

C_e : La concentration à l'équilibre dans la phase aqueuse des molécules de polluants

K_n : Constantes énergétiques fonctions du couple adsorbant/adsorbant

d : Densité

UV : Rayonnement ultra violet

pH : potentiel d'hydrogène

TH : Degré hydrotimétrique

°TH: Degré Hardness

°GH : Degré Gesamthärte

DBO : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

C.T : Temps de contact

C : Concentration

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

°Chl : Le degré chlorométrique

°f : Le degré français

°F : Le degré Fahrenheit

°C : Le degré Celsius

(Q, m³) : Débit horaire

(TF, en heures) : Temps de fonctionnement, 1 cycle

(V, en m³) : Volume total d'eau à traiter

(SAF en °F/litre d'eau) : sels d'acides forts, définitions de l'eau "brute"

(TAC en °F/litre) : de l'eau "brute"

Teneur en silice (SiO₂) : en °F/litre

(CE, en °F/litre de résine) : Capacité d'échange de la résine

MES : Matière en suspension

TA : Titre alcalimétrique simple

TAC : Titre alcalimétrique complet

THM : Trihalométhanes

COT : Carbone Organique Total

P.C.B : Les pesticides ' polychlorobiphényles'

P.C.T : Les insecticides ' polychlorobiphényles'

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie
Département d'hydraulique



Polycopie de cours

Traitement et dessalement des eaux

En Ressources Hydrauliques

Unité d'enseignement : UEF 2.1.1 Niveau Master II (S3)

Matière : Traitement et dessalement des eaux

VHS: 67h30 (Cours : 3h00, TD : 1h 30)

Crédits : 6

Coefficient : 3

Présenté par :Guemache Abderezak

Année Universitaire : 2022/2023

Avant-propos

Ce polycopié répond au canevas ministériel de cours de traitement et dessalement des eaux enseigné en deuxième année S3_Master ressources hydrauliques LMD. À l'échelle mondiale, le traitement et le dessalement des eaux constituent la principale préoccupation en matière de santé publique. L'eau à l'état naturel doit être traitée par des usines de production qui la rendront potable.

Les eaux usées sont dépolluées dans les stations d'épuration, appelées également usines de dépollution en raison des traitements complexes qu'elles appliquent. La problématique des eaux usées est plus que jamais à l'ordre du jour, à cause des impacts néfastes de ces eaux usées sur le milieu naturel. Ces impacts sont de plus en plus grandissants en raison du développement industriel et de la croissance démographique.

La désalinisation est une technique encourageante. Par osmose inversée, par distillation ou encore par électrodialyse, ces techniques de désalinisation agrément de séparer le sel de l'eau de mer pour la rendre potable

Le but de ce polycopié est de fournir à l'étudiant l'ensemble des procédés visant à traiter non seulement l'eau potable mais aussi dépolluer l'eau usée avant son retour dans le milieu naturel dans un souci de protection des milieux récepteurs et aussi connaître les procédés de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres. Les chapitres s'enchainent et forment un tout.

Dans la première partie de l'ouvrage, on y trouve les informations indispensables sur les caractéristiques des eaux suivies des normes de potabilité.

Dans une deuxième partie, sont exposés les différents traitements de clarification (coagulation, floculation, décantation et filtration) ainsi que les traitements complémentaires.

Dans la troisième partie les différentes étapes de traitements de finition.

Le dernier chapitre est réservé aux différentes techniques de dessalements ainsi les problèmes techniques rencontrés en dessalement

Matière d'enseignement

Unité d'enseignement : UEF 2.1.1

Matière : Traitement et dessalement des eaux

VHS: 67h30 (Cours : 3h00, TD : 1h 30)

Crédits : 6

Coefficient : 3

Table des matières

Chapitre I. Propriétés des eaux de consommation	
I. L'eau.....	1
I.1. Le cycle de l'eau.....	1
I.2. Normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine.....	4
I.2.1. Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux.....	4
I.2.2. Paramètres concernant des substances indésirables.....	5
I.2.3. Paramètres concernant des substances toxiques.....	6
I.2.4. Paramètres microbiologiques.....	7
I.2.5. Pesticides et produits apparentés.....	7
I.2.6. Paramètres concernant les eaux adoucies livrées à la consommation humaine.....	7
I.3. Usages de l'eau et leur exigence	8
I.3. 1.L'usage agricole.....	8
I.3. 2.Les usages domestiques.....	8
I.3. 3.Les usages industriels.....	8
I.3.4. Les usages énergétiques.....	9
I.4.Traitement de l'eau brute pour le rendre potable.....	9
I.5. Traitement des eaux usées.....	10
Chapitre II : les Traitements de Clarification	
II.1 La Coagulation –Floculation –Décantation-Filtration.....	13
II.2. Phénomène de la coagulation.....	13
II.2.1. Réactifs utilisés.....	14
II.3. Phénomène de la Floculation.....	15
II.4. Technologie de la Coagulation – Floculation	15
II.5. Décantation.....	16
II.6 Filtration	17
II.6.1.Choix du mode de filtration.....	19
Chapitre III : Les traitements de finition	
III.L'adsorption et échange d'ion.....	21
III.1.Généralité	21
III.2.Définition d'adsorption.....	21
III.3. Echange d'ion.....	23
III.3.1. Principe.....	23
III.4.La désinfection	26
III.4.1.Définition.....	26
III.4.2.Avantages et inconvénient.....	29
III.5.Adoucissement de l'eau par précipitation chimique	29
III.6. Élimination du fer.....	32
III.7. Élimination du Mg ²⁺	33
Chapitre IV : Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres	
IV. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres	34
IV.1. Les eaux marines.....	34
IV.2. Les eaux saumâtres.....	35
IV.2. Les principales technologies de dessalement des eaux.....	35
IV.2.1. L'osmose inverse.....	36
IV.2.1.1. Principe de l'osmose inverse	36
IV.3. Les procédés de distillation	37
IV.3.1. Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF)	38

IV.3.2. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).....	39
IV.4. Distillateur solaire simple	39
IV.4.1. Distillateur solaire d'eau de mer.....	40
IV.5. Procédé électrodialyse	41
IV.5. 1. Pré –Traitement	42
IV.5. 2. Avantages et inconvénient	43
IV.6. Problèmes techniques rencontrés en dessalement.....	43
IV.1. La corrosion.....	43
IV.2. L'entartrage (Scaling)	44
IV.3. Le colmatage (Fouling).....	45
Références bibliographiques	

Abréviations

X/m : La masse fixée de soluté par unité de masse d'adsorbant

m : Masse d'adsorbant

C_e : La concentration à l'équilibre dans la phase aqueuse des molécules de polluants

K_n : Constantes énergétiques fonctions du couple adsorbat/adsorbant

d : Densité

UV : Rayonnement ultra violet

pH : potentiel d'hydrogène

TH : Degré hydrotimétrique

°TH: Degré Hardness

°GH : Degré Gesamthärte

DBO : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

C.T : Temps de contact

C : Concentration

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

°Chl : Le degré chlorométrique

°f : Le degré français

°F : Le degré Fahrenheit

°C : Le degré Celsius

(Q, m³) : Débit horaire

(TF, en heures) : Temps de fonctionnement, 1 cycle

(V, en m³) : Volume total d'eau à traiter

(SAF en °F/litre d'eau) : sels d'acides forts, définitions de l'eau "brute"

(TAC en °F/litre) : de l'eau "brute"

Teneur en silice (SiO₂) : en °F/litre

(CE, en °F/litre de résine) : Capacité d'échange de la résine

MES : Matière en suspension

TA : Titre alcalimétrique simple

TAC : Titre alcalimétrique complet

THM : Trihalométhanes

COT : Carbone Organique Total

P.C.B : Les pesticides ' polychlorobiphényles'

P.C.T : Les insecticides ' polychlorobiphényles'

Chapitre I : Propriétés des eaux de consommation

I. L'eau

Introduction

La planète bleue, troisième planète du système solaire est recouverte à **71 %** par une molécule de vie : l'eau.

- Les océans, les mers et les glaces polaires représentent **99 %** du volume de l'**hydrosphère**.
- Les lacs, les rivières et les eaux souterraines constituent **1 %** de ce volume : c'est l'eau douce indispensable à l'homme

Les trois états de l'eau

- À l'état **liquide**, l'eau est appelée « **eau** ».
- À l'état solide, l'eau est appelée « **glace** ».
- À l'état **gazeux**, l'eau est appelée « **vapeur d'eau** ».

I.1. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est un processus assez difficile. En effet des mots comme évaporation, condensation, précipitation, ruissellement, infiltration, ressortent mais que veulent-ils bien dire ? Complète le schéma avec les mots ci-dessus.



Figure I.1 : Les différentes étapes de cycle de l'eau

I.1.1. Définitions/explications :

Evaporation :

Sous l'effet de la chaleur (le soleil), l'eau se transforme en vapeur d'eau (état gazeux). Cette transformation est une évaporation.

Condensation :

Phénomène au cours duquel la vapeur d'eau se transforme en eau liquide. Lorsqu'il commence à faire de plus en plus froid, la goutte d'eau ne peut plus conserver sa forme de vapeur d'eau (comme du gaz). C'est alors que toutes les gouttes d'eau se transforment en petites gouttelettes très légères.

Précipitation :

Formes variées sous lesquelles l'eau solide ou liquide contenue dans les nuages se dépose à la surface de la planète. Ce phénomène se produit quand, grâce à la condensation, les gouttelettes d'eau se collent les unes aux autres et deviennent alors plus lourdes

❖ **Les précipitations peuvent prendre plusieurs formes :**

- ✓ Quand les nuages, formés de gouttelettes d'eau condensés, rencontrent de l'air froid, l'eau se liquéfie et retombe donc dans la mer ou sur la terre, on appelle ça la pluie ;
- ✓ Quand il fait froid, les gouttes d'eau se changent en cristaux de glace : c'est la neige ;
- ✓ Si le vent est fort, les petits cristaux se collent les uns aux autres, s'alourdissent et tombent sous la forme de petits glaçons, c'est la grêle ;
- ✓ Quand de très fines gouttelettes flottent dans l'air près du sol, c'est le brouillard.

Le ruissellement :

Sur les sols peu perméables ou déjà gorgés d'eau par les précipitations précédentes dans lesquels l'eau ne peut s'infiltrer, l'eau de pluie ou la neige fondue ruisselle. Elle va alors former des petits cours d'eau qui, en rencontrant d'autres, deviendront des rivières

L'infiltration :

Lorsque la pluie tombe et qu'elle atteint le sol, une partie de l'eau est directement utilisée par la végétation, une partie s'évapore (voir évaporation), une partie ruisselle sur la

surface pour atteindre un cours d'eau et la dernière s'infiltrer dans le sol. L'infiltration dépend directement de la nature du sol et du couvert végétal.

Ressources destinées à l'alimentation

- ✓ Eaux superficielles: (Lacs, Fleuves, Rivières...);
- ✓ Eaux souterraines: (Nappes phréatiques, Nappes profondes..);
- ✓ Eaux de pluie;
- ✓ Eaux saumâtres et eaux salées;

I.1.2. Les propriétés de l'eau

L'eau est une molécule composée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, sa formule chimique est H_2O . Une goutte d'eau de la taille d'une pointe d'épingle contient environ un milliard de milliards de molécules d'eau.

L'eau est, par ses propriétés électriques et sa constitution moléculaire, un solvant polaire particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solides



Figure I.2 : Molécule d'eau

L'eau est une substance chimique constituée de molécules H_2O . Ce composé est très stable et néanmoins très réactif, et l'eau liquide est aussi un excellent solvant.

Masse volumique : 997 kg/m^3

Point d'ébullition : $100 \text{ }^\circ\text{C}$

Masse molaire : $18,01528 \text{ g/mol}$

Formule : H_2O

Point de fusion : $0 \text{ }^\circ\text{C}$

Moment dipolaire : 1.8546D

Viscosité dynamique : $1,002 \times 10^{-3}$ Pa·s à 20 °C

Indice de réfraction : 1.33

Eco toxicologie : $DL_{50} > 90$ ml .Kg⁻¹

I.2. Normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

L'eau ne doit pas présenter :

1. Une coloration dépassant 15 mg/l de platine en référence à l'échelle platine/cobalt ;
2. Une turbidité supérieure à une valeur équivalente à 2 unités Jackson ;
3. D'odeur, de saveur, pour un taux de dilution de 2, à 12 degrés C, et de 3, à 25 degrés C.

I.2.1. Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux

- a) La température ne doit pas dépasser 25 degrés C.
- b) Le **pH** doit être supérieur ou égal à 6,5 unités pH et inférieur ou égal à 9 unités pH ; cette obligation ne s'applique pas aux eaux conditionnées non minérales.

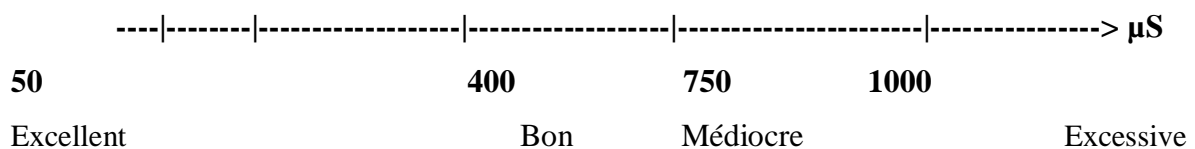
c) **Dureté / Alcalinité:**

On détermine le Titre hydrotimétrique (total) de l'eau =

$$\mathbf{TH = \Sigma TH [Ca^{2+}] + \Sigma TH [Mg^{2+}]} \quad \mathbf{(I.1)}$$

Ce TH se mesure par dosage à l'EDTA qui complexe les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le TH peut être remplacé par la Titre Alcalimétrie complet = TAC qui mesure la concentration des ions HCO_3^- mais aussi la concentration des ions CO_3 Il ne faut pas dépasser TAC = 50 degrés français.

