



Université Abderrahmane Mira-Bejaïa



Faculté de Technologie

Département de génie des procédés

## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

Filière : Génie des Procédés

Option : Génie de l'environnement

*Réalisé par :*

ISSAADI Mourad

KHEBAT Abdeslam

Contrôle du procédé combiné osmose inverse-electrodéionisation

CEDI par analyses physicochimiques

des eaux de process de CEVITAL

M<sup>me</sup> O. SENHADJI

Présidente

Université de Bejaïa

M<sup>r</sup> M. BEHLOUL

Examineur

Université de Bejaïa

M<sup>m</sup> H. BELKACEMI

Promotrice

Université de Bejaïa

M<sup>r</sup> Y. MAZZOUZ (Cevital)

Promoteur

Université de Bejaïa

# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier vivement et chaleureusement notre promotrice Madame **H.BELKACEMI**, encadreuse de ce mémoire, pour nous avoir soutenu tous le long de travail, en lui témoignant notre reconnaissance pour son caractère sérieux, sa patience et ses conseils, ainsi que notre encadreur au Cevital monsieur **Y.MAZOUZ** et toute l'équipe qui travail au laboratoire.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Madame **O. SENHADJI** pour qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à Monsieur **M. BEHLOUL** d'avoir accepter de faire partie du jury, montrant aussi l'intérêt qu'ils portent au sujet de ce modeste travail.*

*Nos remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail particulièrement à Monsieur **O.MANSOURI**.*

# *DÉDICACES*

*A mes très chers parents.*

*A mes sœurs et frères.*

*A tout la famille.*

*A mes enseignants.*

*A mes amis.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Mourad*

# *DÉDICACES*

*A mes très chers parents.*

*A mes sœurs et frères.*

*A tout la famille.*

*A mes enseignants.*

*A mes amis.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*abdeslam*

# *Listes d'abréviation*

---

## Listes d'abréviation

- ✓ **ASTM:** American Society for Testing and Materials.
- ✓ **MEI:** Membrane échangeuse ionique.
- ✓ **MEA:** Membrane échangeuse anionique.
- ✓ **MEC:** Membrane échangeuse cationique.
- ✓ **ppm:** Partie par million.
- ✓ **ppb:** Partie par billion.
- ✓ **COT:** Carbone organique totale.
- ✓ **CEDI:** Continuous Electrodeionization (Electrodeionisation continue).

---

# SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction.....1**

## **Chapitre I : Généralités sur les eaux**

I.1. Définition de l'eau .....3

I.2. Différents types de l'eau .....3

    I.2.1. Eaux de pluie .....3

    I.2.2. Eaux de surface .....3

    I.2.3. Eaux souterraines .....3

    I.2.4. Eaux de mer .....4

I.3. Propriétés de l'eau .....4

    I.3.1.1. Masse volumique .....4

    I.3.1.2. Caractéristiques thermiques .....4

    I.3.1.3. Viscosité .....4

    I.3.1.4. Tension superficielle .....5

    I.3.1.5. Température .....5

    I.3.1.6. Matière en suspension (MES) .....5

I.3.2. Caractères organoleptique de l'eau .....5

    I.3.2.1. Couleur .....5

    I.3.2.2. Gout et odeurs .....5

    I.3.2.3. Turbidité .....6

---

I.3.3. Caractères chimique .....	6
I.3.3.1. L'eau solvant .....	6
I.3.3.2. Ionisation .....	6
I.3.3.3. Oxydo-réduction .....	6
I.3.4. Caractéristique physico-chimique .....	6
I.3.4.1. Potentiel d'hydrogène (PH) .....	6
I.3.4.2. Conductivité .....	7
I.3.4.3. Titres .....	7
I.3.4.4. Salinité totale .....	7
I.3.4.5. Solubilité des gaz dans l'eau .....	8
I.3.4.6. Cations et anions .....	8

## **Chapitre II : Différents procédés de l'eau ultrapure**

Introduction .....	10
II.1. Définition de l'eau ultrapure.....	10
II.2. Description du procédé de la production d'eau ultrapure .....	10
II.3. Contrôle de la qualité de l'eau ultrapure.....	12
II.4. Intérêt d'utilisation de l'eau ultrapure.....	13
II.5. Performances actuelles du traitement de l'eau ultrapure .....	14
II.6. Les procédés membranaires classiques .....	15
II.6.1. Généralités .....	15
II.6.2. les procédés membranaires classiques à flux croisé /flux tangentiel .....	15
II.6.2.1. La filtration frontal .....	15
II.6.2.2. La filtration tangentiel .....	16

---

II.6.3. Microfiltration et ultrafiltration .....	18
II.6.3.1. La microfiltration .....	18
II.6.3.2. L'ultrafiltration .....	18
II.6.4. Nanofiltration .....	19
II.6.5. Osmose inverse .....	20
II.6.6. Avantage et inconvénients du procédé .....	21
II.6.6.1. Colmatage des membranes .....	21
II.6.6.2. Contrôle du colmatage et de la polarisation de concentration .....	23
II.7. procédé électromembranaire .....	23
II.7.1. L'électrodialyse .....	23
II.8. Définition et avantage de la technique d'électrodéionisation .....	24
II.8.1. Historique .....	25
II.8.2. Principe et aspect théorique de l'électrodéionisation .....	25
II.8.3. Application et configurations des cellules d'électrodéionisation .....	26
II.8.3.1. Production de l'eau ultrapure .....	26
II.8.3.2. Dépollution des eaux .....	28
II.8.3.3. Applications potentielles .....	29
II.8.4. Configurations des cellules de l'électrodéionisation .....	29
II.8.4.1. Configuration plane .....	29
II.8.4.1.1. Electrodéionisation à cellules minces .....	30
II.8.4.1.2. Electrodéionisation à cellules épaisses .....	31
II.8.4.2. Configuration en spirale .....	34
II.8.4.3. Electropermutation .....	36



---

II.8.4.4. Déionisation capacitive .....	37
II.8.5. Aspect économique .....	38
II.9. La cogénération .....	39
Introduction .....	39
II.9.1. Historique .....	39
II.9.2. Définition et principes de base .....	40
II.9.3. Différents types de procédés de cogénération et leurs usages .....	41
II.9.3.1. Cogénération par moteur.....	41
II.9.3.2. Cogénération par turbine à combustion .....	43
II.9.3.3. Cogénération par turbine à vapeur .....	44
II.9.3.4. Cycle combiné.....	45
II.9.3.5. La trigénération .....	46
Définition .....	46
II.9.4. Les avantages de la cogénération .....	46
II.9.5. Paramètre clés des projets de cogénération .....	49
II.9.6. Comparaison de rendements d'énergie .....	49
II.9.7. Recherche – développement .....	51

### **Chapitre III : Mise en œuvre de la méthodologie expérimentale**

III.1. Historique du groupe CEVITAL .....	52
III.2. Source de l'eau utilisé pour la production de l'eau ultrapure .....	53
III.3. Description du processus de traitement par osmose inverse .....	53
III.3.1. Les étapes du procédé .....	54

---

III.3.1.1. Système d'alimentation en eau brute .....	55
III.3.1.2. Système de prétraitement .....	55
III.3.1.2.1. Groupe de stérilisation et régénération du dioxyde de manganèse.....	55
III.3.1.2.2. Prétraitement avec les filtres à sable .....	55
III.3.1.2.3. Réservoir de stockage de l'eau filtrée .....	56
III.3.1.2.4. Groupe de déchloration .....	56
III.3.1.2.5. Groupe de dosage de produits séquestrant .....	56
III.3.1.2.6. Groupe de dosage de produits biocides .....	56
III.3.1.2.7. Filtre a cartouche .....	56
III.3.1.2.8. contre lavage .....	57
III.3.1.3. Système d'osmose inverse .....	57
III.3.1.4. Lavage sur place (CIP) .....	59
III.4. Electrodéionisation .....	59
III.4.1. Spécifications du CEDI .....	60
III.4.2 Description du processus .....	61
III.4.3. Les commande de régulation du procédé .....	63
III.4.3.1. Instrument de conductivité .....	63
III.4.3.2. Alimentation d'énergie .....	63
III.4.3.3. Interface pour l'opérateur .....	63
III.5. Description du procédé de la cogénération mise en place .....	63
III.5.1. Présentation de l'installation .....	64
III.5.1.1. Bâche dégazant .....	64
III.5.1.2. Chaudières .....	64

---

III.5.1.3. Turbine à vapeur .....	66
III.5.1.4. Bouilleur KAPP .....	66
III.5.1.5. Les aérocondenseurs .....	66
III.5.1.6. Cheminée (commune aux deux chaudières) .....	66
III.5.2. Procédé de l'eau ultrapure .....	66
III.6. Contrôle et suivi par analyse physico-chimiques de l'eau brute et des eaux de process aux différents points de colmatage : eau brute – osmoseur – CEDI .....	68
III.6.1. Le potentiel d'hydrogène (pH) .....	68
III.6.2. La conductivité .....	69
III.6.3. Méthodes titrimétriques (TA – TAC – TH) .....	69
III.6.3.1. Le titre alcalimétrique (TA) .....	69
III.6.3.2. Le titre alcalimétrique (TAC) .....	71
III.6.3.3. Le titre hydrotimétrique total TH (dureté totale) .....	72
III.6.3.4. Le titre hydrotimétrique calcique (THCa <sup>2+</sup> ) .....	73
III.6.3.5. Les chlorures Cl <sup>-</sup> .....	74
III.6.4. Méthodes spectrophotométrique par UV-Visible et par SAA .....	75
III.6.4.1. Méthodes spectrophotométrique par UV-Visible .....	75
III.6.4.1.1. Le fer (Fe):.....	76
III.6.4.1.2. Le Manganèse (Mn <sup>2+</sup> ): .....	76
III.6.4.1.3. Le chlore libre Cl <sub>2</sub> : .....	77
III.6.4.1.4. La silice SiO <sub>2</sub> :.....	77
III.6.4.2. Méthodes spectrophotométrique par SAA .....	78
III.6.4.2.1. Le sodium Na <sup>+</sup> .....	78

III.6.4.2.2. Le zinc $Zn^{2+}$ .....	79
III.6.4.2.3. Le plomb $Pb^{2+}$ .....	80

### Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Potentiel d'hydrogène (pH) .....	82
IV.2. La conductivité .....	83
IV.3. Le titre hydrotimétrique total TH (dureté totale) .....	85
IV.4. Le titre hydrotimétrique calcique $TH_{Ca^{++}}$ .....	86
IV.5. Le titre alcalimétrique TA .....	87
IV.6. Le titre alcalimétrique complet TAC .....	87
IV.7. Les chlorures $Cl^-$ .....	88
IV.8. Méthodes spectroscopique par UV-VIS et par SAA .....	89
IV.8.1. Méthodes spectroscopiques par UV-VIS.....	89
IV.8.1.1. Le fer (ppm) .....	89
IV.8.1.2. La silice $SiO_2$ (ppm) .....	90
IV.8.1.3. Le magnésium $Mn^{2+}$ (ppm) .....	91
IV.8.1.4. Le chlore libre $Cl_2$ (ppm) .....	92
IV.8.2. Méthodes spectroscopique d'adsorption atomique (SAA) .....	93
IV.8.2.1. Le sodium $Na^+$ (ppm) .....	93
IV.8.2.2. Le zinc $Zn^{2+}$ (ppm) .....	94
IV.8.2.3. Le plom $Pb^{2+}$ (ppb) .....	95
Conclusion .....	97
Perspective .....	100