- d) **Conductivité:** Elle se mesure en μS (microsiemens). Cela nous donne une idée générale sur la salinité et la minéralisation de l'eau.



Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

- e. Pour les substances suivantes, les valeurs des concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées ci-après :

Chlorures	200 mg/l (Cl)
Sulfates	250 mg/l (SO ₄)
Magnésium	50 mg/l (Mg)
Sodium..	150 mg/l (Na)
Potassium	12 mg/l (K)
Aluminium total	0,2 mg/l (Al)

À l'exception de eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude, pour lesquelles la valeur de 0,5 mg/l [Al] ne doit pas être dépassée.

- f. La quantité de résidus secs, après dessiccation à 180 degrés C, doit être inférieure ou égale à 1 500 mg/l.

I.2.2. Paramètres concernant des substances indésirables

- ✓ Pour les substances suivantes, les valeurs des concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées ci-après :

Nitrates	50 mg/l (NO ₃)
Nitrites	0,1 mg/l (NO ₂)
Ammonium	0,5 mg/l (NH ₄)
Azote Kjeldahl	1 mg/l (en N)
N de NO ₃ et NO ₂	exclus

- ✓ L'oxydabilité au permanganate de potassium (KMnO₄), mesurée après 10 minutes en milieu acide, à chaud, doit être inférieure ou égale à 5 mg/l en oxygène ;
- ✓ La teneur en hydrogène sulfuré doit être telle que ce composé ne soit pas détectable organoleptiquement. ;
- ✓ La valeur de la concentration en hydrocarbures dissous ou émulsionnés, après extraction au CCl₄, doit être inférieure à 10 microgrammes par litre ;
- ✓ La teneur en phénols doit être telle que les composés ne soient pas détectables organoleptiquement après ajout de chlore. En cas de détection, la concentration en phénols, exprimée en indice phénol C₆H₅OH doit être inférieur ou égale à 0,5 µg/l, les phénols naturels ne réagissant pas au chlore étant exclus ;

Pour les substances suivantes, les valeurs de concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées ci-après :

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Agents de surface réagissant au bleu de méthylène	200 µg/l (sulfate)
Fer	200 µg/l(Fe)
Manganèse	50µg/l(Mn)
Cuivre	1mg/l(Cu)
Zinc	5mg/l(Zn)
Phosphore	5 mg/l(P ₂ O ₅)
Argent	10 µg/l(Ag)

- ✓ La teneur en fluor doit être inférieure à 1500 microgrammes par litres (F) pour une température moyenne de l'aire géographique considérée comprise entre 8 degrés C et 12 degrés C et à 700 microgrammes par litres (F) pour une température moyenne de l'aire géographique considérée comprise entre 25 et 30 degrés C. Pour les températures moyennes comprises entre 12 et 25 degrés C, la teneur limite en fluor est calculée par interpolation linéaire.

I.2.3. Paramètres concernant des substances toxiques

Pour les substances suivantes, les valeurs des concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées :

Arsenic	50µg/l (As)
Cadmium	5 µg/l (Cd)
Cyanures	50 µg/l (CN)
Chrome total	50 µg/l (Cr)
Mercure	1 µg/l (Hg)
Nickel	50 µg/l (Ni)
Plomb.	50 µg/l (Pb)
Antimoine	10 µg/l (Sb)
Sélénium	10 µg/l (Se)

Hydrocarbures polycycliques aromatiques :

Pour le total des 6 substances suivantes 0,2 µg/l

- Fluoranthène ;
- Benzo (3,4) fluoranthène;
- Benzo (11,12) fluoranthène;
- Benzo (3,4) pyrène;
- Benzo (1,12) pérylène ;
- Indéno (1,3 c-d) –pyrène;
- Benzo(3,4) pyrène 0,01 µg/l.

I.2.4. Paramètres microbiologiques

- a) L'eau ne doit pas contenir d'organismes pathogènes, en particulier de salmonelles dans 5 litres d'eau prélevée, de staphylocoques pathogènes dans 100 ml d'eau prélevée, de " bactériophages fécaux dans 50 ml d'eau prélevée " et d'entérovirus dans un volume ramené à 10 litres d'eau prélevée.
- b) au moins des échantillons prélevés ne doivent pas contenir de coliformes dans 100 millilitres d'eau.
- c) L'eau ne doit pas contenir de coliformes thermo tolérants et de streptocoques fécaux, dans 100 ml d'eau prélevée.
- d) L'eau ne doit pas contenir plus d'une spore de bactéries anaérobies sulfite-réductrices par 20 ml d'eau prélevée.
- e) Lorsque les eaux sont livrées sous forme conditionnée, le dénombrement des bactéries aérobies revivifiables, à 37 degrés C et après vingt-quatre heures, doit être inférieur ou égal à 20 par millilitre d'eau prélevée ; à 22 degrés C et après soixante-douze heures, il doit être inférieur ou égal à 100 par millilitre d'eau prélevée. L'analyse est commencée dans les douze heures suivant le conditionnement.
- f) Lorsque les eaux sont livrées sous forme conditionnée, l'eau ne doit pas contenir de Pseudomonas aeruginosa dans 100 ml. "

I.2.5. Pesticides et produits apparentés

Pour les insecticides organochlorés persistants, organophosphorés et carbamates, les herbicides, les fongicides, les **P.C.B.** et **P.C.T.**, les valeurs des concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées ci-après :

- ❖ Par substance individualisée : 0,1 µg/l, à l'exception des substances suivantes :
 - a) Aldrine et dieldrine : 0,03 µg/l ;
 - b) Heptachlore et époxyde d'heptachlore : 0,03 µg/l.
- ❖ Pour le total des substances mesurées : 0,5 µg/l.

I.2.6. Paramètres concernant les eaux adoucies livrées à la consommation humaine

Les eaux adoucies livrées à la consommation humaine doivent satisfaire, en outre, aux exigences suivantes :

- La dureté totale ne doit pas être inférieure à 15 degrés français.
- L'alcalinité ne doit pas être inférieure à 2,5 degrés français.

Ces dispositions ne sont pas applicables aux eaux adoucies ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude.

I.3. Usages de l'eau et leur exigence

L'eau est nécessaire pour de nombreux usages qui dépendent de sa quantité et sa qualité. Mais certains usages peuvent avoir un impact sur la ressource et compromettre à la fois le bon fonctionnement du milieu naturel et les autres usages qui en dépendent

- ✓ Les usages de l'eau et du réseau hydrographique peuvent se classer selon leur nature :
Prélèvements : qui consomment de l'eau sans restitution directe au lieu de prélèvement.
- ✓ Altérations : qui modifient les paramètres physico-chimiques et bactériens de l'eau.
- ✓ Les autres usages qui utilisent l'eau à des fins énergétiques, de transport ou encore récréatives.

I.3. 1.L'usage agricole

L'irrigation des cultures représente 70% de l'ensemble des usages agricoles de l'eau.

Ainsi, il faut environ :

- ✓ 1500 l d'eau pour produire 1 kg de blé ;
- ✓ 4500 l d'eau pour produire 1 kg de riz ;

I.3. 2.Les usages domestiques

Chaque habitant consomme en moyenne de 150 à 200 litres d'eau par jour dont 93% pour l'hygiène corporelle, les sanitaires, l'entretien de l'habitat et les tâches ménagères. La consommation alimentaire représente 2 litres / jour / habitant.

Ainsi on consomme pour : -

- ✓ Se doucher = 60 à 80 l d'eau ;
- ✓ Tirer la chasse d'eau des toilettes = 6 à 10 l d'eau ;
- ✓ Laver une voiture = 100 à 200 l d'eau - Faire la vaisselle = 15 l d'eau.

I.3. 3.Les usages industriels

Les usages industriels (agro-alimentaire, fabrication de produits...) sont gros consommateurs d'eau. Ainsi pour il faut pour fabriquer :

- ✓ 1 automobile = environ 10 000 l d'eau ;

- ✓ 1 litre de bière = environ 5 l d'eau ;
- ✓ 1 kg de papier = environ 20 l d'eau ;

I.3.4 .Les usages énergétiques

Les centrales électriques transforment l'énergie calorifique (combustion de combustibles fossiles : gaz, fioul, charbon ou fission atomique) en énergie mécanique (machine à vapeur) puis en énergie électrique.

Le cycle de l'eau dans une centrale comprend un pompage en eau superficielle (rivière), l'injection dans un circuit de refroidissement, puis le rejet dans le milieu (rivière) ou l'évaporation. Selon la puissance de la centrale, l'eau évaporée peut se compter en m³/s.

I.4.Traitement de l'eau brute pour le rendre potable

Protéger la santé A partir des recommandations émises par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), des réglementations nationales et internationales ont été mises en place afin d'éviter la présence de micro-organismes et de substances chimiques indésirables dans l'eau potable.

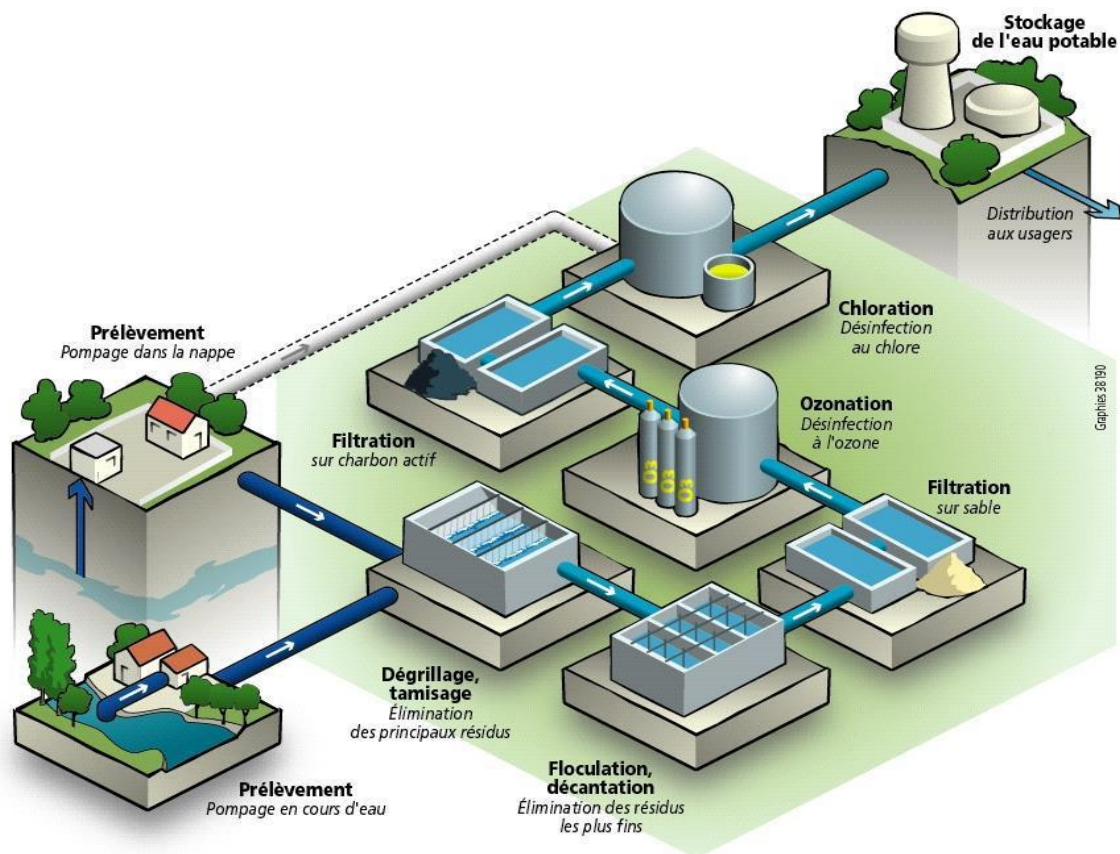


Figure I.3 : Station de traitement de l'eau



Les étapes de la production d'eau potable

L'eau brute subit donc plusieurs traitements :

1. **Dégrillage et tamisage** : L'eau est d'abord filtrée à travers une grille afin d'arrêter les plus gros déchets, puis elle passe dans des tamis à mailles fines retenant des déchets plus petits ;
2. **Clarification** : elle permet de rendre l'eau limpide en la débarrassant des petites matières en suspension qu'elle contient ;
3. **Floculation/coagulation et décantation** : Un produit chimique (chlorure de fer ou sulfate d'aluminium) est ajouté à l'eau qui provoque le regroupement (agglomération) des particules encore présentes (poussières, particules de terre, etc.). en flocons. Ceux-ci s'agglomèrent et se déposent au fond du bassin par décantation. 90 % des matières en suspension (MES) sont ainsi éliminées ;
4. **Filtration** : Pour éliminer les 10 % de **MES** restantes, l'eau traverse un filtre, lit de sable fin et/ou un filtre à charbon actif. La filtration sur sable élimine les matières encore visibles à l'œil nu. Les filtres à charbon actif retiennent en plus les micro - polluants, comme les pesticides et leurs sous produits, les composés à l'origine des goûts et des odeurs (cette filtration peut avoir lieu après la désinfection également car ils retiennent également des sous-produits de désinfection) Il existe des procédés de filtration encore plus poussés comme la filtration sur membranes ;
5. **Désinfection** : c'est la dernière étape : elle élimine tous les micro-organismes qui pourraient être dangereux pour notre santé ;
6. **Ozonation** : L'eau est désinfectée grâce à l'ozone, qui a une action bactéricide et antiviral. Ce gaz, mélangé à l'eau, agit aussi sur les matières organiques en les cassant en morceaux. Il améliore également la couleur et la saveur de l'eau ;
7. **Chloration**. Du chlore est ajouté à la sortie de l'usine de production et sur différents points du réseau de distribution afin d'éviter le développement de bactéries et de maintenir la qualité de l'eau tout au long de son parcours dans les canalisations.

I.5. Traitement des eaux usées

Les stations d'épuration sont tenues de traiter l'eau afin que lors de sa restitution dans le milieu naturel (rivière, fleuve,...) la qualité de l'eau respecte un cahier des charges en termes de **MES, pH, DCO, DBO**, azote, métaux, etc.

Ils nécessitent des étapes successives faisant appel à des procédés physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques. Les principales étapes :

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

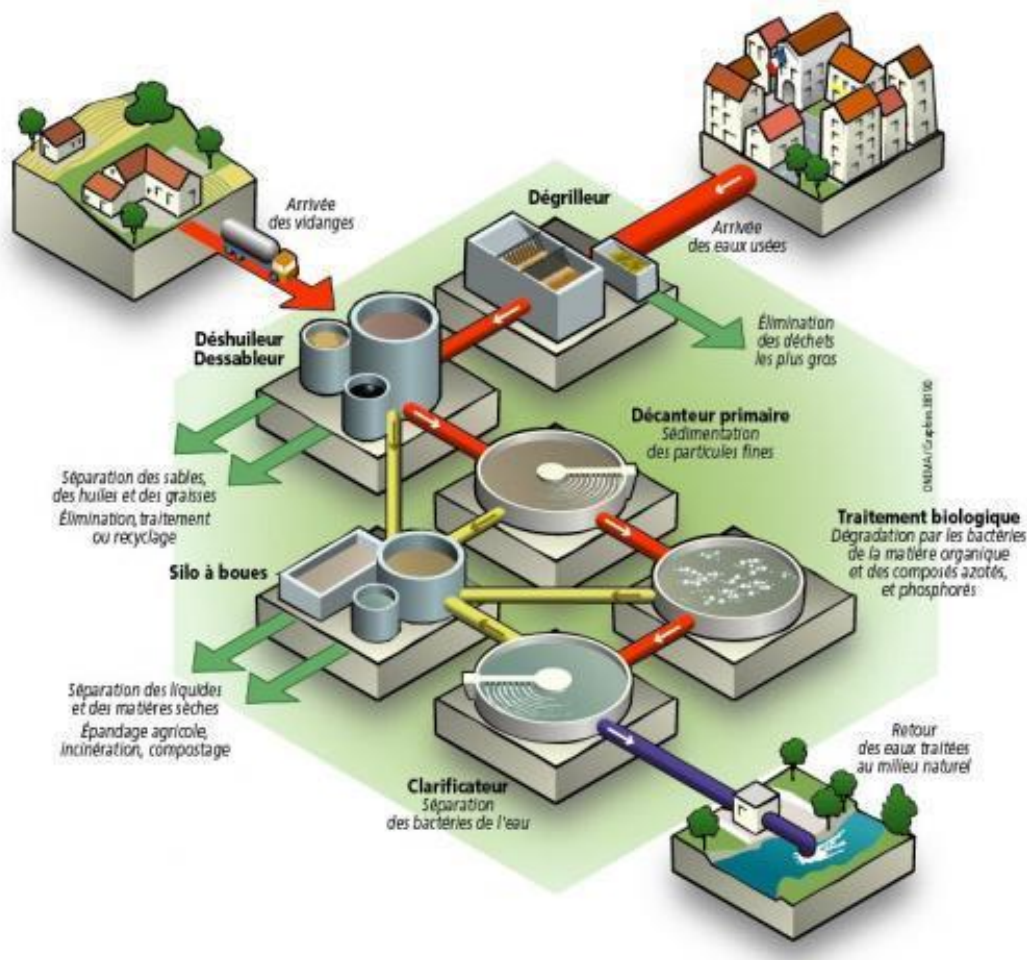


Figure I.4 : Station de traitement des eaux usées

1. **Le dégrillage** : à l'arrivée dans la station, les eaux usées passent à travers des grilles qui retiennent les déchets solides les plus grossiers (papiers, matières plastiques...). Il s'agit d'une simple étape de séparation physique ;
2. **Le dessablage** : il permet d'ôter le sable et les graviers des eaux usées, qui se déposent au fond d'un bassin où ils sont récupérés
3. **Le déshuilage et dégraissage** : l'injection de bulles d'air permet de faire remonter les huiles et les graisses en surface d'où elles sont éliminées
4. **La floculation/décantation** : ce traitement physico-chimique permet d'éliminer une forte proportion des matières en suspension.
5. **Le traitement biologique** : le cœur du traitement consiste à faire dégrader les matières organiques dissoutes par des bactéries naturellement présentes dans ces eaux. Des dispositifs d'aération permettent d'insuffler de l'oxygène aux bactéries qui se développent en se nourrissant des matières organiques.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

✚ Quelques exemples de techniques de traitement biologique :

- **Les boues activées** : ce procédé imite l'épuration naturelle observée dans les cours d'eau, en l'intensifiant : l'eau, dans laquelle on insuffle de l'air, est brassée pour faire se multiplier rapidement les microorganismes épurateurs, qui évoluent librement dans les eaux sales. Les bactéries ainsi sollicitées sont ensuite séparées de l'eau par décantation ;
 - **Le lagunage** : ce procédé, plus rustique, revient à laisser faire la nature, en exposant les eaux usées à la lumière du soleil dans une série de bassins de faible profondeur. Les micro algues vivant dans ces eaux s'y développent. Elles dégagent ainsi de l'oxygène qui, ajouté à celui qui s'échange entre l'air et l'eau permet aux bactéries épuratrices de vite se reproduire ;
6. **Les biofiltres** : ce procédé s'inspire de l'épuration naturelle opérée par les sols l'eau usée passe à travers une couche formée de petites billes sur lesquelles les microorganismes épuratoires de cette eau affectionnent de se fixer. Le système est aéré artificiellement ;
 7. **La clarification** : elle permet de séparer par décantation l'eau des bactéries qui forment des boues. Les eaux clarifiées sont acheminées vers une canalisation de sortie tandis que les boues sont évacuées vers la filière de traitement des boues. L'eau qui sort d'une station de traitement des eaux usées n'est pas potable car elle contient encore des polluants et une charge microbienne résiduelle de faible concentration, que le milieu récepteur est en mesure de traiter naturellement.

II.1. La Coagulation –Floculation –Décantation-Filtration

La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont dues à la présence de particule de très faibles diamètres : les colloïdes. La Coagulation et la Floculation sont des processus qui permettent l'élimination des colloïdes. Leur élimination ne peut se baser sur la simple décantation et une filtration pour clarifier le liquide.

- **La Coagulation** :consiste à déstabiliser les colloïdes et neutraliser les champs électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre.
- **La Floculation** : rend compte de leur agglomération en agrégats éliminés par décantation et ou la filtration
- **La décantation** : est une technique de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation –floculation
- **Filtration** : est un procédé destiné à clarifier un liquide qui contient des MES en le faisant passer à travers un milieu poreux constitué d'un matériau granulaire

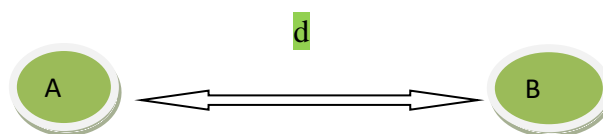


Figure II.1 : Phénomène de la coagulation- Floculation

II.2. Phénomène de la coagulation

Il apparait évident que la stratégie d'élimination des colloïdes passe par l'annulation du potentiel zêta. (Le potentiel zêta représente la charge électrique qu'une particule acquiert grâce aux ions qui l'entourent quand elle est en solution).En effet ,la neutralisation des charges primaires d'annuler les forces de répulsion .

On considère deux particules colloïdales A et B de diamètres D et distances d'une valeur d .Entre ces deux particules, il existe des force de répulsion électrostatiques et des forces d'attraction intermoléculaires.



Les charges primaires négatives A et B engendrent des forces de répulsion pour des distances inférieures à leur propre diamètre.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Les forces d'attraction sont celles de VAN DER WALLS. Elles englobent trois types d'interactions :

- ✓ Les interactions dipôle- dipôle dues aux moments dipolaires des particules ;
- ✓ L'effet d'induction entre particule polaire et polarisable ;
- ✓ L'effet de dispersion du aux moments dipolaires instantanés des colloïdes

II.2.1. Réactifs utilisés

L'efficacité des coagulants est directement liée à la valence des cations utilisés .Les ions monovalents sont moins efficaces que les bi ou trivalents.

Il est évident que les doses de coagulant à mettre en œuvre sont fonction de leur efficacité relative .En conséquence, les coagulants utilisés sont des sels cationiques trivalents.

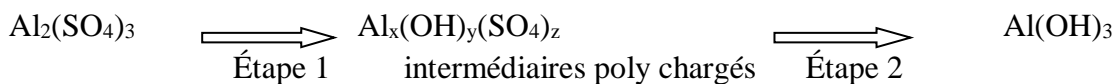
❖ Coagulants utilisés

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et pour produire un floc sont

- Le sulfate d'alumine, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$;
- l'aluminate de sodium, NaAlO_2 ;
- Le chlorure d'aluminium, AlCl_3 ;
- Le chlorure ferrique. FeCl_3 ;
- Le sulfate ferrique. $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$;
- Le sulfate ferreux, FeSO_4 ;
- Le sulfate de cuivre. CuSO_4 ;
- Les polyélectrolytes.

➤ Sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

La mise en solution d'un coagulant se déroule en deux étapes : Cas du sel $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sulfate d'aluminium



- L'étape 1 dépend de la température et nécessite un pH compatible avec l'existence de ces intermédiaires poly chargés .Le temps de formation de ces composés est de l'ordre de 0.1s.
- L'étape 2 permet la formation du précipité $\text{Al}(\text{OH})_3$.Cette réaction dépend de l'agitation du milieu .Ce précipité est l'élément qui assure le pontage et la coalescence entre les colloïdes déstabilisés .La fourchette du pH est de l'ordre 5.8 et 7.2

➤ Chlorure ferrique FeCl_3

Le chlorure ferrique possède une fourchette du pH plus large compris entre 5.5 et 8.3 Toute fuite de Fe^{3+} peut entraîner une coloration rouge de l'eau et une corrosion sur le réseau de distribution.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Tableau 1 : Pertes d'alcalinité et production du CO₂ de quelques coagulants

Nom commercial	Perte d'alcalinité En g de CaO	Perte de TAC en °F	Production de CO ₂
Sulfate d'aluminium	25	4.5	40
Chlorure ferrique	21.1	9	33.6
Clairtan FeClSO ₄	20.1	3.6	31.6

II.3. Phénomène de la Flocculation

Après avoir été déstabilisées par la coagulation, les particules colloïdales s'agglomèrent lorsqu'elles entrent en contact. C'est la flocculation. Le floc ainsi formé peut décanter, flotter ou filtrer.

L'expression de SMOLUCHOWSKI permet de comprendre ce phénomène. La flocculation est la suivante :

$$\frac{\ln N}{N_0} = -4/\pi\alpha\Omega G t \quad (\text{II.1})$$

- N et N^o sont les nombres de particules colloïdales libres à l'instant t et t₀ ;
- α représente le facteur de fréquence de collision efficace ;
- Ω est le volume de particules par volume de suspension ;
- G est le gradient de vitesse ;
- t est le temps de contact

Si α = 1, un choc inter particulaire donc une agglomération donc une flocculation.

La stratégie pour obtenir une bonne flocculation se résume en une augmentation des facteurs temps de contact t, du volume de particule Ω et gradient de vitesse G.

La flocculation est de qualité si le rapport $\frac{\ln N}{N_0}$ est petit dans ce cas N < N₀. Il ya donc moins de particules libres au temps t qu'au temps t₀.

Le rapport $\frac{\ln N}{N_0}$ diminue en raison du signe moins.

II.4. Technologie de la Coagulation - Flocculation

Il faut associer dans un temps assez court, deux phase distinct et incompatibles. En effet la coagulation est différente celle de la flocculation. On distingue les deux phases suivantes

- ✓ 1^{ère} phase : mélange rapide et vigoureux.
- ✓ 2^{ème} phase : mélange lent

Dans un premier temps, un mélange rapide est nécessaire pour disperser les additifs dans la totalité du volume d'eau à traiter.

La deuxième phase favorise les contacts entre les particules de floc sans les léser. Le mélange doit être assez énergétique pour engendrer des différentes vitesses dans le bassin.