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....101

Lexiques

Annexes

## *Liste des figures*

<b>Figure II.1</b> : Schéma d'un procédé d'ultrapurification .....	11
<b>Figure II.2</b> : Schéma d'installation de production de l'eau ultrapure à l'industrie semi-conducteur .....	12
<b>Figure II.3</b> : Membrane sélective .....	15
<b>Figure II.4</b> : Principe du fonctionnement de la filtration frontale .....	16
<b>Figure II.5</b> : Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle .....	17
<b>Figure II.6</b> : Classement des différents procédés membranaire .....	17
<b>Figure II.7</b> : Principe de l'ultrafiltration .....	19
<b>Figure II.8</b> : Principe de l'osmose et l'osmose inverse .....	20
<b>Figure II.9</b> : le principe de l'électrodialyse .....	24
<b>Figure II.10</b> : Production de l'eau ultrapure en utilisant l'électrodéionisation .....	25
<b>Figure II.11</b> : Représentation d'une cellule mince .....	30
<b>Figure II.12</b> : Représentation d'une cellule épaisse .....	32
<b>Figure II.13</b> : principe de fonctionnement de CEDI a lits séparés .....	33
<b>Figure II.14</b> : Principe de fonctionnement de CEDI à membrane bipolaire .....	34
<b>Figure II.15</b> : Principe de fonctionnement du module CEDI en spirale .....	35
<b>Figure II.16</b> : Schéma du principe de l'électropermutation .....	37
<b>Figure II.17</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule de déionisation captive .....	38
<b>Figure II.18</b> : Principe d'un processus de cogénération .....	41
<b>Figure II.19</b> : Schéma de principe d'un moteur à gaz ou diesel .....	43
<b>Figure II.20</b> : Cogénération par turbine à combustion .....	44
<b>Figure II.21</b> : Schéma de principe d'une turbine à vapeur .....	45
<b>Figure II.22</b> : Schéma d'une cogénération à cycle combiné .....	45
<b>Figure II.23</b> : Schéma de principe d'un système de trigénération .....	46
<b>Figure III.1</b> : Processus de traitement de l'eau par osmose inverse au niveau de Cevital .....	54

<b>Figure III.2 :</b> Face externe des filtres à cartouches utilisées au niveau de Cevital .....	57
<b>Figure III.3 :</b> La face externe d'un module d'osmose inverse utilisée au niveau de Cevital .....	58
<b>Figure III.4 :</b> Schéma d'une coupe à cartouche d'une membrane d'osmose inverse.....	59
<b>Figure III.5:</b> La face externe des modules d'CEDI utilisée au niveau de cevital ... ..	60
<b>Figure III.6 :</b> Schéma de production d'eau ultrapure à partir de la combinaison OI-CEDI . ...	61
<b>Figure III.7 :</b> Schéma illustre l'entrée de l'eau ultrapure dans une chaudière au niveau de Cevital .....	65
<b>Figure III.8 :</b> Schéma de système de production d'électricité à partir de l'eau ultrapure au niveau de Cevital .....	67
<b>Figure III.9 :</b> La face externe d'une turbine à vapeur utilisée au Cevital .....	68
<b>Figure IV.1 :</b> PH des eaux de process de Cevital .....	83
<b>Figure IV.2 :</b> Conductivités ioniques des eaux de process de Cevital .....	84
<b>Figure IV.3 :</b> Représentation de la dureté totale TH .....	85
<b>Figure IV.4 :</b> Représentation de la dureté calcique $TH_{Ca^{++}}$ .....	86
<b>Figure IV.5 :</b> Représentation de TAC pour les eaux de process .....	88
<b>Figure IV.6 :</b> Représentation graphique pour le dosage des ions chlorures .....	89
<b>Figure IV.7 :</b> Concentration des eaux de process en Fer ferrique $Fe^{3+}$ .....	90
<b>Figure IV.8 :</b> Variation de la teneur en silice pour les eaux de process .....	91
<b>Figure IV.9 :</b> Représentation graphique pour le chlore libre .....	92
<b>Figure IV.10 :</b> Représentation de $Na^{+}$ des différents échantillons .....	93
<b>Figure IV.11 :</b> Représentation de $Zn^{2+}$ des différents échantillons .....	94
<b>Figure IV.12 :</b> Représentation de $Pb^{2+}$ des différents échantillons .....	95
<b>Figure (annexe 2) :</b> Absorbance de $Na^{+}$ en fonction de concentration	
<b>Figure (annexe 2.1) :</b> Absorbance de $Zn^{2+}$ en fonction de concentration	
<b>Figure (annexe 2.2) :</b> Absorbance de $Pb^{2+}$ en fonction de concentration	





## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Les substances existantes dans une eau brute .....	9
<b>Tableau II.1</b> : Normes d'eaux ultrapures selon l'ASTM .....	14
<b>Tableau II.2</b> : Eau purifié qualité USP « purified water » .....	28
<b>Tableau II.3</b> : performance de l'électrodéionisation à lit mélangé en fonction de la qualité de résine utilisée .....	31
<b>Tableau II.4</b> : Effets environnementaux des centrales de production d'électricité et de chaleur .....	48
<b>Tableau III.1</b> : Spécification de l'eau d'alimentation maximum du CEDI .....	61
<b>Tableau III.2</b> : Caractéristiques du module type CEDI .....	62
<b>Tableau IV.1</b> : Valeurs de pH des eaux de process de Cevital et de l'eau d'alimentation. ....	82
<b>Tableau IV.2</b> : Conductivités ioniques des eaux de process de Cevital .....	84
<b>Tableau IV.3</b> : Valeurs mesurées de la dureté totale TH .....	85
<b>Tableau IV.4</b> : Valeurs mesurées de la dureté totale THca <sup>++</sup> .....	86
<b>Tableau IV.5</b> : Valeurs de TAC pour les eaux de process .....	87
<b>Tableau IV.6</b> : Dosage des ions chlorures pour les cinq échantillons .....	88
<b>Tableau IV.7</b> : Les valeurs mesurées de fer ferrique Fe <sup>3+</sup> pour les eaux de process .....	90
<b>Tableau IV.8</b> : Teneurs en silice pour les eaux de process .....	91
<b>Tableau IV.9</b> : Mesure de chlore libre pour les eaux de process .....	92
<b>Tableau IV.10</b> : Concentration de Na <sup>+</sup> des différentes échantillons .....	93
<b>Tableau IV.11</b> : Concentration de Zn <sup>2+</sup> des différents échantillons des eaux de process .. ...	94
<b>Tableau IV.12</b> : Concentration de Pb <sup>2+</sup> des différents échantillons des eaux de process .....	95
<b>Tableau (annexe 1)</b> : Equivalence en mg.l <sup>-1</sup> du milliéquivalent.l <sup>-1</sup> et du degré français pour différents ions et composé présentes dans l'eau	
<b>Tableau (annexe 2)</b> : Valeur d'absorbance Na <sup>+</sup> des différentes concentrations pour chaque étalon	

**Tableau (annexe 2.1) :** Valeur d'absorbance  $Zn^{2+}$  des différentes concentrations pour chaque étalon

**Tableau (annexe 2.2) :** Valeur d'absorbance  $Pb^{2+}$  des différentes concentrations pour chaque étalon

***INTRODUCTION***  
***GÉNÉRALE***

## **Introduction Générale**

L'eau « ultrapure » ou de très haute pureté est un « produit » très élaboré trouvant son application dans des industries de pointe comme les industries des semi-conducteurs (avec la miniaturisation toujours plus grande des composés microélectroniques), les industries de l'énergie (centrale thermique ou nucléaire) ou encore les industries pharmaceutiques et biomédicales [1]. La demande en eau ultrapure a fortement augmenté ces dernières décennies, autant en terme de quantité qu'en terme de qualité.

Les procédés d'obtention d'eau de très haute pureté sont constitués d'un ensemble d'opérations unitaires. L'enchaînement de ces opérations dépend de la qualité d'eau qui constitue la matière première et de la qualité requise du « produit » fini. De façon générale, on trouve souvent une étape dite de prétraitement et une étape dite de finition ( « polishing » dans la littérature anglo-saxonne) [1]. Cette étape de finition comporte en général une étape d'échange d'ions. Les solutions qui sont percolées sont alors dans des gammes de concentrations très faibles.

Dans notre travail nous avons étudié le procédé combiné osmose inverse-electrodeionisation limité par des phénomènes de colmatage au niveau du complexe agroalimentaire du Cevital.

La connaissance de ces limitations est importante afin de maîtriser au mieux le procédé. Il est donc nécessaire de pouvoir quantifier les paramètres physico-chimiques afin de mettre en application des systèmes réels.

Au niveau de Cevital, l'alimentation se fait grâce à un mélange de deux grandes sources, la première est issue d'un puits artésiens situé à Ibouracène (Bejaia) et la deuxième provient d'une station d'épuration Tichy haff , Ce mélange subit une déminéralisation au niveau de l'osmose inverse et un traitement thermique et chimique au niveau de la chaufferie et de la cogénération, Pour une production de la vapeur d'eau et du gaz carbonique, ces dernier sont utilisés dans la raffineries de sucre , d'huile et la margarinerie.

Notre objectif est de mieux approcher la qualité des eaux ultrapures et les comparer à des normes européennes et américaines (ASTM) utilisées au niveau du complexe.

La première partie de ce travail est une étude bibliographique sur la qualité des eaux en générale, ses différentes types, ses propriétés, ses caractéristiques ainsi que le contrôle de la qualité.

La seconde partie présente les descriptions des procédés pour la production d'eau ultrapure avec des technique électromembraniare suivi du contrôle du colmatage et de la polarisation de concentration.

La troisième partie présente la mise en œuvre de la méthodologie expérimentale au niveau de Cevital.

La dernière partie de ce travail est insérée dans le chapitre IV qui rassemble les résultats expérimentaux et leurs discussions obtenus.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

***CHAPITRE I :***  
***GÉNÉRALITÉS***  
***SUR LES EAUX***

## **Chapitre I**

### **I. Généralités sur les eaux**

#### **Introduction**

L'eau c'est la vie [2] ; élément indispensable à notre planète, est composé d'hydrogène et d'oxygène. Par son parcours à travers les roches et le ruissellement, elle s'enrichit de gaz, sels minéraux, matières organiques. Sa composition est donc variable d'une ville et d'une région à l'autre. Cette diversité est une richesse et a fasciné de tout temps.

La terre est souvent appelé la planète bleue parce que l'eau recouvre la majorité de la surface de la terre ; environ 71% de plus le volume d'eau sur terre est estimé a environ 1,4 milliard de km<sup>3</sup> [3].

#### **I.1. Définition de l'eau :**

L'eau est un liquide transparent, incolore et insipide corps composé, dont les molécules sont formées de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène (H<sub>2</sub>O). L'eau bout à 100 °C à la pression atmosphérique et solidifié à 0 °C. Sur la terre ; l'eau est la seul substance qu'on trouve dans ses trois phases à l'état naturelle : Solide (glace, neige) ; liquide (eau liquide) et gazeux (vapeur d'eau) [4].

#### **I.2. Différents types de l'eau**

On trouve quatre sources principales d'eaux brutes : les eaux de pluie, les eaux de surfaces, les eaux souterraines et les eaux de mer, les caractéristiques de chacune de ses sources reflètent l'interaction de l'eau et de milieu environnant.

##### **I.2.1.Eaux de pluie**

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine. Elles sont saturées d'oxygène et d'azote est ne contiennent aucun sel dissous comme les sels de magnésium et de calcium, elles sont donc très douces. Dans les régions industrialisées, les eaux de pluie peuvent être contaminées par des poussières atmosphériques.

##### **I.2.2.Eau de surface**

On peut répartir l'eau de surface en trois catégories : eaux de rivières (partie amont), eaux de rivière (partie aval), et les eaux de lac.

##### **I.2.3.Eaux souterraines**

Elles sont souvent de meilleures qualités que les eaux de surface. Leurs teneurs en matière organiques dépendent du chemin suivi par les eaux d'infiltration qui alimentent les nappes souterraines. Les caractéristiques principales de ces eaux sont présentées ci-dessous

- ✓ Turbidité faible ;
- ✓ Contamination bactérienne faible ;
- ✓ Indice de couleur faible ;
- ✓ Dureté élevée ;
- ✓ Concentration élevée de fer et de manganèses.

#### **I.2.4.Eaux de mers**

Les eaux de mers sont une source d'eau brute qu'on utilise lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce. Les eaux de mer sont caractérisée par leur concentration en sel dissous ; c'est ce que appel salinité.

La salinité de la plupart des eaux de mer varie dans un intervalle de 33000 à 37000 mg/l.

### **I.3. Propriétés de l'eau**

L'eau est complexe, anormale, mystérieuse, inexplicée, exotique, exceptionnelle, particulière, et aussi c'est un élément rebelle, souple, labile et versatile au regard des autres liquides ; il se contracte quand on le chauffe, devient moins visqueux quand on le comprime et sa densité diminue en passant de l'état liquide à l'état solide.

#### **I.3.1. propriétés physiques**

##### **I.3.1.1. Masse volumique**

La masse volumique varie avec la température et la pression, elle passe par un maximum à environ 4 °C. Cette propriété entraîne diverses conséquences, aussi bien dans la nature que dans les stations de traitement. L'eau est considérée comme un fluide incompressible. Mais, en fait, c'est un fluide légèrement élastique [5].

##### **I.3.1.2. Caractéristiques thermiques**

L'importance des propriétés thermiques comme la chaleur massique et les enthalpies fait que les grandes étendues d'eau à la surface de la terre constituent de véritables volants thermiques. C'est également la raison de l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur [5].

##### **I.3.1.3. Viscosité**



C'est la propriété que présente un fluide (liquide ou gaz) d'opposer une résistance aux divers mouvements soit internes (exemple : turbulence), soit globaux (exemple: écoulement).

#### **I.3.1.4. Tension superficielle**

Elle caractérise une propriété des interfaces (surfaces limitant deux phases). Elle est définie comme une force de traction qui exerce à la surface du liquide en tendant toujours à réduire le plus possible l'étendue de cette surface. La tension superficielle diminue avec l'augmentation de la température, et aussi l'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle. Il existe d'autres corps qui la diminuent, ils sont appelés tensioactifs (Exemple : détergents) [5].

#### **I.3.1.5. La température**

La température de l'eau, est un facteur qui agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes [6].

#### **I.3.1.6. Matière en suspension (MES)**

Ce paramètre englobe tous les éléments en suspension dans l'eau dont la taille permet leur rétention sur un filtre de porosité donnée ou leur rassemblement, sous forme de culot, par centrifugation. Il n'existe pas de relation générale entre turbidité et MES, mais une telle corrélation peut être établie empiriquement pour chaque type d'eau [7].

### **I.3.2. Caractères organoleptique de l'eau**

#### **I.3.2.1. Couleur**

Pour l'eau potable, le degré de couleur maximale acceptable est de 15 UCV. Elle peut être due à certaines impuretés minérales (fer) mais également à certaines matières organiques acides humiques, fulviques). Elle doit être éliminée pour rendre l'eau agréable à boire [6].

#### **I.3.2.2. Goûts et odeurs**

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur agréable. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère [6].

### **I.3.2.3. Turbidité**

En relation avec la mesure des matières en suspension, elle donne une première indication sur la teneur en matières colloïdales, d'origine minérale ou organique, qui troublent l'eau (c'est donc une notion opposée à celle de limpidité) [8].

### **I.3.3. Caractères chimiques**

#### **1.3.3.1. L'eau solvant**

Le pouvoir solvatant de l'eau provoque l'altération partielle ou complète de divers liens entre les atomes (dissociation) et dans les molécules (ionisation) et du corps à dissoudre pour les remplacer par de nouveaux liens avec ses molécules propres (hydratation). Une solvation complète est une dissociation.

#### **1.3.3.2. Ionisation**

Un composé minéral dissous dans l'eau se dissocie plus ou moins avec apparition d'ions chargés négativement (anions) et positivement (cations). Le corps dissous est appelé électrolyte ; il transporte le courant électrique.

#### **1.3.3.3. Oxydoréduction**

Les phénomènes d'oxydoréduction présentent une grande importance dans toutes les technologies de l'eau. L'eau elle-même peut participer, suivant des conditions expérimentales et selon certaines réactions chimiques comme un donneur d'électrons (elle est réductrice) ou un accepteur d'électrons (elle est oxydante).

### **I.3.4. Caractéristiques physico-chimiques**

#### **I.3.4.1. Potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH correspond à la concentration d'ions hydrogène. Il mesure l'acidité ou la basicité d'une eau. Le pH interfère avec d'autres paramètres de la qualité dans les complexes réactions chimiques : dureté, alcalinité, turbidité, conductivité [9].

On peut définir le pH d'une solution par la relation :

$$\text{pH} = - \log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

Le pH est une grandeur sans dimension. La concentration des ions oxonium s'exprime en mol.l<sup>-1</sup>.

On peut aussi écrire la relation :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$$

### I.3.4.2. Conductivité

L'eau est légèrement conductrice. La conductivité de l'eau la plus pure que l'on ait obtenue est de 4,2 micro siemens par mètre à 20 °C (correspond à une résistivité de 23,8 mégohms-centimètres). Elle augmente lorsque des sels sont dissous dans l'eau et elle varie en fonction de la température.

### I.3.4.3. Titres

Pour les ions majeurs, qui constituent l'essentiel des composants d'une eau naturelle, les titres (exprimés en meq.l<sup>-1</sup> ou en °F) regroupent un ensemble d'ions.

#### ✓ Titre hydrotimétrique (TH)

Appelé aussi dureté totale, le titre hydrotimétrique mesure l'ensemble des ions alcalinoterreux, c'est-à-dire essentiellement les ions calcium et magnésium (ca<sup>2+</sup> et mg<sup>2+</sup>). Le titre hydrotimétrique calcique (ou TH calcique), qui ne mesure que la teneur en ion calcium, est parfois distingué du titre hydrotimétrique magnésium (ou TH magnésien), qui ne mesure que la teneur en ions magnésium.

Le TH se mesure par méthode volumétrique.

#### ✓ Titre alcalimétrique complet (TAC)

Ce titre mesure l'ensemble des anions suivants :

- Hydroxyde des bases libre OH<sup>-</sup> ;
- carbonate CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> ;
- Hydrogénocarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ;
- Hydrogénosilicate HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup> ;
- ainsi que deux des trois valences des ions ortho phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>).

On peut alors écrire :

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{HSiO}_3^-] + (2*[\text{PO}_4^{3-}])/3$$

#### ✓ Titre alcalimétrique simple (TA)

Ce titre mesure la totalité des bases libres, une des deux valences des ions carbonates et une des trois valences des ions ortho phosphate. On peut ainsi écrire :

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

### I.3.4.4. La salinité totale

La salinité totale est la somme de toutes les concentrations des substances minérales dissoutes dans l'eau. Il existe de nombreuses sources de minéralisation (sédiment de roches, argiles, sable,...). La notion de salinité est importante particulièrement pour les eaux de mer et

certaines eaux industrielles, en effet elle permet de procéder à un choix optimal du traitement d'ionisation [10].

#### I.3.4.5. Solubilité des gaz dans l'eau

L'eau contient toujours des gaz dissous dont les concentrations dépendent notamment de la température ainsi que de la composition et de la pression de l'atmosphère gazeuse avec laquelle elle est en contact. La loi d'HENRY appliquée à la solubilité des gaz dans l'eau pure, prévoit que, la concentration dissoute d'un composé gazeux dans l'eau est directement proportionnelle à la pression partielle de ce composé dans la phase gazeuse au contact de l'eau [11].

#### I.3.4.6. Cations et anions

Les eaux douces, qu'elles soient d'origine souterraine ou superficielle sont plus ou moins minéralisées par des sels naturels. Il est souvent très important de connaître précisément cette minéralisation en plus des indications données par les paramètres globaux de type « titre » et « potentiel ». Par ailleurs, certains des cations et anions minéraux naturels présents dans les eaux sont considérés comme indésirables ou toxiques selon l'usage auquel l'eau douce est destinée (domestique, agricole, industriel, santé, tourisme, refroidissement...) [11].

##### ❖ Le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

L'ion calcium est le composé principal de la dureté de l'eau, il se trouve en général à une concentration de 5-500mg/l exprimé en  $\text{CaCO}_3$  (2-200mg en  $\text{Ca}^{2+}$ ) [12].

##### ❖ Le Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

La dureté magnésienne de l'eau représente ordinairement le tiers de la dureté totale, les deux tiers restants correspondent à la dureté calcique, sa valeur est de 10 à 50 mg/l (environ 40-200 mg /l en  $\text{CaCO}_3$ ) [12].

##### ❖ Les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

L'ion de bicarbonate est le principal constituant alcalin de la plupart des eaux courantes. On le trouve souvent à une concentration de 5-500 mg/L exprimée en  $\text{CaCO}_3$  [12].

##### ❖ Le Chlore ( $\text{Cl}^-$ )

Puisque tous les sels du chlore sont très solubles dans l'eau, le chlore est fréquent dans les réserves d'eau douce à un taux de 10 à 100 mg /l [12].

##### ❖ Les nitrates et les nitrites

Ces paramètres sont des indicateurs pertinents de la dégradation des ressources en eau utilisée pour la production d'eau potable. La présence de nitrates dans l'eau d'alimentation peut avoir plusieurs origines :

- ✓ Une origine liée aux activités humaines (rejets industriels, agricoles et urbains) ;

- ✓ une origine naturelle dans la mesure où les nitrates résultent des transformations de l'azote dans les eaux et les sols (cycle de l'azote).

Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), présent dans l'eau et le sol, qui est oxydé en nitrites par les bactéries du genre "Nitrosomonas", puis en nitrates par les bactéries du genre 'Nitrobacter'. Les nitrates sont très solubles dans l'eau, ils peuvent être à l'origine de la formation de nitrites et de nitrosamines, responsables de deux phénomènes potentiellement pathologiques: la méthémoglobinémie et le risque de cancer [13].

❖ **La silice ( $\text{SiO}_2$ )**

La silice peut exister dans les eaux sous deux états différents : soluble et colloïdal.

La silice soluble dans les eaux naturelles et majoritairement sous forme d'hydroxyde de silice ( $\text{SiOH}_4$ ), elle tend à se polymériser et à donner des colloïdes. Les silicates sont peu solubles dans l'eau et se présentent à des pH élevés, supérieurs à 10. Leur teneur dans l'eau varié de 1 à 50 mg/l [14].

❖ **Le Fer**

Le fer est l'un des métaux les plus abondants dans la croûte terrestre. Il se trouve dans l'eau douce naturelle à des niveaux allant de 0,5 à 50 mg /litre. Le fer peut également être présent dans l'eau de boisson à la suite de l'utilisation de coagulants de fer ou de la corrosion de l'acier et des tuyaux en fonte pendant la distribution de l'eau .Le fer présent dans l'eau potable est un élément essentiel dans la nutrition humaine.[15]

**Tableau I.1:** Les substances existantes dans une eau brute.

ETAT DES ELEMENTS	NATURE DES ELEMENTS								
<b>En suspension</b>	Sables, argiles boues diverses-Débris divers insolubles								
<b>En émulsion</b>	Matières organiques, colloïdales-huiles minérales, goudrons-suies pétrole-argiles colloïdales.								
<b>Matières solubilisées</b>	Tourbes-déchets, végétaux-matières azotées. Produits de synthèse organique solubles.								
<b>Sels minéraux</b>	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;">                     BICARBONATES. <math>\text{HCO}_3^-</math>                      CARBONATES. <math>\text{CO}_3^{2-}</math>                      SULFATES. <math>\text{SO}_4^{2-}</math>                      CHLORURES. <math>\text{Cl}^-</math>                      NITRATES. <math>\text{NO}_3^-</math> </td> <td style="width: 10%; border: none; text-align: center;">                     }                 </td> <td style="width: 40%; border: none;"> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none;">CALCIUM ;<math>\text{Ca}^{++}</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">MAGNESIUM.<math>\text{Mg}^{++}</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">SODIUM. <math>\text{Na}^+</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">POTASSIUM. <math>\text{K}^+</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">AMMONIUM. <math>\text{NH}_4^+</math></td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	BICARBONATES. $\text{HCO}_3^-$ CARBONATES. $\text{CO}_3^{2-}$ SULFATES. $\text{SO}_4^{2-}$ CHLORURES. $\text{Cl}^-$ NITRATES. $\text{NO}_3^-$	}	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none;">CALCIUM ;<math>\text{Ca}^{++}</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">MAGNESIUM.<math>\text{Mg}^{++}</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">SODIUM. <math>\text{Na}^+</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">POTASSIUM. <math>\text{K}^+</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">AMMONIUM. <math>\text{NH}_4^+</math></td> </tr> </table>	CALCIUM ; $\text{Ca}^{++}$	MAGNESIUM. $\text{Mg}^{++}$	SODIUM. $\text{Na}^+$	POTASSIUM. $\text{K}^+$	AMMONIUM. $\text{NH}_4^+$
BICARBONATES. $\text{HCO}_3^-$ CARBONATES. $\text{CO}_3^{2-}$ SULFATES. $\text{SO}_4^{2-}$ CHLORURES. $\text{Cl}^-$ NITRATES. $\text{NO}_3^-$	}	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none;">CALCIUM ;<math>\text{Ca}^{++}</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">MAGNESIUM.<math>\text{Mg}^{++}</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">SODIUM. <math>\text{Na}^+</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">POTASSIUM. <math>\text{K}^+</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">AMMONIUM. <math>\text{NH}_4^+</math></td> </tr> </table>	CALCIUM ; $\text{Ca}^{++}$	MAGNESIUM. $\text{Mg}^{++}$	SODIUM. $\text{Na}^+$	POTASSIUM. $\text{K}^+$	AMMONIUM. $\text{NH}_4^+$		
CALCIUM ; $\text{Ca}^{++}$									
MAGNESIUM. $\text{Mg}^{++}$									
SODIUM. $\text{Na}^+$									
POTASSIUM. $\text{K}^+$									
AMMONIUM. $\text{NH}_4^+$									
<b>GAZ</b>	OXYGENE. AZOTE. GAZ CARBONIQUE. AMMONIAC								
<b>Organismes vivants</b>	Plancton. Algues. Champignons. Vers. Larves. Bactéries. Amibes. Germes, virus								



***CHAPITRE II :***  
***Différents procédés***  
***De l'eau ultrapure***

## Chapitre II

### II. L'eau ultrapure

#### Introduction

Lorsque l'on s'intéresse à l'eau ultrapure, on découvre un vaste domaine, en termes de qualité d'eau, en termes d'applications, mais aussi en termes de procédés d'obtention. Aussi, nous présenterons dans un premier temps quelques définitions et domaines d'utilisation de l'eau, ainsi qu'un exemple de procédé de « fabrication ».