II.5. Décantation

Ces procédés sont des méthodes de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc. Lorsqu'une particule grenue est laissée dans un liquide au repos, elle est soumise à une force motrice F_M (pesanteur diminuée de la poussée d'Archimède) et à une force résistante F_T (traînée du fluide) résultante des forces de viscosité et d'inertie :

$$F_M = gV_p \rho_L \Delta_p \tag{II.2}$$



$$F_T = C.S. \rho_L.V^2/2 \tag{II.3}$$

$$\Delta_p = \rho_p - \rho_L \tag{II.4}$$

$\rho_p - \rho_L$: masses volumiques de la particule grenue et du fluide ;

d, s, v : diamètre ,surface projetée (maitre couple $\pi d^2/4$ pour une sphère) et volume de la particule grenue ;

V : vitesse de décantation de la particule ;

G ; accélération de la pesanteur;

C : coefficient de traînée (adimensionnel) ;

Très vite un équilibre ($F_M = F_T$) s'établit et la décantation de la particule assimilée à une sphère se fait à une vitesse V_0 tel que :

$$V_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g d}{C} \frac{\Delta_p}{\rho_L}} \tag{II.5}$$

La force résultante en est la différence STOKES a établi à partir de ces données, la loi qui permet de calculer la vitesse de chute V_p d'une particule

$$V_p = \frac{g(\rho_p - \rho_l) \cdot d^2}{18\eta} \tag{II.6}$$

η : viscosité dynamique de l'eau

Les paramètres sur lesquels on peut influencer pour modifier la vitesse V_s sont peu nombreux. La floculation se justifie car elle provoque l'augmentation du diamètre apparent des particules. Leur densité peut être modifiée par l'emploi de micro sable injecté en tête de décanteur.

On peut alors poser que la densité d de l'eau est égale à 1 .Il faut noter que les densités du sable et du floc, sont respectivement de 2650 kg/m^3 et 1004 kg/m^3 .La faible différence entre l'eau et le floc pose des problèmes pour la décantation.

II.6. Filtration

La filtration est un procédé destiné à clarifier un liquide qui contient des MES en le faisant passer à travers un milieu poreux constitué d'un matériau granulaire.

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

- **Tamissage mécanique** : il s'agit de la rétention des particules plus grosses que la maille du filtre ou que celle des éléments déjà déposés formant eux-mêmes matériau filtrant. Ce phénomène intervient d'autant plus que la maille du matériau filtrant est plus fine : il est de peu d'importance pour un lit filtrant composé de matériau relativement grossier, en revanche il est prépondérant dans une filtration sur support mince : tamis, manchon filtrant...
- **Rétention dans les espaces inter granulaires** : la taille de la particule comparée à celle des pores, pourrait lui permettre de traverser le matériau filtrant sans être arrêtée et pourtant, lors de sa trajectoire tortueuse dans le lit, des zones de moindre courant et des contacts particule/matériau vont permettre sa capture. C'est un mécanisme très important dans la filtration en profondeur.
- ✓ **Filtration en profondeur (Perte de charge)**: Au cours de sa percolation au travers d'un lit filtrant granulaire, l'eau subit par frottement une perte d'énergie, c'est-à-dire de pression, appelée perte de charge. Celle-ci est régie à faible vitesse (écoulement en régime laminaire) par la loi de Darcy :

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\mu}{K} V = R \cdot \mu \cdot V \quad (\text{II.7})$$

$$R = \frac{1}{K} = \frac{\Delta P}{H} \cdot \frac{1}{V\mu} \quad (\text{II.8})$$

où V : vitesse de filtration,

K : perméabilité de la couche filtrante,

ΔP : perte de charge à travers la couche filtrante,

H : hauteur de couche considérée,

μ : viscosité dynamique de l'eau,

R : résistance à la filtration de la couche filtrante.

La perte de charge ΔP est proportionnelle à la vitesse de filtration V , à la viscosité dynamique de l'eau, à la hauteur de couche et inversement proportionnelle à la perméabilité du milieu filtrant (ou directement proportionnelle à la résistance de ce milieu).

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

La formule de **Kozeny** (ou **Kozeny-Carman**) précise celle de Darcy en faisant apparaître l'influence de la porosité du milieu filtrant et de la surface spécifique des grains :

$$\Delta P/H = K\mu/\rho g. (1 - \epsilon)^2 / \epsilon^3 (a/v)^2 .V \quad (\text{II.9})$$

avec en plus des définitions ci-dessus :

k : constante de Kozeny (environ 5),

ρ : masse volumique du fluide,

g : accélération de la pesanteur,

ϵ : porosité du milieu filtrant,

a/v : surface spécifique par unité de volume des grains filtrants de diamètre d, soit $6/d$ pour un grain sphérique.

Pour de plus fortes vitesses, en courant descendant ou ascendant (par exemple lavage ou approche de la fluidisation), on passe en régime transitoire ou turbulent. On doit alors appliquer la formule d'**Ergun**, dérivée de celle de **Kozeny** en modifiant k et en lui ajoutant un terme correctif représentatif de la perte d'énergie cinétique dans le milieu : avec $k_1 = 4,17$, $k_2 = 0,3$ (grains ronds) à 0,48 (grains concassés).

- ❖ **L'analyse granulométrique** : L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm.

On appelle :

- REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions

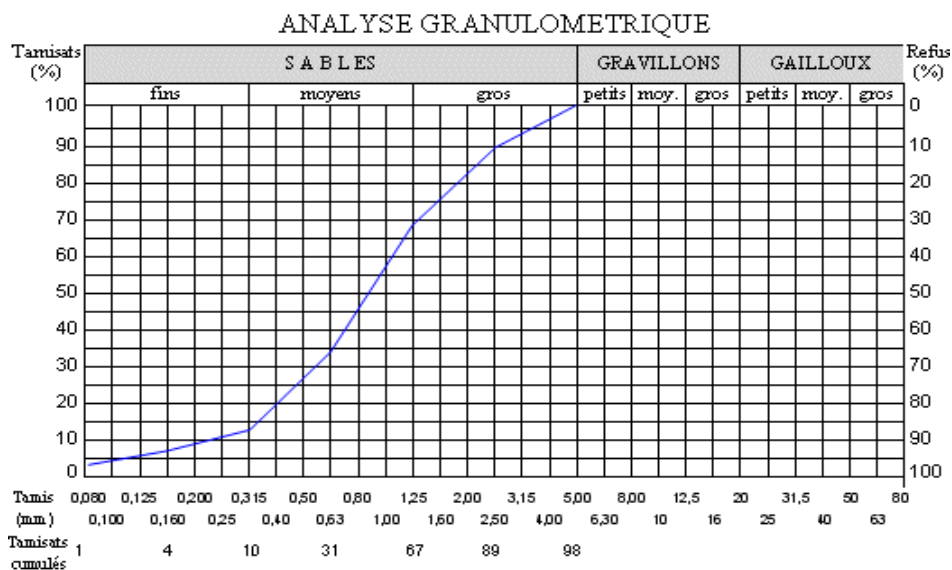


Figure II .2 : Courbe granulométrique

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Il est important de connaître la taille du plus petit et du gros grain afin de déterminer l'homogénéité du matériau.

$$CU = TE60/TE10 \quad (II.10)$$

CU : Coefficient uniforme

TE : Taille effective qui correspond à l'ouverture de la maille laissant passer 10% du matériau. La connaissance de ce paramètre permet de savoir que 90% de la masse des grains ont un diamètre

Tableau II.2 : Propriétés des matériaux filtrants

Matériau	Forme	Densité	Dureté	Porosité	Diamètre
Sable de silice	Arrondie	2.6	7	42	0.4 -1.0
Sable de silice	Non Arrondie	2.6	7	44	0.4 -1.0
Anthracite	Anguleuse	1.5	3	55	0.4 -1.0

II.6.1.Choix du mode de filtration

Le choix entre les divers types de filtration sur support ou sur lit granulaire dépend de plusieurs critères :

Débit de filtration

Il correspond à la quantité de filtrat captée pendant une unité de temps. La formule de poiseuille permet théoriquement de le déterminer est :

$$V = N. \Delta P.R^4/ 8. \eta.L \quad (II.11)$$

V, débit en ml/min ;

N, nombre de canaux (proportionnel à la surface) ;

ΔP , différence de pression entre les deux faces du filtre ;

R, rayon moyen des pores ;

L, épaisseur du filtre.

Le débit augmente avec la surface, la pression et le diamètre des pores. Il diminue avec la viscosité du fluide et l'épaisseur du filtre. Ce débit n'est pas constant, car il se produit un phénomène de colmatage. Le colmatage ralentit la filtration par augmentation de l'épaisseur du filtre, mais aussi par réduction du diamètre des pores.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

- ✓ Caractéristiques du liquide à filtrer, de ses impuretés et de leur évolution dans le temps ;
- ✓ Qualité du filtrat à obtenir et tolérances admises ;
- ✓ Conditions d'installation ;
- ✓ Possibilités et moyens disponibles pour le lavage.

La possibilité d'un lavage aisé, efficace et économique est aussi importante dans le choix du filtre que l'obtention de la meilleure qualité de filtration, étant donné que cette dernière ne se conserve dans le temps que si le lavage permet de retrouver en début de chaque cycle les caractéristiques d'un filtre propre.

Chapitre III : Les traitements de finition

III.L'adsorption et échange d'ion

III.1.Généralité

Les dispositifs d'adsorption traitent l'eau en y ajoutant une substance, par exemple du charbon ou de l'alumine actifs. Les adsorbants attirent les contaminants par des processus chimiques et physiques qui les font 'coller' à leur surface. L'adsorbant le plus employé est le charbon actif, il est similaire au charbon ordinaire mais extrêmement poreux. Le charbon actif en poudre est souvent utilisé pour régler des problèmes temporaires de qualité de l'eau. Le charbon actif en granulé est souvent arrangé en une couche traversée lentement par l'eau de source. Le traitement à l'alumine activée est destiné à attirer et éliminer les contaminants comme l'arsenic et le fluorure, aux ions négatifs. Cette option est cependant coûteuse et sa maintenance peut être complexe.

L'eau doit aussi subir un ajustement du pH avant la colonne d'adsorption, et d'importants résidus d'aluminium posent fréquemment des problèmes. Des bases et des acides sont nécessaires à cette régénération. L'échange des ions emploie une résine qui élimine les contaminants minéraux chargés comme l'arsenic, le chrome, le nitrate, le radium, l'uranium. Il fonctionne au mieux avec une eau dégagée de toutes particules et peut être aisément adapté à toutes les tailles de des usines de traitement. L'échange d'ions est employé principalement pour éliminer les ions du calcaire (résine de cation) ou les nitrates (résine d'anion). Dans les deux cas, on le renouvelle avec de l'eau salée. L'échange d'ions pour éliminer les radionucléides est compliqué du fait que ces matériaux s'accumulent dans la résine et se trouvent en fortes concentrations dans le régénérant.

III.2.Définition d'adsorption

L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des ions ou des molécules (gaz, métaux, molécules organiques...) d'une manière plus ou moins réversible. Il y a transfert de matière de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface solide.

- ❖ La capacité d'adsorption du solide dépend :
 - De la surface développée ou surface spécifique ($m^2 \cdot g^{-1}$) du matériau. Certains solides dans les milieux naturels (argiles, silice...) possèdent des surfaces spécifiques élevées variables avec l'état physico- chimique du milieu aqueux (pH, nature des cations liés). Ainsi certaines argiles comme les bentonites (Montmorillonite par exemple) ont une surface, accessible à la plupart des molécules, variant de 40 à 100 $m^2 \cdot g^{-1}$

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

- Les adsorbants industriels (essentiellement **les charbons actifs**) développent des surfaces spécifiques bien supérieures (600 à environ $2\,500\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$),
- De la **nature de la liaison adsorbat-adsorbant**, c'est-à-dire de l'énergie libre d'interaction G entre les sites d'adsorption et la partie de la molécule en contact avec la surface. les forces attractives de Van der Waals et les forces électrostatiques (Coulomb) sont à l'origine de l'adsorption.
- Du **temps de contact** entre le solide adsorbant et les solutés : c'est le temps fourni pour permettre aux polluants de migrer jusqu'à la surface du charbon.

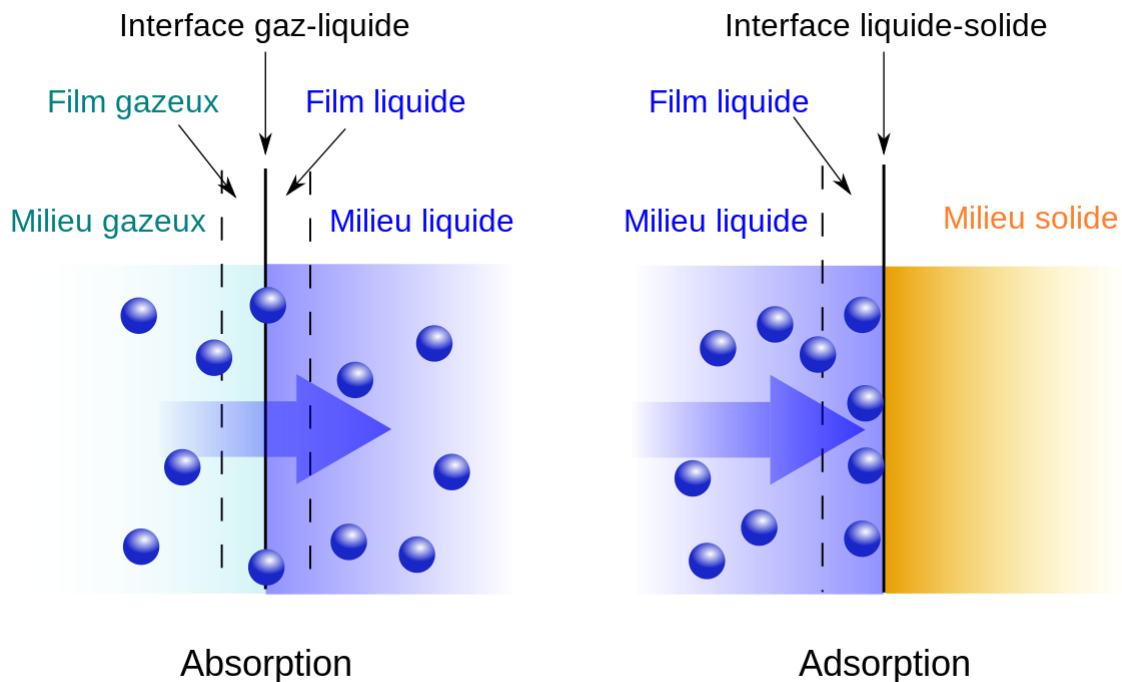


Figure III.1 : phénomène d'adsorption

La masse adsorbée de polluant par unité de masse d'adsorbant dépend de la concentration du polluant en phase aqueuse. À l'équilibre il y a échange dynamique entre les molécules de la phase adsorbée et celles restant en solution. De nombreuses théories ont tenté de modéliser la relation existant entre la quantité de molécules adsorbées ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ou $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) et la quantité restant en phase aqueuse à l'équilibre. Une des plus employées dans le domaine de l'adsorption sur les charbons actifs est la loi de Freundlich qui établit que :

$$\mathbf{X/m = K C_e^{1/n}} \quad \mathbf{(III.1)}$$

Où

- X/m est la masse fixée de soluté par unité de masse d'adsorbant ;
- C_e la concentration à l'équilibre dans la phase aqueuse des molécules de polluants;

- K et n sont des constantes énergétiques fonctions du couple adsorbat/adsorbant pour une température donnée maintenue constante pendant l'expérience.