#### II.1. Définition

Une définition théorique de l'eau ultrapure pourrait être celle d'une « eau » ne contenant que des molécules  $H_2O$ , en équilibre avec des ions  $H^+$  et  $OH^-$  en très faibles teneurs ( $10^{-7}$  mol/l à 25 °C) lui assurant une neutralité (pH=7).

Dans la pratique, on appelle généralement « eau ultrapure », une eau contenant moins de 1µg/kg (ppb) d'impuretés ioniques ainsi qu'un très faible taux de particules et contaminants microbiens [17].

En fait, la notion d'eau « ultrapure » est relative; chaque industrie a en effet ses normes qui évoluent en permanence. Dans ces normes, les eaux sont caractérisées par un ensemble de paramètres, que nous allons présenter dans un premier temps, en indiquant les techniques de mesure correspondantes.

#### II.2. Description des procédés de la production d'eau ultra pure :

Les procédés d'obtention d'eau ultrapure sont constitués d'un enchaînement d'opérations unitaires. Les procédés les plus couramment employées sont : la microfiltration, l'ultrafiltration, l'osmose inverse, l'adsorption sur charbon actif, la stérilisation par rayonnement ultraviolet, l'échange d'ions et l'électrodéionisation.

L'enchaînement de ces opérations dépend de la qualité d'eau brute, la qualité à atteindre, les contraintes d'exploitation, et notamment les contraintes économiques.

Nous avons choisi de présenter deux systèmes de production de l'eau ultra pure afin de décrire la logique de l'enchaînement et le rôle joué par chacune des opérations unitaires. Les systèmes choisis sont illustrés sur les figures (II.1 et II.2).

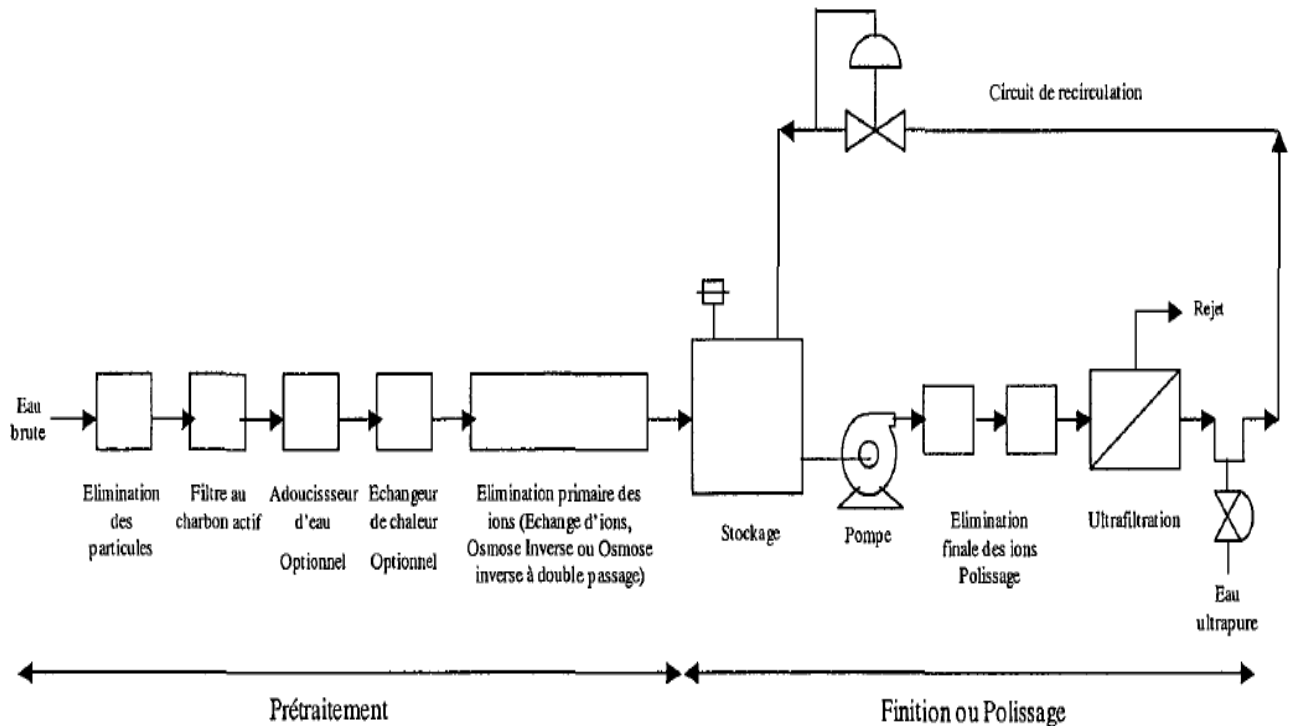
La première étape dans ces systèmes est un prétraitement, elle permet d'éliminer les contaminants qui risquent de perturber les traitements ultérieurs; on cite la clarification pour éliminer les matières en suspension, notamment les particules colloïdales, la décarbonatation à la chaux pour réduire la dureté de l'eau, une désinfection au chlore ou à la chloreamine, pour détruire les bactéries et les particules organiques, une filtration sur sable pour la rétention



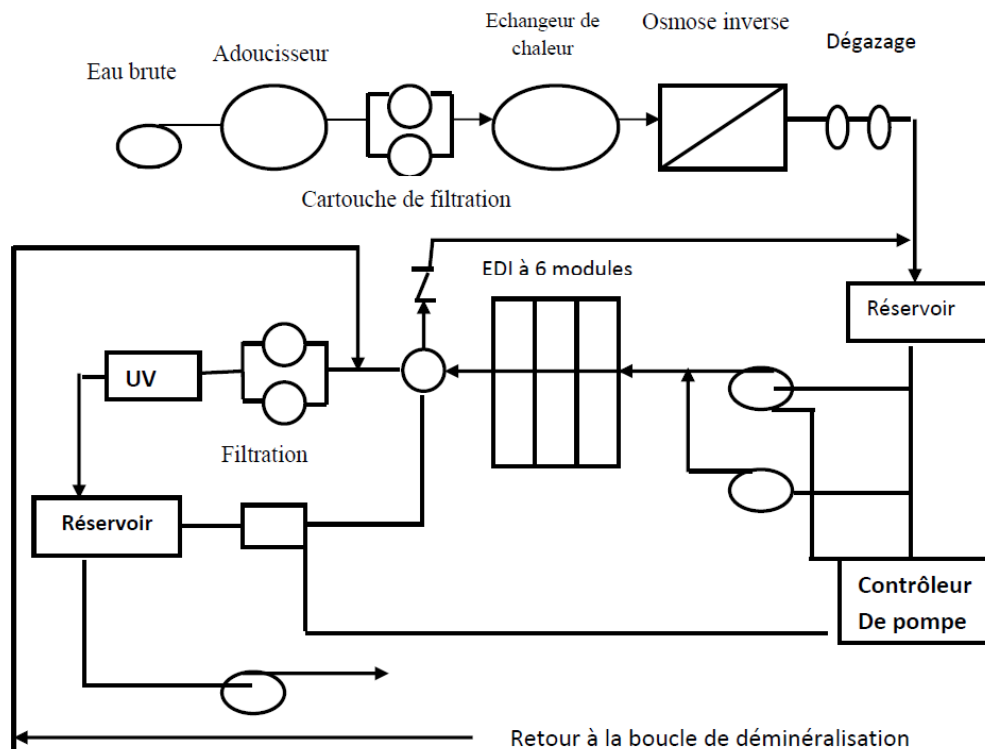
particulière ainsi qu'une adsorption sur charbon actif, qui est presque incontournable pour enlever le chlore et les matières organiques.

L'étape suivante est l'osmose inverse qui élimine 90 à 99 % de tous les contaminants présents dans l'eau. Elle constitue donc le cœur d'un système de purification, elle est associée à un stockage qui permet de satisfaire des débits importants ou des besoins réduits.

L'eau obtenue par osmose inverse présente encore une salinité résiduelle non négligeable nécessitant un polissage sur résine à lit mélangé ou par électrodésionisation. Pour assurer l'affinage fin de l'eau, le système comporte également des microfiltres et des postes d'UV. Il convient de signaler que la qualité de l'eau obtenue ne peut être maintenue qu'en recyclant l'eau à travers divers procédés de purification, via le réservoir de stockage. Il est évident qu'il s'agit ici d'une présentation non exhaustive et qu'il existe d'autres combinaisons de procédés donnant la même qualité de l'eau [18].



**Figure II.1 :** Schéma d'un procédé d'ultra purification [19]



**Figure II.2 :** Schéma d'installation de production de l'eau ultrapure appliquée à l'industrie des semi-conducteurs [18].

### II.3. Contrôle de la qualité de l'eau ultrapure

Pour contrôler la qualité de l'eau ultrapure, outre les analyses en laboratoire, on utilise l'une des méthodes de mesure en continu suivantes : conductivité électrique, carbone organique total (TOC), valeur du pH et le cas échéant mesure de corpusculaires.

La mesure de conductivité permet de détecter les impuretés présentes sous forme ionique. Parmi ces impuretés, on trouve en premier lieu des ions inorganiques comme par exemple  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ... etc. mais également des ions organiques comme par exemple des acides de carbone dissociés.

La mesure de la conductivité ne détecte pas les impuretés organiques non chargées. La mesure TOC comble cette lacune. Il y a différentes façons d'appliquer la méthode TOC. Toutes les méthodes reposent sur le fait que l'on oxyde des composés organiques en  $\text{CO}_2$  et que l'on mesure la quantité de  $\text{CO}_2$  créé.

En plus des mesures de conductivité, la variation de la valeur du pH permet de détecter les impuretés acides ou alcalines.

La mesure de particules par diffusion d'un laser permet de détecter les particules particulièrement gênantes pour la production de semi-conducteurs.

#### II.4. Intérêt d'utilisation de l'eau ultrapure

La production d'eau pure est importante pour les industries qui nécessitent une qualité élevée d'eau. Ce type d'eau est généralement utilisé dans les industries pharmaceutiques, agroalimentaires, semi-conducteurs, et de la microélectronique, où on la dénomme eau ultrapure.

Comme nous intéressent à une industrie agroalimentaire pour produire de l'électricité, donc cette eau est destinées à la production de la vapeur d'eau par les chaudière haute pression.

Cette qualité d'eau soit exigé afin d'éviter toute phénomène d'entartrage et corrosion soit caustique, acide dans les chaudières et les conduites de canalisation (tuyauterie).

##### ➤ Entartrage

L'entartrage est un dépôt de sels minéraux qui a tendance à se former sur les surfaces d'échanges. A cause des ions présents dans les eaux salines (calcium, magnésium, bicarbonates et sulfates).

Ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ; de L'hydroxyde de magnésium ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) et de sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ )....etc.

##### ➤ La corrosion :

La corrosion est la dégradation d'une substance, en particulier un métal ou un alliage, provoquée par l'action chimique d'un liquide ou d'un gaz sur la substance. Le terme corrosion s'applique plus particulièrement à l'action graduelle d'agents naturels, tels que l'air ou l'eau salée sur les métaux. [16]

Les principales conséquences de la corrosion sont :

- ✓ Rupture des conduites
- ✓ Augmentation de la rugosité
- ✓ Fuites d'eau

##### ➤ La corrosion caustique dans les chaudières :

La concentration en caustique ( $\text{NaOH}$ ) peut se produire en raison d'un étouffement de vapeur ou par ébullition localisée sous les dépôts poreux sur la surface des tuyauteries. La corrosion caustique se produit et dissolvent la couche de protection magnétique ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), entraînant des pertes du métal de base et, éventuellement des ruptures.

##### ➤ Corrosion acide dans les chaudières :

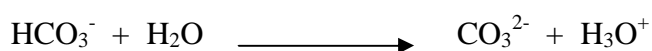
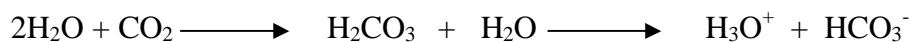
Une eau d'alimentation à faible pH peut causer une attaque acide sur la surface des métaux dans les systèmes de préchauffage et de chaudière. L'eau d'alimentation peut aussi devenir acide à cause de contamination du système.

➤ **L'attaque par l'oxygène dans les chaudières :**

Sans une désaération mécanique et chimique adaptée, l'oxygène de l'eau d'alimentation entre dans la chaudière. La plupart est dégagée avec la vapeur ; le reste peut attaquer le métal des chaudières. L'oxygène de l'eau entraîne une corrosion par piqure qui est très sévère du fait de son aspect localisé. L'eau contenant de l'ammoniaque, attaque aisément le cuivre et les alliages de cuivre. Le résultat de cette corrosion conduit à des dépôts sur la surface de transfère de chaleur de la chaudière et réduit ainsi son efficacité et sa fiabilité.

➤ **L'attaque par le dioxyde de carbone dans les chaudières :**

Le CO<sub>2</sub> existe dans les solutions aqueuses en tant que dioxyde de carbone libre et sa décomposition forme des ions carbonates et bicarbonates. La corrosion est le principal effet du CO<sub>2</sub> dissout. Le gaz se dissoudra dans l'eau, produisant de l'acide carbonique corrosif :



## II.5. Performances actuelles du traitement de l'eau ultrapure

L'eau ultrapure est caractérisée par des spécifications quantitatives qui décrivent son niveau de pureté. Ces spécifications sont stipulées par les normes ASTM.

Les normes les plus couramment utilisées, ASTM D1193-6, sont résumées dans les tableaux ci-dessous.

**Tableau II.1 :** Normes d'eaux ultrapures selon l'ASTM.

Unité de mesure	Eau ultrapure
Résistivité (MΩ.cm) à 25 °C	>18
Conductivité (µS/ cm)	0,055
Carbone organique total (COT) en (ppb)	<1
Chlorure Cl <sup>-</sup> en (ppb)	< 1
Silice total SiO <sub>2</sub> (ppb)	< 0,5
Oxygène O <sub>2</sub>	<10
Sodium Na <sup>+</sup> en (ppb)	< 1
Bactéries (UFC/ml)	<1

## II.6. Les procédés membranaires classiques

### II.6.1. Généralités

Les procédés membranaires, utilisés depuis quelques années dans l'industrie (agroalimentaire, peinture, dessalement...), tendent à se développer actuellement dans le traitement des eaux.

Le principe consiste à faire circuler une solution à travers une paroi mince (membrane semi-perméable) (figure II.3) sous l'effet d'une force motrice (pression, concentration, champ électrique) en arrêtant certaines molécules et en laissant passer d'autres.

La sélection peut s'effectuer :

- ✓ Soit par la taille des pores,
- ✓ Soit par des critères d'affinité entre molécules ou ions et la membrane.

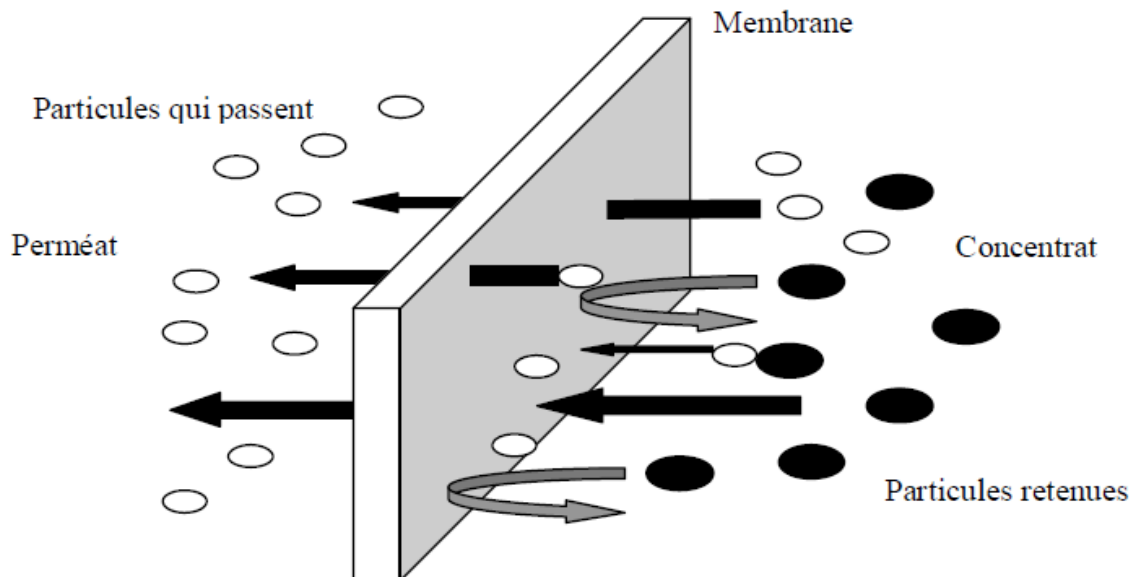


Figure II.3 : Membrane sélective [20].

### II.6.2. Les procédés membranaires classiques à flux croisé/ flux tangentiel :

Les membranes peuvent être utilisées en filtration selon deux fonctionnements principaux. La filtration frontale ou croisé (Dead end) ou la filtration tangentielle (Cross flow). Ces deux modes sont très importants et correspondent à deux technologies et deux approches complètement différentes de la filtration.

#### II.6.2.1. La filtration frontal

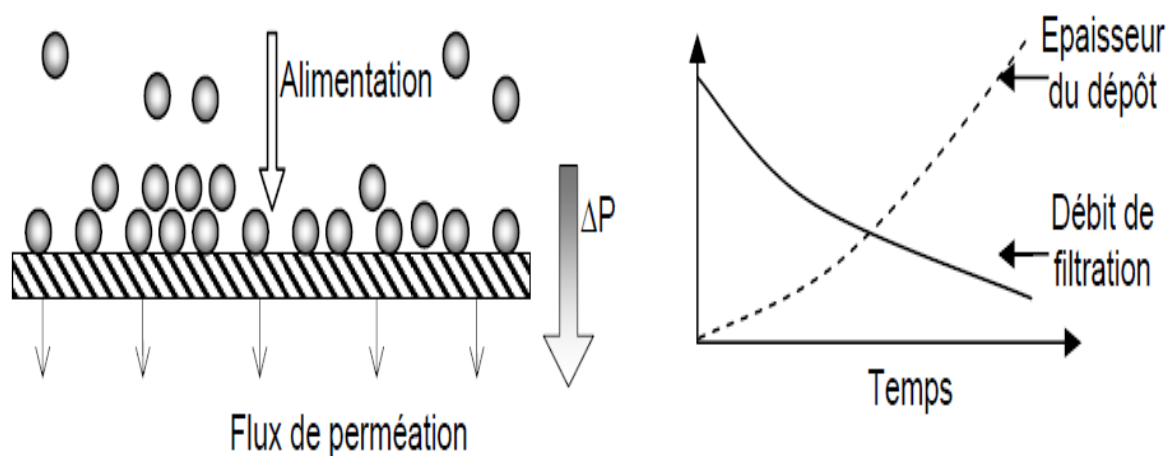
La plus simple à mettre en œuvre et la moins onéreuse est la filtration frontale dont le principe est de filtrer la solution perpendiculairement à la surface de la membrane (Figure II.4).

Toute la matière retenue s'accumule sur la membrane. Ce type de procédé n'atteint jamais un état stationnaire. La filtration frontale est une technique qui nécessite un faible investissement, et des coûts énergétiques de fonctionnement qui sont faibles par rapport à la filtration tangentielle. Par contre, ce type de fonctionnement permet essentiellement de filtrer des suspensions qui sont considérées comme faiblement colmatantes dans un secteur d'activité donné.

En effet, si la solution est fortement colmatante, le dépôt devient tel que les flux deviennent trop faibles pour que l'opération puisse fonctionner avec des débits raisonnables. Cette technique est utilisée en traitement de l'eau pour sa potabilisation, mais aussi dans le secteur médical pour enlever toutes traces de virus ou de bactérie d'une eau de type « eau du réseau » qui est faiblement colmatante.

Dans ce dernier domaine la filtration frontale est aussi appréciée du fait que cette technologie est compacte et donc plus facilement stérilisable qu'un circuit qui fait intervenir plusieurs pompes.

La filtration tangentielle est par contre utilisée quasi systématiquement lorsque les fluides ont des taux de matière en suspension élevés [21].



**Figure II.4 :** Présentation du fonctionnement de la filtration frontale [21].

### II.6.2.2. La filtration tangentielle

En filtration tangentielle, le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane avec une vitesse moyenne  $V$ , imposant ainsi un gradient de cisaillement à la surface de la membrane qui limite ainsi l'accumulation de matière. En filtration tangentielle lors d'un changement de pression, les espèces arrivant près de la membrane ainsi que le dépôt (dans le cas où il y en a un) mettent un certain temps à se construire, durant cette phase, le flux décroît (Figure II.5). Ensuite, un équilibre peut être atteint et le flux peut se stabiliser dans un état stationnaire. La filtration

tangentielle est souvent utilisée en industrie car elle permet de travailler une fois que le régime est établi (entre quelques minutes et quelques heures) avec un flux de perméation à peu près constant.

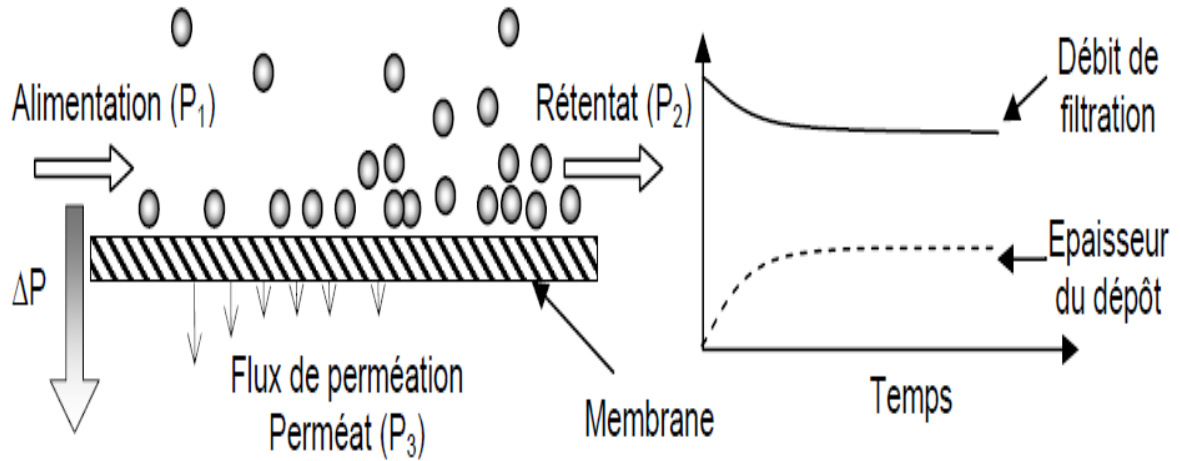


Figure II.5 : Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle [21].