III.3. Echange d'ion

III.3.1. Principe

Les échangeurs d'ions sont des substances granulaires insolubles, comportant dans leur structure moléculaire des radicaux acides ou basiques susceptibles de permuter, sans modification apparente de leur aspect physique, et sans altération ou solubilisation, les ions positifs ou négatifs, « fixés » sur ces radicaux, contre des ions de même signe se trouvant en solution dans le liquide à leur contact. Les échangeurs d'ions ont d'abord été des terres naturelles (zéolites), puis des composés synthétiques minéraux (silico-aluminates) puis organiques, ces derniers étant presque exclusivement employés actuellement sous le nom de résines.

❖ **Les résines de type gel ont une structure homogène.**

Les résines à squelette de type macroporeux comportent une porosité obtenue par l'addition d'un solvant porogène. Les macropores obtenus créent une discontinuité dans la structure cristalline qui devient opaque à la lumière. Les résines macroporeuses sont fortement réticulées et présentent une meilleure capacité d'adsorption et de désorption des matières organiques

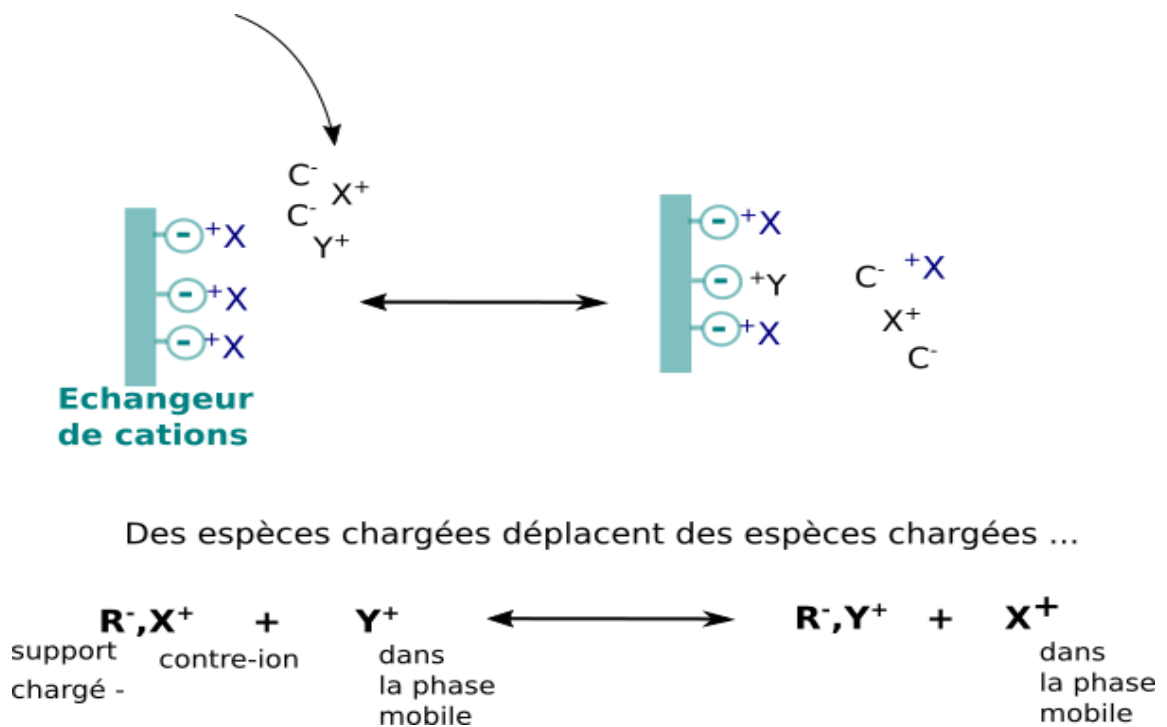


Figure III.2 : Schéma représentative d'échangeur de cations

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Par convention une résine ayant des sites actifs greffés anioniques est appelée résine cationique puisqu'elle permettra d'échanger les cations... et vice versa et l'on note cette résine R-Ca ou R-Na selon qu'elle est chargée d'ions Ca^{2+} ou Na^+ .



La régénération de la résine saturée s'effectue avec du chlorure de sodium (NaCl) équivalent au sel de table mais présenté sous forme de pastilles de 15 sur 25 mm. Les ions sodium se fixent à nouveau sur la résine tandis que les ions calcium et magnésium sont évacués à l'égout sous forme de chlorure de calcium et de magnésium. Le cycle se reproduit périodiquement en fonction d'intervalles de durées préétablies ou du volume d'eau que l'adoucisseur peut traiter.

La capacité de traitement entre 2 régénérations se calcule comme suit :

$$\text{Capacité cyclique en } \text{°F/ m}^3 = \text{Dureté totale en } \text{°F} - \text{Dureté résiduelle}$$

- ✓ **Régénération chronométrique:** Ce cycle entre deux régénérations est fixe. La régénération se fait à l'heure fixe et quelque soit la consommation en eau adoucie. Le système est utilisable sur les installations où la consommation d'eau est pratiquement constante (par exemple les habitats collectifs).
- ✓ **Régénération volumétrique:** La régénération est lancée en fonction du volume d'eau traitée par l'adoucisseur. Le volume d'eau traitée est communiqué soit par une turbine, soit par un compteur émetteur d'impulsions. Les adoucisseurs à régénération volumétrique à turbine intégrée permettent d'optimiser la consommation de sel en fonction de la quantité d'eau produite en évitant l'emploi de compteur émetteur d'impulsions et de coffret électronique qui augmentent sensiblement le coût d'investissement
- ❖ **Exemple : R-Na : échangeur de cations, forme sodique**

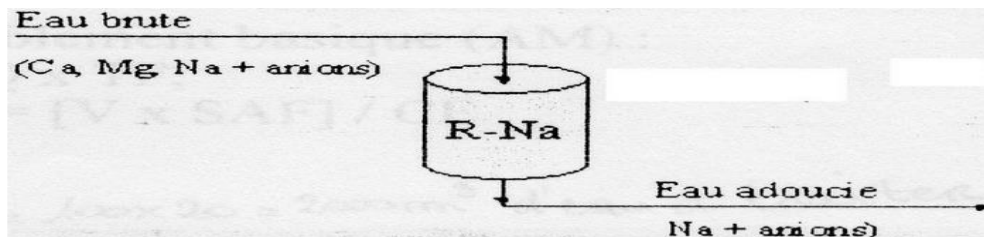


Figure III.3 : Schéma d'échangeur de cations forme sodique

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Calculs d'une installation de déminéralisation (volumes de résine)

Les éléments suivants sont, en principe, nécessaires et suffisants au calcul des volumes de résine (cation & anion) :

- Débit horaire (Q, m³),
- Temps de fonctionnement, 1 cycle (TF, en heures),
- Volume total d'eau à traiter (V, en m³),
- SAF (sels d'acides forts, définitions) de l'eau "brute" , en °F/litre d'eau, par exemple,
- TAC de l'eau "brute", en °F/litre, par exemple
- Teneur en silice (SiO₂), en °F/litre, par exemple,
- Capacité d'échange de la résine (CE, en °F/litre de résine).

A. Échangeur d'anions.

- **VRa (volume de résine Anionique), en litres.**

- **Résine faiblement basique (AM) :**

$$V = Q \times TF, \quad \text{(III.3)}$$

$$VRa = [V \times SAF] / CE \quad \text{(III.4)}$$

- **Résine fortement basique (AF) :**

$$V = Q \times TF, \quad \text{(III.5)}$$

$$VRa = [V \times (SAF + TAC + SiO_2)] / CE \quad \text{(III.6)}$$

B. Echangeur de cations.

- **VRC (volume de résine Cationique), en litres.**

- ✓ La salinité totale de référence s'obtient en additionnant TAC et SAF,
- ✓ V_{Rc} : volume de résine cationique, en litres.

- **Résine fortement acide (CF) :**

$$V = Q \times TF \quad \text{(III.7)}$$

$$VRC = [(V + (0,02 \times VRa)) \times (TAC + SAF)] / CE \quad \text{(III.8)}$$

III.4. La désinfection

III.4.1. Définition

La désinfection est l'étape ultime du traitement de l'eau de consommation avant distribution. Elle permet d'éliminer les micro-organismes pathogènes de l'eau. Il peut subsister dans l'eau quelques germes banals, car la désinfection n'est pas une stérilisation (Stérilisation = destruction de tous les germes présents dans un milieu)



La désinfection des eaux comporte deux étapes importantes, correspondant à deux effets différents d'un désinfectant donné.

- ✓ **Effet bactéricide** : c'est la capacité de détruire des germes à une étape donnée du traitement.
- ✓ **Effet rémanent** : c'est un effet du désinfectant qui se maintient dans l'eau, en particulier dans le réseau de distribution, et qui permet de garantir la qualité bactériologique de l'eau jusqu'au robinet du consommateur :

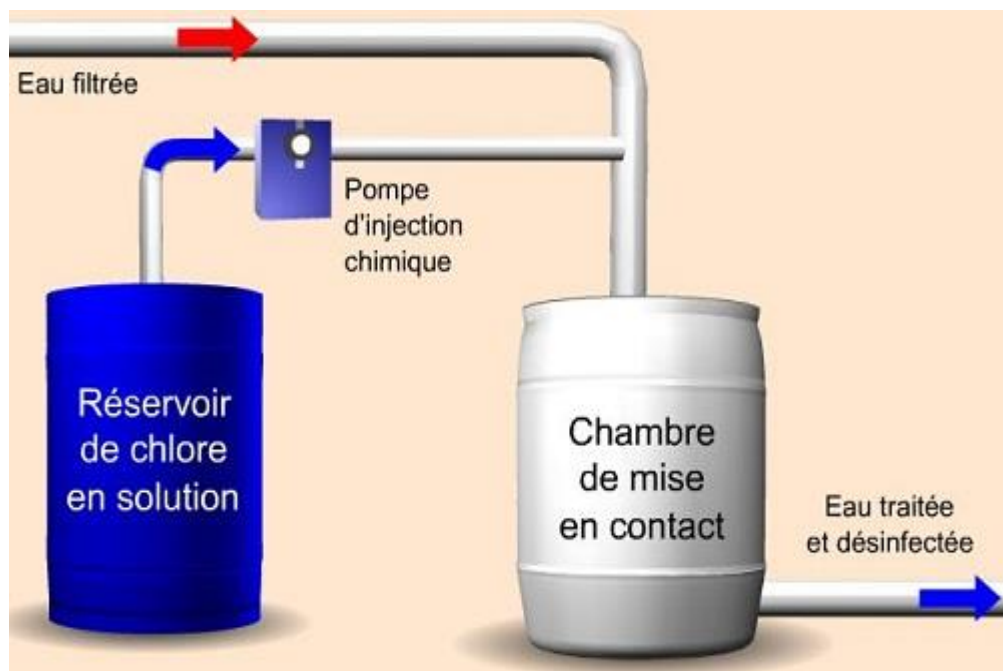


Figure III.4 : La désinfection au chlore

❖ Conditions générales pour une bonne désinfection

Pour être efficace, la désinfection doit être effectuée sur une eau de bonne qualité. La teneur en matières en suspension doit être aussi réduite que possible, et au maximum égale à 1 mg/L. En effet, les bactéries et surtout les virus s'agglomèrent sur les MES, qui les protègent de l'effet des désinfectants.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

- ✚ La teneur en **MO**, **COT**, et surtout en **COA** ou **CODB** doit être la plus faible possible, sinon l'eau va consommer le résiduel du désinfectant, ce qui :
 - ✓ Entraînera un surdosage de ce réactif ;
 - ✓ Rendra difficile le maintien d'un résiduel dans le réseau sauf rajouts en différents points de celui-ci ;
 - ✓ Permettra des reviviscences bactériennes en cours de distribution ;
 - ✓ Fera apparaître des sous-produits nuisibles.