Les techniques membranaires à gradient de pression se reposent sur une différence de pression totale de part et d'autre de la membrane, appelée pression transmembranaire.

Ces procédés membranaires barométriques, peuvent être classifiés en fonction de la membrane utilisée et de coupure en microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, et osmose inverse comme présenté sur la figure (II.6).

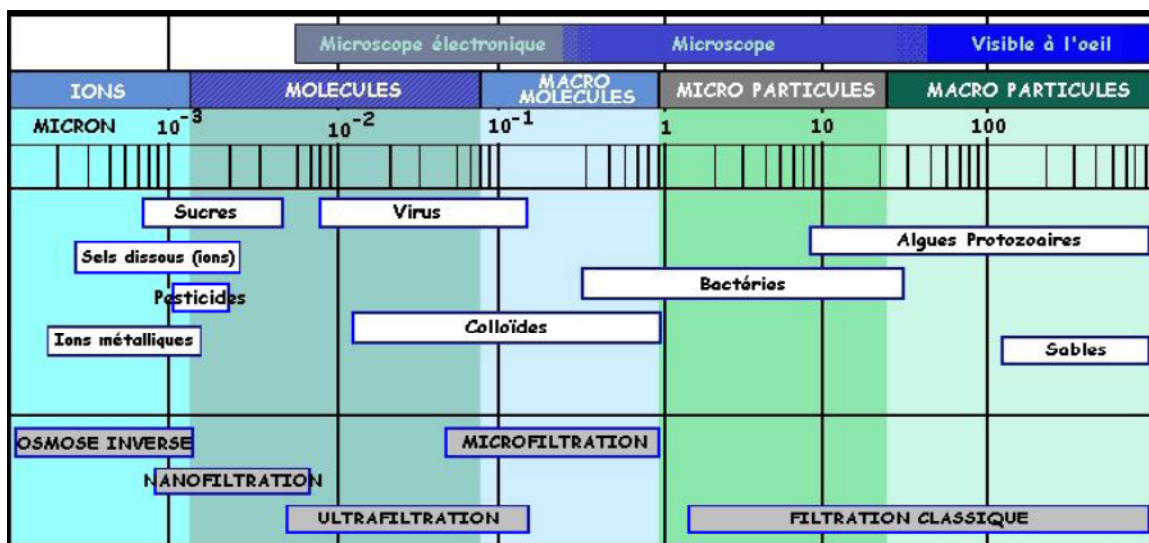


Figure II.6 : Classement des différents procédés membranaires [20].

### II.6.3. Microfiltration et Ultrafiltration

#### II.6.3.1. La microfiltration

C'est la plus ancienne et la plus répandue des techniques membranaires. Elle est née en Allemagne au début du siècle et s'est développée vers 1945, à la faveur des besoins urgents en analyses bactériologiques des eaux [22].

Elle est définie comme un procédé de séparation solide/liquide. Le mécanisme est basé sur l'effet tamis (taille) et rend possible la rétention de particules en suspension ou de bactéries dont la taille se situe entre 0.1 et 10  $\mu\text{m}$ . Les pressions appliquées sont de quelques dixièmes de bar pour éviter un colmatage important. [23]

Les membranes les plus utilisées sont poreuses en polyamide ou polypropylène, ou encore inorganiques (en oxyde métallique ou céramique).

En flux frontal direct, la totalité du fluide est pompé à travers la membrane pendant que le retentât s'accumule à la surface formant un gâteau, dont l'épaisseur dépend du temps de filtration. Quand le débit du filtrat n'atteint plus le débit nominal aux valeurs maximales de pression transmembranaire, le gâteau doit être retiré. Cela impose un travail en mode discontinu. Par contre, en flux tangentiel, la solution circulant parallèlement à la paroi à une vitesse de 0,5 à 5m/s imprimée par un système de pompes, cela limite la formation d'une couche obstruant les pores du simple fait du régime de l'écoulement; cela permet de travailler en continu. De plus, perméat et retentât peuvent être récupérés.

#### II.6.3.2. L'ultrafiltration

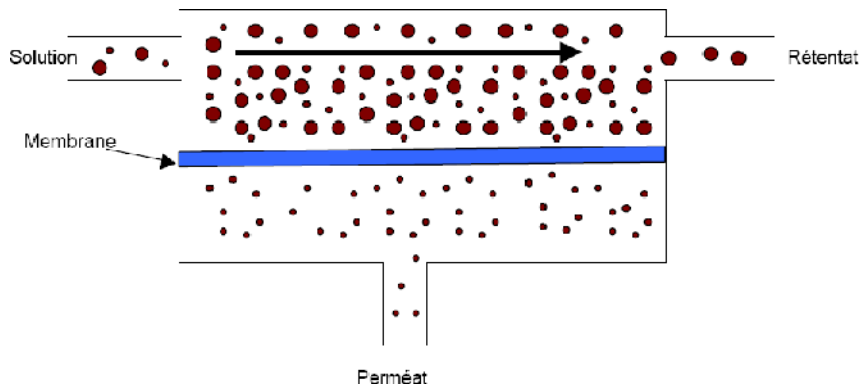
On peut la définir comme un procédé de séparation en phase liquide, par perméation à travers une membrane permselective sous l'effet d'un gradient de pression. La séparation est principalement en fonction de la taille des particules dispersées dans la solution (quelques dizaines à quelques centaines d'angströms  $\text{Å}$ ) et de leur masse moléculaire (elle se situe entre 500 et  $10^6$  daltons). L'ultrafiltration concerne donc les colloïdes, les macromolécules synthétiques et naturelles, les virus...etc. La taille des pores des membranes est comprise entre 1 et 100 nm [24].

Cette technique s'est développée au début des années 60, grâce à la découverte par Loch et Sourirajan d'un nouveau type de membrane à structure anisotropique [25]. Elle a alors pu être adoptée par de nombreux laboratoires de recherche scientifique, ainsi que dans l'industrie pharmaceutique et agro-alimentaire, avant de gagner aujourd'hui le marché de l'environnement.



Selon le mode de circulation du solvant, on distingue l'ultrafiltration frontale (la solution circule perpendiculairement à la membrane) et l'ultrafiltration tangentielle (la solution circule tangentiellement à la membrane). Cette dernière est la plus performante car le colmatage des membranes se trouve ainsi réduit.

L'ultrafiltration permet d'atteindre trois objectifs : la concentration de solutions macromoléculaires ; la rétention de macrosolutés ; le fractionnement, par élimination des petits solutés [26].



**Figure II.7** : Principe de l'ultrafiltration [22].

#### II.6.4. Nanofiltration

La nanofiltration est un procédé de séparation membranaire plus récent (1990) qui se situe à la transition entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration tant au niveau du seuil de coupure (200 à 1000 Dalton) qu'au niveau de la pression transmembranaire (5 à 25 bar). Comparée à l'osmose inverse, les membranes de nanofiltration possèdent une structure moins dense qui permet d'obtenir des flux de perméation supérieurs pour des pressions inférieures. Ce procédé sera moins coûteux car il impliquera une consommation d'énergie moindre.

Comparées aux membranes d'ultrafiltration, les membranes de nanofiltration ont une structure de pores plus resserrée et peuvent, de ce fait, rejeter les petites molécules organiques ayant un poids moléculaire de seulement 200 - 300 Dalton. Ce procédé permettra l'obtention d'un perméat moins polluant dont la demande chimique en oxygène DCO sera plus faible, par exemple.

Les membranes de nanofiltration possèdent également une sélectivité spécifique vis à vis des espèces ioniques, une rétention plus faible des co-ions monovalents que des co-ions divalents et une forte rétention globale pour les sels minéraux à faible concentration (jusqu'à dilution infinie).

### II.6.5. L'Osmose inverse

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer le solvant et arrêtent tous les sels. Pour comprendre l'osmose inverse, expliquons tout d'abord le phénomène d'osmose. C'est un phénomène naturel qui se produit lorsqu'on sépare une solution diluée d'une solution concentrée par une membrane semi-perméable. L'eau sous l'action d'une force générée par le gradient de concentration passe à travers la membrane de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée. La différence de concentration crée une pression, appelée pression osmotique.

Ce passage se fait alors jusqu'à ce que les deux solutions soient identiques. Si une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée du côté de la solution concentrée, le sens normal du flux osmotique est inversé ; l'eau passe à travers la membrane de la solution la plus concentrée vers la solution la moins concentrée. C'est le principe de l'osmose inverse (figure II.8). La pression osmotique est d'autant plus impotente que la concentration est élevée. Cette technique est utilisée pour :

- Le dessalement de l'eau de mer
- Le dessalement des eaux saumâtres
- La production d'eau ultrapure
- La production d'eau de procédé (eau osmose)

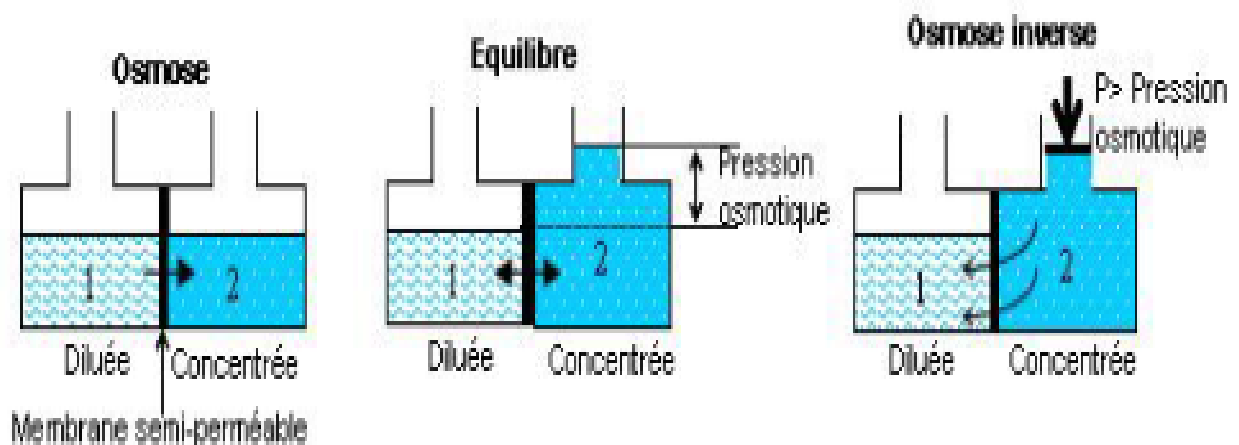


Figure II.8 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [28].

L'OI apparaît comme une solution pour le traitement de certains effluents. La technologie est encore parfois considérée à risque à cause des pressions à exercer. Il existe tout de même des

applications ou la valeur des espèces récupérées ou l'enjeu économique accompagnant les rejets polluants justifié le coût du procédé.

C'est le cas de traitement des effluents de papeterie par exemple. Il contient beaucoup de matière organique donnant une DCO (demande chimique en oxygène) élevée. Mais la présence de composé organochlorés empêche tout traitement biologique à cause de leur forte toxicité envers les bactéries. La séparation par UF n'est que faiblement efficace à cause des faibles masses moléculaires de ces composés.

L'utilisation de l'OI permet d'obtenir une eau de bonne qualité qui peut être soit recyclée comme eau de lavage ou envoyée dans le réseau d'eau pluviale. Le niveau de pollution est ainsi largement abaissé. Par contre le retentât n'est qu'un déplacement de pollution. Pour que la réponse soit complète il faut aussi le traiter. Sur ce point les papetiers cherchent aussi d'autres voies en améliorant les procédés de blanchiment par l'élimination de chlore au profit de l'ozone [29].

#### II.6.6. Avantages et inconvénients des procédés

Ces procédés membranaires possèdent par rapport aux méthodes classiques de gros avantages :

- ils ne nécessitent pas l'utilisation d'extractants chimiques ;
- pas de changement de phase ;
- économie d'énergie ;
- ils permettent de travailler à température ambiante (et sont donc utilisables pour récupérer des molécules fragiles) ;
- ils sont simples à automatiser.

Ils présentent, par contre, quelques inconvénients dont les principaux sont :

- le colmatage se traduisant par une baisse de performances (diminution de la perméabilité, modification de la sélectivité),
- la durée de vie liée à la perte de résistance mécanique, qui peut être dû à des nettoyages fréquents ou à l'utilisation des réactifs concentrés (acides, bases, détergents...).

##### II.6.6.1. Colmatage des membranes

Le colmatage des membranes est le problème le plus aigu des problèmes rencontrés en filtration membranaire des eaux brutes [30], sur les indicateurs de colmatage [31] ou sur les mécanismes de colmatage [32].

Le colmatage découle de l'accumulation de matière à la surface des membranes. Quand un système membranaire fonctionne à pression transmembranaire constante, la conséquence la plus

problématique du colmatage est une diminution, parfois extrêmement accentuée, du flux du perméat.

D'autres conséquences directe ou indirecte du colmatage sont une diminution de la vie active des membranes, des lavages plus fréquents, et donc des consommations de produit chimiques plus importantes et la gestion/disposition des eaux brutes, et des dépenses supplémentaires d'énergie pour compenser la baisse de perméabilité des membranes causée par le colmatage [33].

Le produit du colmatage (gâteau) équivaut à une résistance supplémentaire à l'écoulement à travers la membrane. Le colmatage peut aussi influencer le pouvoir de séparation d'une membrane en agissant, par exemple, comme une deuxième membrane qui se superpose à la membrane originale.

L'accumulation de matière peut se faire à la surface d'une membrane, les particules peuvent bloquer ses pores, et, dans le cas d'une membrane ayant des pores suffisamment grands par rapport aux substances présentes dans l'eau à traiter, il peut y avoir une adsorption et/ou dépôt de substances calmatantes sur la paroi interne de pores. Dans les modèles de colmatage proposés par plusieurs auteurs, de façon générale, les chercheurs considèrent qu'il y a d'abord un blocage/obstruction de pores, suivi par la croissance d'un gâteau à la surface de la membrane. Ce gâteau se caractérise par une porosité propre, par une résistance spécifique opposé à l'écoulement à travers la membrane, une cohésion, une densité spécifique, et une granulométrie plus ou moins homogène [34].

En effet, un très large spectre d'espèces peut contribuer au colmatage, comme des macromolécules organiques, des substances organiques et inorganiques dissoutes, des particules colloïdales, des particules en suspension et des microorganismes.

La partie de colmatage qui peut être enlevée par lavage est appelée « colmatage réversible ». Le colmatage qui correspond à la perte « définitive » d'une partie de la perméabilité est généralement appelé « colmatage irréversible ». A priori, ce type de colmatage est essentiellement dû à une forte adsorption de substances qui ont une grande affinité pour la membrane. A noter que le caractère réversible du colmatage est très relatif aux moyens qui sont mis en œuvre pour laver les membranes.

Parmi les substances organiques colmatantes lors de la filtration membranaire des eaux brutes, un intérêt particulier est porté à la matière organique naturelle en particulier aux substances humiques constituées de macromolécules qui possèdent un noyau hydrophobe et des groupements anioniques [35].

### II.6.6.2. Contrôle du colmatage et de la polarisation de concentration

Au cours du temps, on assiste à une accumulation des molécules à la surface de la membrane, se traduisant expérimentalement par une diminution du flux de perméat. Ce phénomène réversible est appelé polarisation primaire ou polarisation de concentration.

La conséquence du colmatage et de la polarisation de concentration est toujours la réduction des performances. L'étendue des dommages est spécifique et dépend beaucoup de l'application. Aussi, la méthode pour réduire le colmatage et la polarisation peut être seulement décrite en général à cause de la complexité des phénomènes. Toutefois, les méthodes peuvent être classées en quatre catégories :

- le prétraitement de la solution d'alimentation,
- l'ajustement ou l'adaptation des propriétés des membranes,
- le nettoyage des membranes,
- l'amélioration des conditions opératoires.

Elles peuvent être appliquées une à une successivement. Quelquefois une opération suffit. Cela dépend du procédé et de la solution à traiter [36].

### II.7. Les procédés électromembranaires

Les procédés électromembranaires concernent les transferts de matière en solution effectués par l'action conjointe des membranes échangeuses d'ions et d'une énergie électrique. Les techniques électromembranaires voient depuis quelques années leurs champs d'applications potentielles s'élargir de façon importante. Ceci s'explique par l'apparition sur le marché de nouvelles générations de membranes présentant une résistance chimique améliorée. La force motrice dans un procédé électromembranaire est le gradient du potentiel électrique qui provoque un courant électrique et la séparation des espèces ioniques. Ces techniques électromembranaires sont aujourd'hui nombreuses, on peut citer :

- L'électrodialyse
- L'électrodéionisation

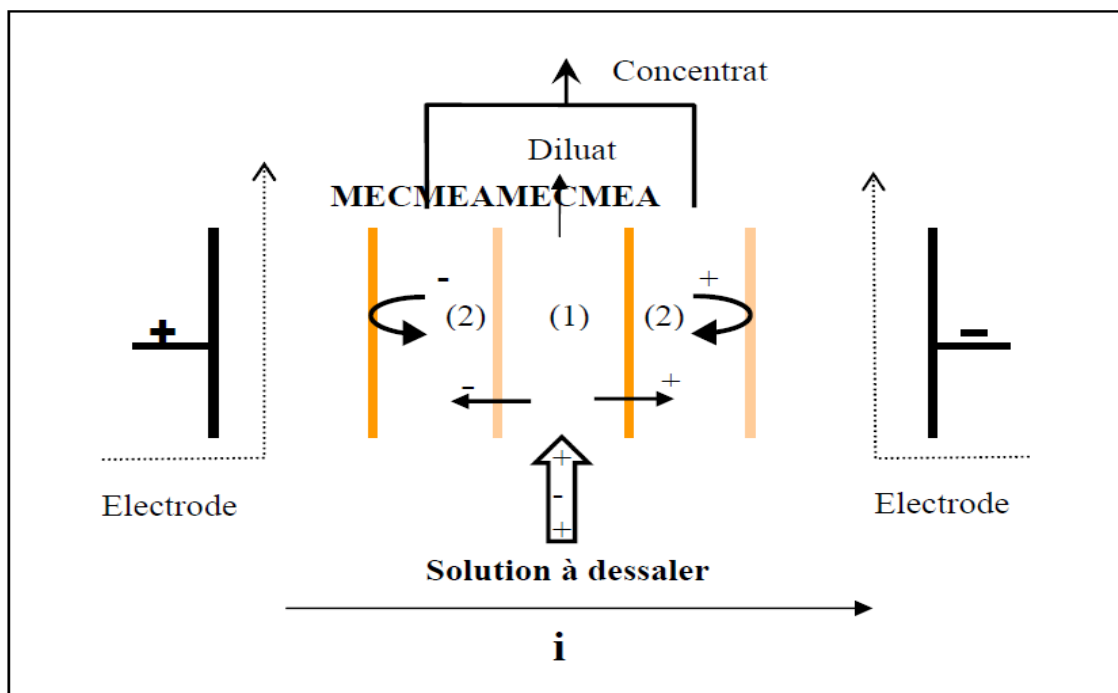
#### II.7.1. L'électrodialyse

L'électrodialyse est une technique séparative dans laquelle des espèces ionisées minérales ou organiques sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'une différence de potentiel électrique. C'est la technique séparative la plus répandue parmi celles qui font intervenir les MEI. Sous l'effet du champ électrique perpendiculaire au plan des membranes et au sens de circulation des solutions, les cations migrent vers la cathode en traversant les

membranes échangeuses de cations (MEC) et les anions migrent vers l'anode en traversant les membranes échangeuses d'anions (MEA) [38].

Le principe de l'électrodialyse à compartiments multiples est illustré par la figure (II.9). Grâce à la disposition alternée des membranes, les cations sont arrêtés par les MEA, et réciproquement; il en résulte une augmentation de la concentration des compartiments de même parité appelés compartiment de concentration ou concentrât et un abaissement de la concentration dans les compartiments adjacents appelés compartiment de dilution ou diluât.

L'électrodialyse permet donc d'épurer en électrolyte les solutions du compartiment de dilution et de concentrer celles du compartiment de concentration. Les compartiments sont alimentés en série du point de vue électrique et en parallèle du point de vue hydraulique [39].



**Figure II.9 :** principe de l'électrodialyse.

## II.8. Définition et avantage de la technique de l'électrodéionisation

L'électrodéionisation est un procédé de purification et de séparation ionique associant l'emploi des résines échangeuses d'ions et des membranes d'électrodialyse.

L'électrodialyse seule ne peut que difficilement être appliquée dans le cas de solutions diluées de concentration de l'ordre de la ppm en raison de leur trop forte résistance. Cela limite la valeur du courant électrique qui peut être appliqué, ce qui entraîne une augmentation de la surface de membrane requise, et donc un coût élevé de l'installation.

Pour faire face à cette difficulté, des matériaux échangeurs d'ions, plus conducteurs que la solution à traiter, sont introduits dans le compartiment diluât. Il apportant en effet une

conductivité ionique qui permet de réduire la résistance électrique et d'augmenter la surface disponible pour l'échange d'ions. Ce procédé possède à la fois les avantages liés aux résines échangeuses d'ions et à l'électrodialyse et minimise les problèmes associés séparément à chaque technologie.

### II.8.1. Historique :

Ce procédé de purification, fut décrit initialement par Walters, Weiser, Marek en 1955, puis Kollman dépose deux brevets sur la technique en 1957. Dès 1959, Glueckauf pose les bases de la théorie des transports ioniques lors d'une électrodéionisation.

Cependant, le premier système n'est commercialisé qu'en 1987 par la société Millipore, sous le nom commercial Ionpure et elle est aujourd'hui commercialisée par la société U.S.Filter. Il est désormais majoritairement employé pour obtenir de l'eau ultrapure, avec une résistivité de l'ordre de 18 M $\Omega$ .cm. Depuis, l'intérêt porté sur cette technique est croissant car il s'agit d'une alternative très avantageuse à l'échange d'ions classique.

### II.8.2. Principe et aspect théorique de l'électrodéionisation

Le principe d'électrodésionisation est schématisé sur la figure (II.10). La solution à traiter s'écoule dans les compartiments diluât de l'électrodialyseur, contenant les résines échangeuses de cation et d'anions mélangées [40].

Sous l'effet du champ électrique les ions présents en solution migrent facilement dans les grains de résines puis dans les membranes et se concentrent dans les compartiments concentrât [41].

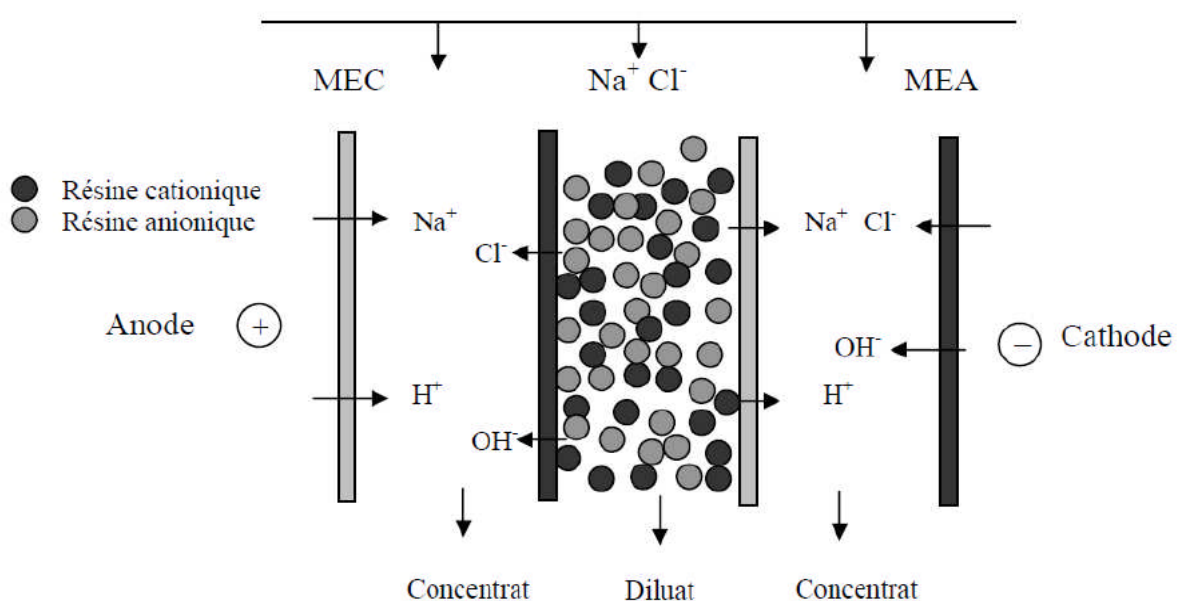


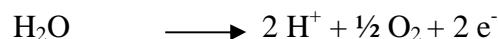
Figure II.10 : Production de l'eau ultrapure en utilisant l'électrodésionisation [42].