Comme vu à la section notions fondamentales sur la désinfection, une bonne désinfection via les réactifs oxydants demande la combinaison d'une concentration résiduelle **C** avec un temps de contact **T** ; c'est le facteur **C.T** :

$$C(\text{mg/l}) * T(\text{min}) = C.T(\text{mg.min/l}) \quad \text{(III.10)}$$

➤ Chlore

Le maintien d'un taux de 0,5 mg.L⁻¹ de chlore libre, pendant un temps de contact de 30 min (C.T = 15) 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 (C.T = 3) assure une protection efficace. L'effet rémanent est important. Mais il n'est pas souhaitable, et même interdit dans certains pays comme la France, 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.

✚ Titre d'une eau de Javel :

Le degré chlorométrique (**°Chl**) : donne le pouvoir oxydant d'un litre d'eau de Javel, à 20°C, exprimé en litres de dichlore gazeux sous 1 bar et à 0°C. Il correspond au dichlore gazeux utilisé pour fabriquer l'eau de Javel. Cette définition était utilisée essentiellement dans les pays francophones. Le % de chlore actif : au niveau européen, a été retenue cette définition, anglo-saxonne, du titre d'une eau de Javel. Il rend compte de la quantité totale de dichlore utilisé lors de la fabrication de l'eau de Javel. Toutefois, le % de chlore actif, pour une même qualité d'eau de Javel, dépend de la masse volumique de l'eau de Javel qui elle-même varie avec le mode de préparation de l'eau de Javel. En effet, l'eau de Javel préparée

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

par dilution d'eau de Javel à 24 – 26 % de chlore actif est moins dense (une partie des ions Na^+ et Cl^- a été retirée) qu'une eau de Javel préparée directement.

L'expression chlore actif désigne le chlore de l'hypochlorite, de nombre d'oxydation +I, qui est effectivement actif, mais aussi le chlore, de nombre d'oxydation -I, inactif comme oxydant, présent sous forme d'ions Cl^- . L'expression chlore actif est donc, malgré son utilisation généralisée en Europe, impropre. La correspondance entre °Chl et % de chlore actif peut être obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$\% \text{ chlore actif} = 0,3165(\text{°Chl} / d) \quad (\text{III.11})$$

Avec d = densité de l'eau de Javel

Normalisation :

- Les concentrés de Javel ont une concentration $> 8,5$ % de chlore actif.
- L'eau de Javel a une concentration comprise entre 2,5 et 8,5 % de chlore actif.

➤ Ozone

Le maintien d'un taux de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ pendant 4 min ($\text{C.T} = 1,6$) est recommandé pour l'élimination des bactéries pathogènes et des poliovirus. A 5°C un C.T égal à 2.

➤ Rayonnement UV

Ses effets ont été décrits à la section la désinfection par ultraviolets ainsi que les doses recommandées en fonction de la transmittance des eaux traitées, des micro-organismes visés et du rendement d'élimination recherché. En désinfection d'eau potable, vu les très bonnes transmittances ($\text{tr} > 90\% \text{ m}^{-1}$) sur des eaux $< 1 \text{ NTU}$, des doses de 20 à 40 mJ/cm^2 sont recommandable et l'emploi de systèmes utilisant des lampes moyenne pression s'impose (faible nombre de lampes – faible encombrement...),

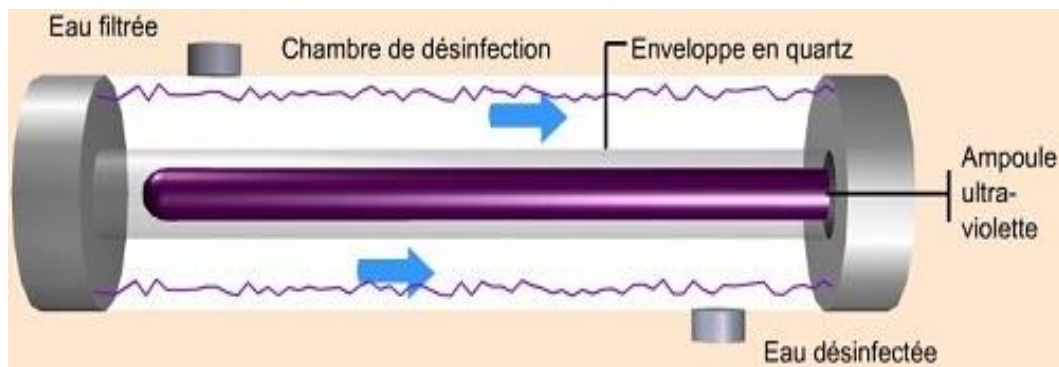


Figure III.5: La désinfection au Rayonnement UV

III.4.2. Avantages et inconvénients :

Seul désinfectant sans sous-produit dommageable et efficace pour l'inactivation de tous les micro-organismes y compris des kystes de protozoaire, le rayonnement UV a, si l'on n'y prend garde, deux inconvénients : Il n'y a pas de possibilité de vérifier l'efficacité de la dose délivrée par la mesure d'un résiduel comme dans le cas des oxydants chimiques ; il est donc indispensable que le réacteur soit muni de capteurs UV (si possible 1 capteur par lampe) permettant de contrôler en continu le rayonnement réellement émis par les lampes, ceci afin de :

- suivre le vieillissement normal de celles-ci (compensé par une augmentation du courant appliqué à la lampe) ;
- être prévenu instantanément d'une éventuelle défaillance de l'une d'elles pour mettre en service automatiquement un réacteur de réserve ou intervenir de suite pour changer la lampe défaillante (quelques minutes d'arrêt seulement) ;
- sans effet rémanent, et sauf réseau court ou particulièrement bien entretenu, il doit être couplé avec l'injection d'un autre désinfectant à effet rémanent (Cl_2 - ClO_2 - chloramine). Le réacteur UV sera donc installé après affinage mais avant l'injection de ce dernier réactif.

III.5. Adoucissement de l'eau par précipitation chimique

L'adoucissement de l'eau consiste à échanger les ions calcium et magnésium, peu solubles et qui sursatureraient avec les carbonates de l'eau pour former du calcaire, contre les ions sodium qui sont parfaitement solubles dans l'eau. On nomme cette opération « échange ionique »

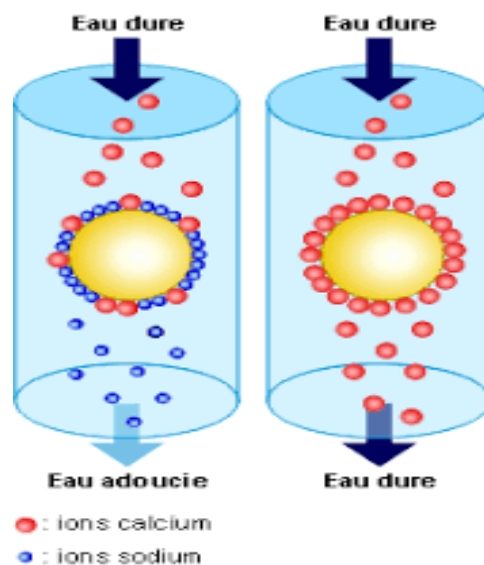


Figure III.6 : Schéma représentative adoucisseur d'eau

III.5.1. Les différents types de titre hydrotimétrique

Il est possible de calculer différentes sortes de TH :

- **Le TH total** : il prend en compte la totalité des sels de calcium et magnésium. Il s'agit du TH auquel on fait le plus référence, notamment lorsque l'on évoque la dureté de l'eau.
- **Le TH calcique** : il correspond à la totalité des sels de calcium.
- **Le TH magnésien** : il correspond à la totalité des sels de magnésium.
- **Le TH temporaire** : aussi appelé dureté carbonatée, il correspond à la concentration en carbonates et bicarbonates de calcium dans l'eau.
- **Le TH permanent** : aussi appelé dureté non carbonatée, il correspond à la teneur en sulfates, nitrates et en chlorure de calcium de l'eau.

Rappel :

- La dureté totale de l'eau (ou Titre Hydrotrimétrique, TH) exprime la minéralisation en sels d'acides faibles et forts, c'est-à-dire les carbonates, bicarbonates, sulfates et chlorures de calcium et magnésium.

La duré totale = la dureté permanente + la dureté temporelle

$$\text{TH} = \Sigma \text{TH} [\text{Ca}^{2+}] + \Sigma \text{TH} [\text{Mg}^{2+}] \quad (\text{III.12})$$

- La dureté carbonatée exprime les sels d'acides faibles et les bases : carbonates et bicarbonates de calcium et magnésium.

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] \quad (\text{III.13})$$

III.5.21. Unités d'expression

Mesurant des ions différents (calcium, de masse moléculaire 40 grammes et magnésium, de masse moléculaire 24 grammes), le TH ne peut s'exprimer avec l'unité habituellement utilisée en hydrologie, à savoir le milligramme par litre (mg/l) ou l'un de ses multiples.

En revanche, il pourrait être exprimé dans l'unité internationale, la mole par kilogramme (mol/kg). Il est toutefois plus habituel d'utiliser le milliéquivalent par litre (méq/l) ou le degré :

- **Le degré français (°f)** — à ne pas confondre avec **le degré Fahrenheit (°F)** —, correspond à une concentration de 10 milligrammes de carbonate de calcium (CaCO_3) par litre d'eau (c'est-à-dire la concentration en calcaire) ;

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

- le degré allemand ($^{\circ}\text{GH}$, pour *GesamtHärte*) équivaut à 10 mg d'oxyde de calcium (CaO) par litre ;
- le degré américain ($^{\circ}\text{TH}$, pour *Total Hardness*) équivaut à 10 milligrammes d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) par litre.



Figure III.7 : Classification arbitraire du titre Hydrotimétrique (TH)

En chaudière, dans le cas d'un traitement de l'eau d'alimentation par simple adoucissement, les bicarbonates de sodium de l'eau permutée se décomposent en carbonate et en hydroxyde, d'où l'augmentation très rapide de l'alcalinité et par suite des purges de déconcentration, formation considérable d'une quantité d'acide carbonique qui attaque tous les circuits de vapeur et d'eau condensée, provoquant leur mise hors d'usage au bout d'un très bref laps de temps. L'adoucissement concerne la réduction des duretés carbonatées et non carbonatées. Selon le procédé utilisé, nous aurons donc :

- Une diminution de la dureté totale (**TH**) et du **TAC** (exprimant principalement les carbonates et bicarbonates),
- Une diminution des sels de calcium et de magnésium (diminution du **TH**, le **TAC** ne changeant pas).
- ❖ Les différents procédés d'abaissement des duretés sont :
- ✓ Les procédés par précipitation de carbonate de calcium : décarbonatation à la chaux ou à la soude ;

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

- ✓ Les procédés par échanges d'ions : résines cationiques et carboxyliques ;
- ✓ Les membranes : osmose inverse, électrodialyse, nano filtration ;
- ✓ Les procédés d'inhibition qui retardent ou empêchent la précipitation (polyphosphates, champs électromagnétiques) ;
- ✓ Les procédés par dépôts électrochimiques.

III.6. Élimination du fer

III.6. 1.Effets de nuisances

Le fer est un oligoélément nécessaire, à l'état de trace, à la santé humaine. Des concentrations en fer, même élevées, ne forment pas de risques pour la santé humaine. Les nuisances liées à la présence de fer dans l'eau sont :

- ✓ La neutralisation d'une partie des désinfectants due à l'oxydation du fer ;
- ✓ la distribution d'une eau couleur rouille, esthétiquement peu engageante pour le consommateur, et qui peut tacher le linge et les sanitaires ;
- ✓ Le goût "métallique" procuré à l'eau ;
- ✓ Le risque de corrosion des canalisations dû au développement de micro-organismes (ferrobactéries). Tout comme le fer, le manganèse ne présente pas de risques pour la santé humaine. Les inconvénients sont identiques à ceux du fer : problèmes organoleptiques (couleurs, goûts), taches sur le linge, et risque de développements bactérien

III.6. 1.Élimination du fer

L'élimination du fer est appuyée sur la précipitation du fer dissous (Fe^{2+}) sous sa forme oxydée (Fe^{3+}), en tant que $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou Fe_2O_3 .

Une des techniques d'élimination physico-chimique du fer consiste en l'oxydation du fer par aération, suivie d'une filtration sur sable. Cependant, d'autres procédés existent également:

Oxydation + filtration sur sable (technique physico-chimique)	Pour de l'eau avec un $\text{pH} > 7$, un faible potentiel redox et une faible concentration en fer ($< 3\text{mg/L}$)
Oxydation + filtration sur calcite	Pour une eau acide avec un faible potentiel redox, le filtre calcite augmente le pH de l'eau agressive par ajout de CaCO_3
Echange d'ions	Recommandé pour des procédés continus et une faible concentration en fer. Indépendant du pH

III.7. Elimination du Mg^{2+}

L'élimination du manganèse par technique physico-chimique (aération et filtration sur sable) peut aussi être utilisée mais la cinétique d'oxydation du manganèse est trop lente pour un $pH < 9$. Si le magnésium est présent dans les eaux de forage et si le pH est suffisant, il précipitera lors de leur décarbonatation avec une partie de la silice. Un appoint de Mg peut être effectué par de la poudre de MgO qui se solubilise par carbonatation en $MgCO_3$ à froid. On peut également rajouter un sel de Mg , chlorure ou sulfate. Selon les analyses de l'eau brute, la température et l'abattement recherché, des graphiques permettent le calcul de la dose de MgO réagissant et, par différence, celle à apporter.

Cette dose varie à froid de 3,2 à 1,8 mg de $Mg O$ par mg de SiO_2 adsorbé, pour une concentration initiale de 20 à 40 $mg \cdot L^{-1}$.

Exemple :

- 150 $mg \cdot L^{-1}$ (en $CaCO_3$) soit 15 °F de Mg précipités ;
- teneur en SiO_2 de l'eau brute – 30 $mg \cdot L^{-1}$;
- teneur en SiO_2 de l'eau traitée – 11 $mg \cdot L^{-1}$;
- Et si l'on recherche 8 $mg \cdot L^{-1}$ de SiO_2 résiduelle il faudra ajouter au moins 25 $mg \cdot L^{-1}$ (en $CaCO_3$) de Mg sous forme de réactifs.

La décarbonatation à la chaux, génératrice d'un pH élevé, est favorable à l'élimination du fer et du manganèse. Ainsi, la précipitation du carbonate ferreux est pratiquement totale à $pH 8,2$ (surtout lorsqu'elle se produit conjointement avec celle du $CaCO_3$) et celle de l'hydroxyde ferreux l'est à $pH 10,5$. Une décarbonatation partielle, à pH voisin de 8, peut donc entraîner une déferrisation complète.

Dans certains cas, en particulier dans les appareils de décarbonatation en lit, le même pH permet une démagnétisation satisfaisante, alors que théoriquement elle devrait être associée à une décarbonatation totale à $pH 9,5$ ou 10. C'est sur ce principe que fonctionne l'installation de Ratingen en Allemagne: cette installation réalise décarbonatation partielle, déferrisation, démanganisation et nitrification.

Chapitre IV : Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres

IV. Introduction

L'eau est abondante sur terre, elle est constituée d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %). L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % . Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le Water Resources Institute, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m³ par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années. Mais leur coût (de 1 à 2 euros / m³) limite souvent leur utilisation aux pays riches

IV.1. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres

IV.1.1. Les eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates).

La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g.L⁻¹ (27,2 g.L⁻¹ de NaCl, 3,8 g.L⁻¹ de MgCl₂, 1,7 g.L⁻¹ MgSO₄, 1,26 g.L⁻¹ CaSO₄, 0,86 g.L⁻¹ K₂SO₄).

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L⁻¹,
- Mer Rouge : environ 40 g.L⁻¹,
- Mer Caspienne : 13 g.L⁻¹,
- Mer Morte : 270 g.L⁻¹,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.L⁻¹.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

IV.1.2. Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le NaCl .

❖ Relation entre salinité et chlorinité

- **La salinité** exprimé en g/kg) est la masse en gramme de résidu solide contenue dans kilogramme d'eau de mer quant tous les carbonates ont été transformés en oxydes .elle est représenté comme

$$(S) = \text{Sal} = 1.806 * C_0 \quad (\text{IV.1})$$

- **La chlorinité** (exprimé en g/kg) d'une eau salée est la masse en gramme d'ion chlorures Cl^- contenus dans un kilogramme

$$[\text{Cl}^-] = 0.93 * C_0 \quad (\text{IV.2})$$

Relation entre salinité et chlorinité est :

$$S = 0,03 + 1,805 \times Cl \quad (\text{IV.3})$$

IV.2. Les principales technologies de dessalement des eaux

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

- ✓ Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation ;
- ✓ Les procédés utilisant des membranes: l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement.

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

- ✓ Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- ✓ Un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- ✓ Le procédé de dessalement lui-même,
- ✓ Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisations de l'eau produite.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.

IV.2.1.L'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10-7 mm de taille.

La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de 0,5 g.L-1.

IV.2.1.1.Principe de l'osmose inverse

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration. Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer.

Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

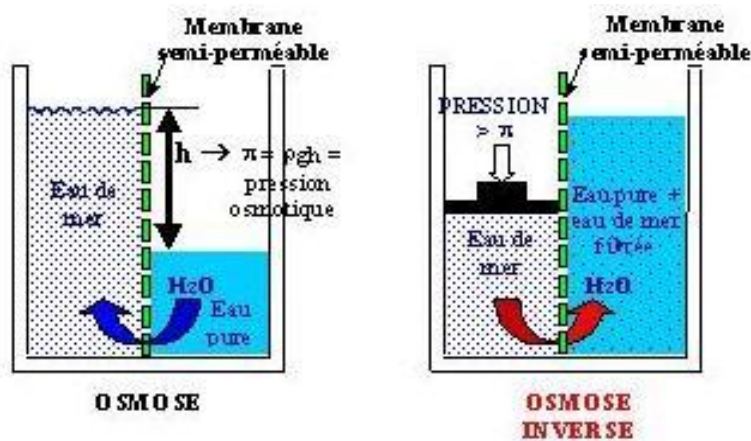


Figure IV 1. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (voir figure 1), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée P_{os} peut être calculée d'après la loi de van't Hoff :

$$P_{os} = i \times C \times R \times T \quad (\text{IV.4})$$

Où i est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,

C est la concentration en sels en mol.m^{-3}

R est la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T est la température absolue de la solution en Kelvin.

Application :

La pression osmotique d'une eau à 20°C contenant 35 g de chlorure de sodium par litre vaut :

$$P_{os} = 2 \times (35 \times 103/58,5) \times 8,314 \times 293 = 29,14 \times 10^5 \text{ Pa} = 29,14 \text{ bar.}$$

Le débit spécifique J_1 (débit massique par m^2 de membrane) d'eau osmosée produite est proportionnel à la différence entre la pression appliquée P et la pression osmotique P_{os} de la solution concentrée.

$$J_1 = A \times (P - P_{os}) \quad (\text{IV.5})$$

Où A est le coefficient de perméabilité vis-à-vis de l'eau pure.

Le flux spécifique de sel traversant la membrane est quant à lui proportionnel à la différence de concentration de part et d'autre de la membrane.

$$J_2 = B \times P_{os} \times C \quad (\text{IV.6})$$

Où B est le coefficient de perméabilité vis-à-vis du sel.

IV.3. Les procédés de distillation

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations.

Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux. En effet pour transformer un kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

IV.3.2. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2^{ème} effet et ainsi de suite (voir figure IV. 3).

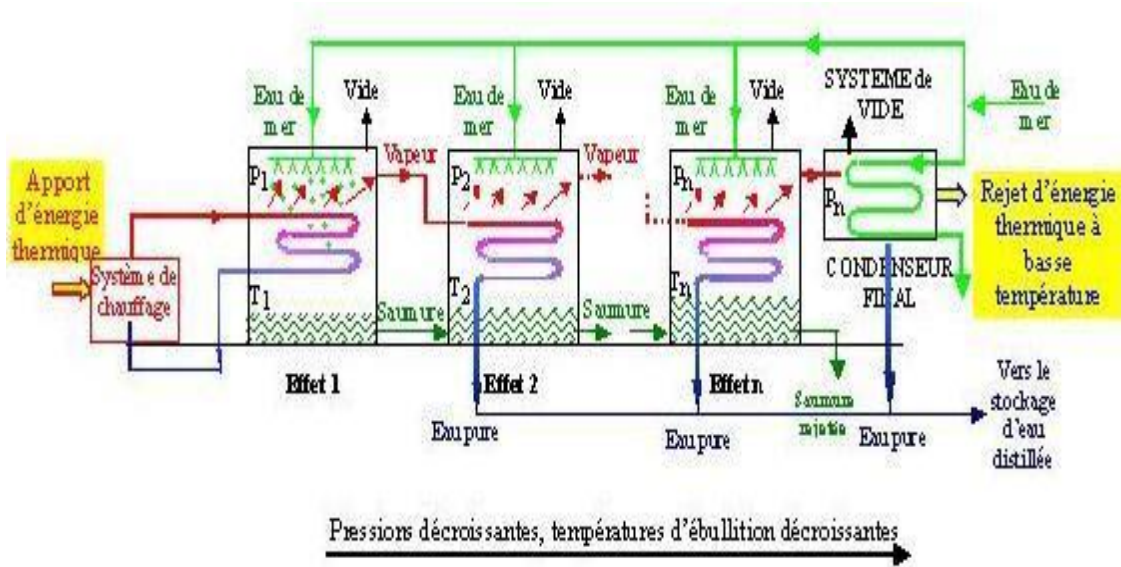


Figure IV 3. Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)

IV.3.3. Distillateur solaire simple.

La technique de dessalement de l'eau de mer, exploitant l'énergie solaire en utilisant un distillateur simple, basée sur le principe de l'effet de serre n'est pas nouvelle; ce processus d'évaporation a été pour la première fois utilisée à grande échelle en 1872 à Las Salinas au nord du désert chilien. Le distillateur et le capteur solaire font partie de la même unité et l'énergie thermique n'est utilisée qu'une fois. Une telle installation se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'un recouvrement transparent en verre ou parfois en plastique incliné

L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. La vapeur d'eau qui contient l'air chaud est refroidie par les conditions régnant dans le milieu ambiant pour se condenser au vitrage. Il y a formation de gouttes d'eau

qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage dans une gouttière qui conduit au réservoir de stockage

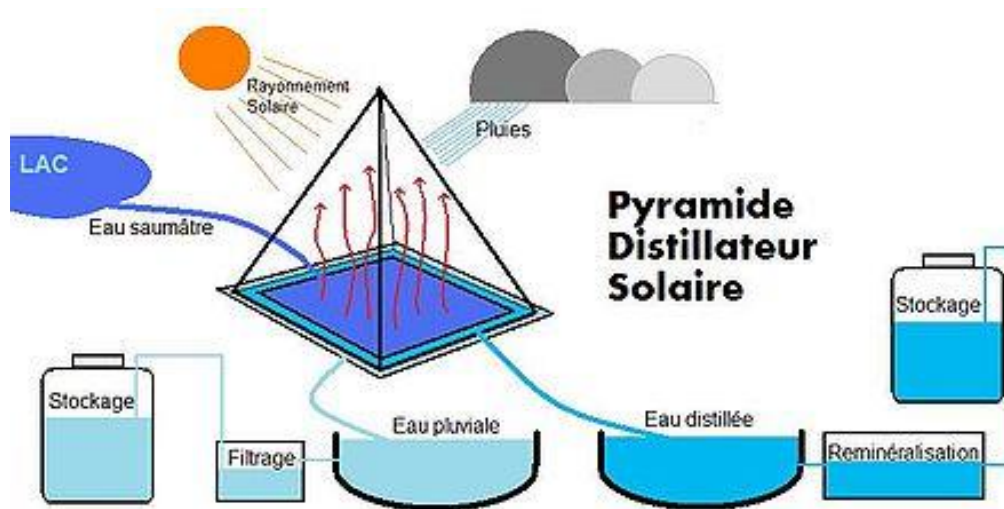


Figure IV 4 : Distillateur solaire de forme pyramide

IV.3.4. Distillateur solaire d'eau de mer

Contrairement au distillateur simple décrit précédemment, le système de distillation se compose ici de deux unités différentes :

- ✓ Source de chaleur (un capteur solaire ou de la chaleur provenant de la cogénération)
- ✓ Unité de distillation.

Le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs bassins contenant de l'eau saline, superposés les uns sur les autres qualifiés d'étages. Seul le bassin inférieur est alimenté en énergie thermique. Lorsque l'eau du bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au dessus. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière qui les conduit au stockage. A la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de transformation de phase, dite enthalpie d'évaporation, est libérée.

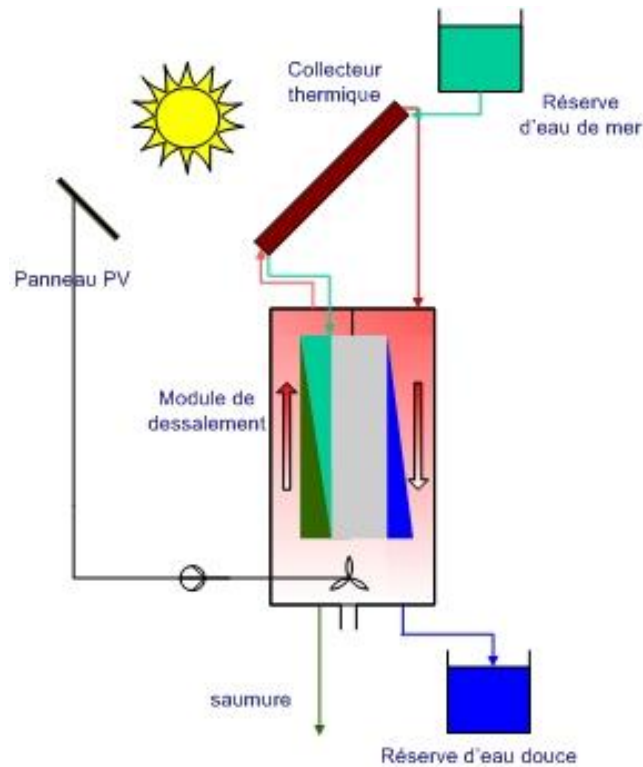


Figure IV.5 : Installation solaire de dessalement à un seul étage

IV.4. Procédé électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé électrochimique qui permet d'extraire les ions (atomes chargés positivement ou négativement) d'une solution en les déplaçant. L'électrodialyse est un procédé de séparation des ions d'un liquide placé entre 2 membranes semi-perméables en présence d'un champ électrique. Par exemple, par électrodialyse, on peut extraire les ions Na^+ et Cl^- de l'eau de mer. Ce procédé fonctionne avec un appareil nommé électro dialyseur dont nous allons vous expliquer le fonctionnement.

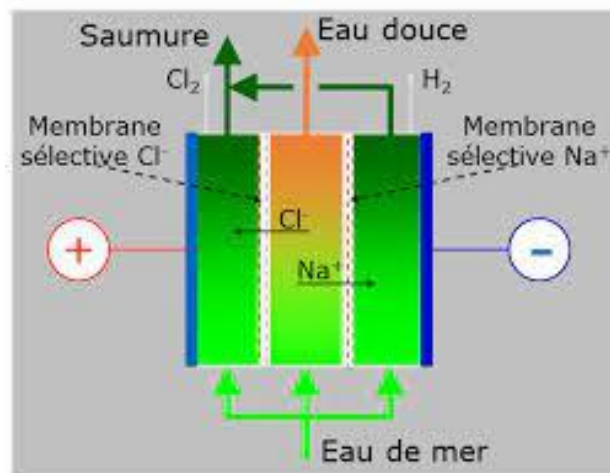


Figure IV.6. Schéma de fonctionnement d'un système électrodialyse

IV.4.1. Pré - Traitement

Souvent, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement avant l'électrodialyse car les solides en suspension avec un diamètre supérieur à 10 mm doivent être éliminés pour ne pas risquer de boucher les pores de la membrane. Seuls les ions sont éliminés dans l'électrodialyse, d'où la nécessité d'un prétraitement de l'eau pour la débarrasser des MES qui sont capables de neutraliser la membrane. Il est donc nécessaire, pour obtenir une électrodialyse fiable, de procéder à une étude approfondie de l'eau utilisée pour en connaître précisément la composition.

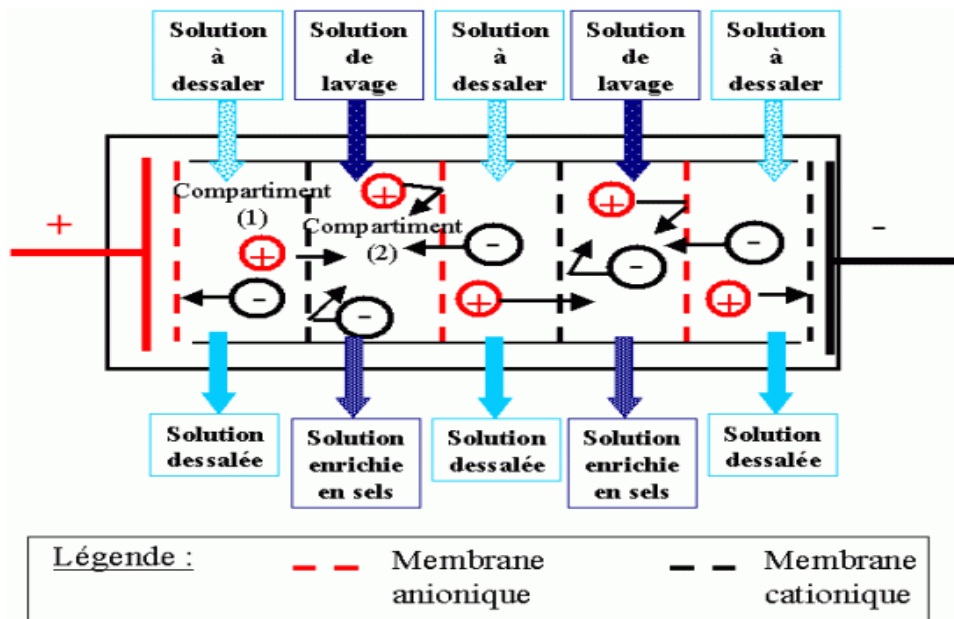


Figure IV.7. Schéma d'un système électrodialyse

Quand on applique un courant continu à deux électrodes plongées dans une solution d'eau salée, nous remarquons que le courant traverse l'eau salée, solution ionique principalement constituée d'ions Na^+ et Cl^- . Les cations Na^+ sont attirés par l'électrode négative tandis que les anions Cl^- sont attirés par l'électrode positive. Dans ce principe, des membranes semi-perméables, qui jouent le rôle de filtre pour les anions et d'autres pour les cations, sont interposées alternativement entre les deux électrodes. On obtient donc des compartiments à très forte concentration en sel et d'autres en eau dessalées. Lorsque l'eau est désionisée c'est à dire qu'elle est dessalée, elle est extraite des compartiments.

IV.5. Avantages et inconvénients

Ce procédé a l'avantage d'être très adapté au dessalement en laboratoire en petite quantité pour les eaux saumâtres, mélange d'eau douce et d'eau de mer se situant à l'embouchure des fleuves et dont la teneur en sel est inférieure à celle de l'eau de mer.

L'inconvénient est que cette technique consomme énormément d'électricité et ne peut dessaler que ces eaux saumâtres dont la concentration totale de sels dissous est généralement comprise entre 1 et 10g/l alors qu'elle est en moyenne de 35g/l pour l'eau de mer.

IV.6. Problèmes techniques rencontrés en dessalement

Les problèmes rencontrés dans les différents procédés de dessalement sont principalement liés à l'utilisation de solutions salines concentrées.

Ce sont la corrosion, l'entartrage et le colmatage.

IV.6.1. La corrosion : La corrosion des matériaux par l'eau de mer (ou des solutions salines concentrées) est un phénomène important qui conditionne la durée de vie des installations, donc leur coût. Elle dépend d'un certain nombre de facteurs, comme

- ✓ la conductivité, la teneur élevée en chlorures, la teneur en oxygène dissous, la présence de H₂S
- ✓ la présence de particules solides, de bactéries, d'organismes marins (algues)

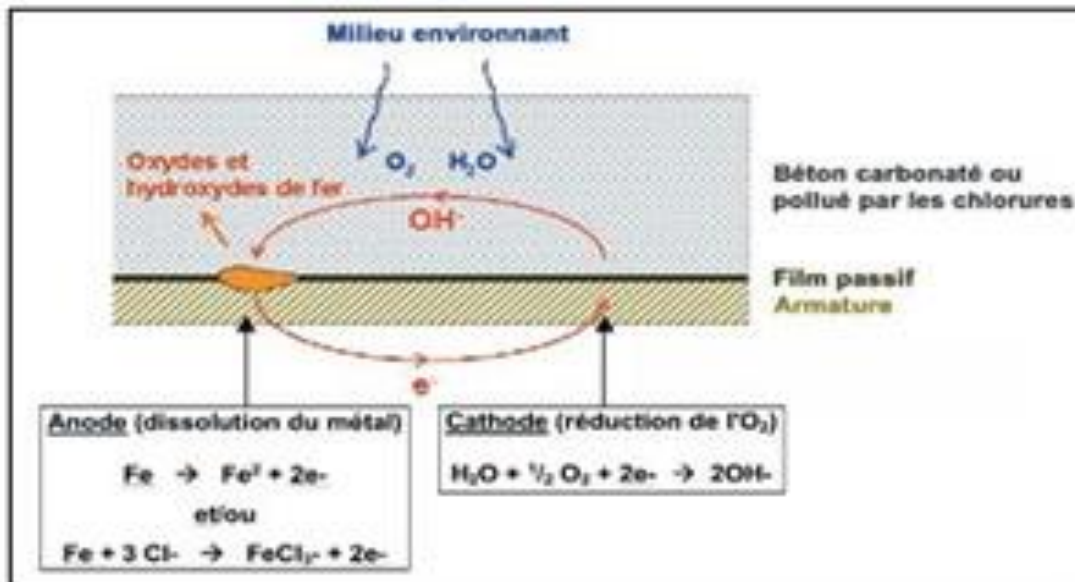


Figure IV.8 : Corrosion des armatures

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

L'utilisation dans le circuit haute pression d'osmose inverse d'aciers austénitiques ou ferriques voire de titane (coût élevé) est recommandée malgré des surcoûts importants. Il en est de même pour les évaporateurs dans lesquels circulent de l'eau de mer à haute température. La production d'eaux trop agressives par distillation ou par osmose inverse implique une remise à l'équilibre de ces eaux avant injection dans les réseaux d'eau potable . Dans le premier cas une simple neutralisation peut être suffisante par exemple à la chaux ou la soude, mais dans le second l'ajout de chaux doit être combiné à celui de gaz carbonique).

IV.6.2.L'entartrage (Scaling)

L'entartrage correspond à la formation d'un dépôt de sels minéraux. C'est un phénomène qui se produit sur les surfaces d'échanges aussi bien thermiques que membranaires qui sont des zones de concentration ionique élevée.

L'entartrage est lié à la formation de solides amorphes ou cristallisés qui est fonction de la température (diminution de la solubilité quand la température augmente) et de la composition de l'eau.



Figure IV.9 : Phénomène de l'entartrage

Polycopie de cours de Traitement et dessalement des eaux

Une première solution consiste à jouer sur le procédé même : apport d'énergie calorifique supplémentaire dans le cas des procédés de distillation, application d'une pression supérieure dans celui des procédés membranaires.

Une deuxième solution consiste à prétraiter l'eau par

- ✓ L'ajout d'acide qui induit une décarbonatation du milieu par dégazage du gaz carbonique formé à partir des hydrogencarbonates ;
- ✓ L'ajout de chaux et de germes de cristallisation qui favorise la précipitation du carbonate de calcium ;
- ✓ L'emploi d'inhibiteurs d'entartrage : polyphosphate, organophosphate, polymères polycarboxyliques.

IV.6.3. Le colmatage (Fouling)

Les eaux brutes naturelles peuvent également contenir des substances organiques, des microorganismes. En osmose inverse ces organismes qui sont retenus par les membranes peuvent les encrasser et trouver des conditions favorables à leur développement.

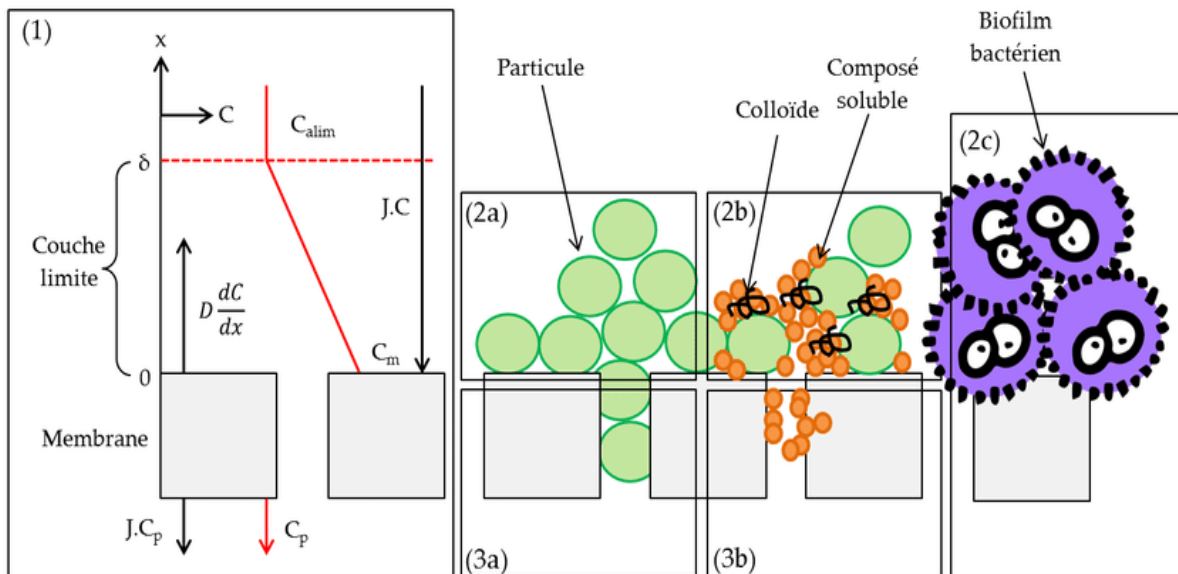


Figure IV 10 : Colmatage des membranes

Elles forment alors un biofilm qui peut conduire au colmatage des membranes. Ce phénomène a des conséquences directes sur la capacité de production des installations et le coût du process. Comme pour les autres problèmes il est possible de réduire le colmatage par un prétraitement adéquat : dans certains cas une étape de coagulation-floculation suivie d'une filtration sera indispensable

Références bibliographiques

- [1] Abegunrin, T.P., Awe, G.O., Idowu, D.O., Adejumobi, M.A., 2016. Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. CATENA 139, 167–178.
- [2] Ahoulé, D.G.M., 2016. Performances comparatives des techniques de nanofiltration et d'osmose inverse pour le traitement d'eau de consommation contaminée à l'arsenic au Burkina Faso (Thèse en cotutelle). Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) /Université de Montpellier, Ouagadougou.
- [3] Al-Rawajfeh, A.E., Al-Shamaileh, E.M., Al-Whoosh, K., Al-Ma'abrah, A., Al-Zorqan, R., Zanoon, R., Rawajfeh, K., Al-Jufout, S., 2013. Adsorption desalination of chloride ions on composite natural–synthetic materials : An approach for the reduction of chlorine corrosion in electrodeionization units. J. Ind. Eng. Chem. 19, 1895–1902
- [4] Bandelier, P., Deronzier J.C. (2000-2001). Procédés thermiques de dessalement à haut rendement. CLEFS CEA. N° 44. P 81-82.
- [5] Boixandera, D. (2001). Le dessalement d'eau de mer. BRL Ingénierie.
- [6] Crié, H. (2000). Demain, le dessalement. Hydroplus. Supplément, Mars. p 4-21.
- [7] Legrand L. et Leroy P. (1995) Prévention de la corrosion et de l'entartrage dans les réseaux de distribution d'eau. Ed. Cifec, p.356.