Un module typique d'électrodésionisation peut être considéré comme étant une succession de cellules unitaires, chaque cellule est constituée d'une membrane sélective perméable aux anions d'un côté et d'une membrane sélective perméable aux cations de l'autre côté. L'espace situé au centre de la cellule, entre les deux membranes "compartiment de dilution" est rempli de résine échangeuse d'ions. Les cellules sont séparées les unes des autres par des compartiments intercellulaires nommés compartiments de concentration.

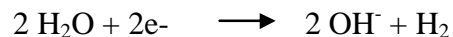
En passant de bille en bille, les ions vont migrer respectivement vers la cathode et l'anode sous l'effet du courant électrique, et traverser les membranes cationiques (MEC) et anioniques (MEA). Ainsi les ions polluants se retrouvent dans les compartiments concentrés, et l'on obtient en sortie un effluent purifié. Souvent, plusieurs compartiments de purification sont alternés avec des compartiments de concentration.

Le compartiment central est garni d'un lit mélangé de résines échangeuses d'ions anioniques et cationiques qui captent les ions de l'effluent. Ces résines sont régénérées électrochimiquement.

En effet, des protons sont produits à l'anode par la réaction :



Tandis que des ions hydroxyle sont produits à la cathode par la réaction :



Ces ions permettent de régénérer respectivement les résines cationiques et anioniques du lit mélangé.

### II.8.3. Applications et configurations des cellules de l'électrodésionisation

Le procédé d'électrodésionisation est aujourd'hui principalement commercialisé dans le but d'obtenir de l'eau ultrapure.

L'électrodésionisation permet d'obtenir couramment de l'eau ultrapure ayant une résistivité de 18 MΩ.cm, soit une conductivité inférieure à 0,06 μS/cm. Il existe en effet de nombreux domaines d'activité où l'on recherche une eau très pure, tels que la fabrication de composants électriques, informatique ou optiques, et la synthèse de composés pharmaceutiques ou agroalimentaires.

#### II.8.3.1. Production de l'eau ultrapure

L'électrodésionisation est actuellement la technologie de choix pour la production de l'eau ultrapure utilisée dans les différents secteurs industriels. La notion d'eau ultrapure est relative; chaque industrie a en effet ses normes qui évoluent en permanence [18].

##### a) L'industrie des semi-conducteurs



Le secteur du micro-électronique est en constante évolution amenant la création de structures ultrafines dans les circuits intégrés. Cette évolution requiert des niveaux contraignants de nettoyage et de pureté. L'eau utilisée comme fluide de rinçage des produits en cours de fabrication doit remplir des critères de qualité draconiens, se rapprochant des limites théoriques de pureté en termes chimique, physique et biologique, et ce d'autant plus que la capacité de mémoire des circuits croît avec la technologie.

Ces exigences sur la qualité de l'eau (souvent de l'ordre du ppb voire du ppt) sont dues au fait que le moindre dépôt minéral ou organique sur les surfaces de ces composants entraîne leur détérioration irrémédiable.

#### **b) Les industries de l'énergie**

Les centrales électriques (nucléaire ou thermique) utilisent de l'eau ultrapure dans les circuits de refroidissements et dans les chaudières pour produire de la vapeur. Les volumes se comptent en milliers de mètres cube par heure. Le premier critère caractérisant cette eau est la conductivité inférieure à 0.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , complété par des prescriptions sur les teneurs en silice, fer, cuivre, sodium généralement souhaitées à moins de 20 ppb.

Le COT est souhaitée à moins de 0.3 ppm. Ces impuretés présentes dans l'eau peuvent provoquer des problèmes de corrosion, d'entartrage, de primage,... aux quels il faut faire très attention surtout dans les centrales nucléaires où les coûts des réparations des dommages sont très élevés [18].

#### **c) L'industrie pharmaceutique et biomédicale**

Dans l'industrie pharmaceutique, les utilisations de l'eau sont multiples et variées. C'est non seulement une matière première qui entre dans de nombreuses préparations et fabrications de produits, mais également un agent de nettoyage.

Différentes qualités d'eau sont nécessaires en fonction de l'usage pour lequel elle est destinée. Ainsi quatre grandes catégories d'eaux sont inscrites à la pharmacopée européenne : l'eau purifiée, l'eau hautement purifiée, l'eau pour préparation injectable (en vrac ou stérilisée) et l'eau potable. La pharmacopée américaine comporte deux catégories supplémentaires : l'eau bactériostatique pour injection et l'eau stérile pour inhalation.

L'électrodésionisation permet de donner à l'eau l'état de pureté nécessaire à son rôle médical, conforme aux standards pharmaceutiques internationaux. A titre d'exemple, les normes américaines (USP) de l'eau purifiée sont données dans le tableau (II.2).

**Tableau II.2** : Eau purifiée qualité USP « Purified water » [18].

pH	5,0-7,0
Chlorure, mg/L	≤ 0,5
Sulfate, mg/L	≤ 1,0
Ammonium, mg/L	≤ 0,1
Calcium, mg/L	≤ 1,0
CO <sub>2</sub> , mg/L	≤ 5,0
Métaux lourds, mg/L	≤ 0,1
COT	≤ 500ppb
Solides totaux, mg/L	≤ 10
Nombre de bactéries, ufc/mL	≤ 100
Pyrogènes	≤ non spécifié

**d) Le domaine de la chimie analytique**

L'eau ultrapure est utilisée dans les méthodes d'analyse nécessitant le minimum d'interférences, le maximum de précision et de fiabilité. Telles que : spectrométrie atomique, méthodes d'électrophorèses, méthodes chromatographiques de haute sensibilité, préparation de solutions tampons, préparation de solutions standard [18].

**II.8.3.2. Dépollution des eaux**

Les effluents et les rejets industriels sont aujourd'hui régis par un ensemble de lois de plus en plus sévères. Chaque secteur industriel doit donc gérer et traiter ces effluents avec le plus grand soin. Parmi les solutions dont ils disposent, l'électrodésionisation peut leur apporter des réponses satisfaisantes.

**a) Elimination des métaux lourds**

L'électrodésionisation a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche au cours des dernières années et représente une option intéressante pour le traitement de divers types d'effluents contenant de faibles concentrations en métaux lourds [18].

**b) Elimination des Nitrates**

Depuis quelques années, le problème de la pollution des ressources en eau potable par les nitrates a pris une importance de plus en plus grande en raison, du danger important représenté par ce polluant pour la santé et pour l'environnement. Dans le cas des solutions diluées, les techniques séparatives à membranes échangeuses d'ions et particulièrement l'électrodésionisation s'avèrent les mieux adaptées pour résoudre ce problème de pollution [18].

### c) **Élimination du Bore et de la silice**

L'élimination des espèces faiblement ionisées tels que le bore et la silice reste l'élément fort de cette technologie. Les eaux traitées par l'électrodésionisation répondent aux valeurs cibles établies par les différents organismes gouvernementaux ou internationaux [18].

#### **II.8.3.3. Applications potentielles**

La technique d'électrodésionisation trouve également des applications très variées, on peut citer :

- ✓ La purification du caprolactame (matière première pour le nylon-6 et les fibres en polyamide)
- ✓ La concentration de l'acide citrique
- ✓ La purification des solutions industrielles d'acide phosphorique
- ✓ La purification et la récupération des acides aminés

Dans tous les cas, l'électrodésionisation semble souvent considérée comme un système "boite noire" en pratique. Les théories sur la technique sont rarement illustrées. Seules les performances globales du procédé sont étudiées en termes de rendement énergétique, d'efficacité de déminéralisation sur l'effluent présenté [18].

#### **II.8.4. Configurations des cellules de l'électrodésionisation**

La technologie d'électrodésionisation a parcouru un long chemin depuis son apparition commerciale en 1987. L'évolution progressive de cette technologie a donné naissance à plusieurs configurations de modules qui sont fortement topiques et prometteuses, et qui s'articulent sur deux approches de conceptions : en plan ou en spirale.

##### **II.8.4.1 Configuration plane**

Les modules plans sont les plus répandus dans le commerce. Ils sont constitués de membranes empilées en mille feuilles, séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation du liquide. Cette configuration est formée d'un arrangement multiple et alternatif de compartiments de dilution et de concentration, hydrauliquement en parallèle et électriquement en série. Ces modules peuvent être classés en deux catégories : à cellules minces ou à cellules épaisses, selon l'épaisseur des compartiments de dilution allant de 2 à 3 mm pour les cellules minces et de 8 à 10 mm pour les cellules épaisses [18].

### II.8.4.1.1 Electrodesionisation à cellules minces

Ce type de dispositif est constitué de compartiments de dilution relativement minces ayant une épaisseur d'environ 3mm, remplis d'un mélange de résines échangeuses d'ions et des compartiments de concentration de 1 mm d'épaisseur (figure II.11).

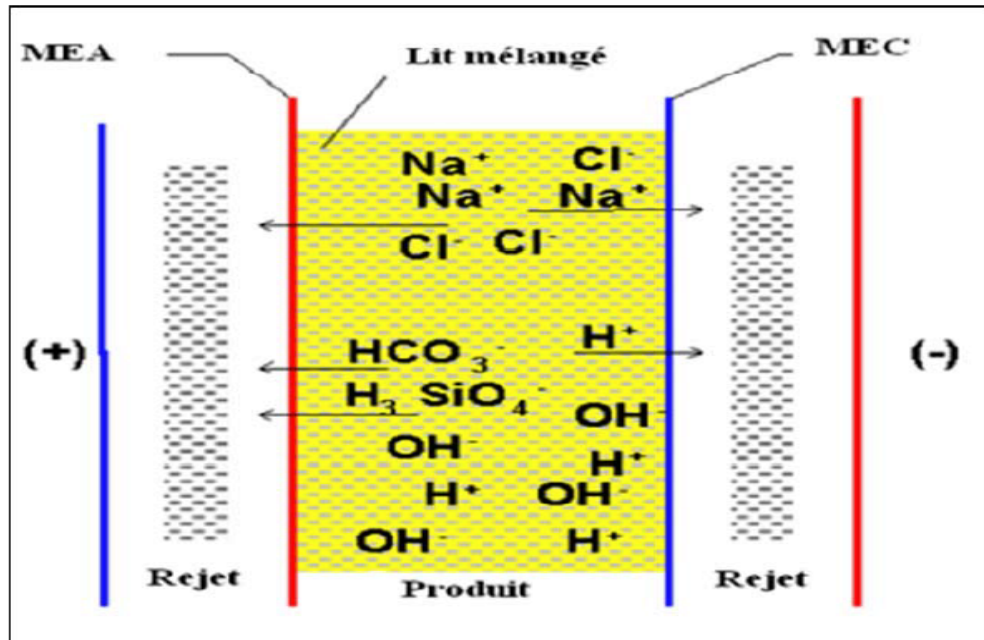


Figure II.11: Représentation d'une cellule mince [18].

L'optimisation du fonctionnement de l'électrodesionisation à lit mélangé implique plusieurs facteurs :

➤ **Espacement inter membranaire**

La distance de migration est évidemment l'une des contraintes fondamentales du processus d'électrodesionisation.

➤ **Densité du lit**

La performance d'un dispositif d'électrodesionisation à lit mélangé peut sensiblement être améliorée par l'utilisation des résines échangeuses d'ions de dimensions uniformes qui assurent une densité de lit plus élevée, au lieu des résines conventionnelles.

Le tableau suivant présente la qualité de l'eau produite par les dispositifs utilisant une résine uniforme est nettement meilleure.

**Tableau II.3 :** Performance de l'électrodésionisation à lit mélangé en fonction de la qualité de résine utilisée [18].

Conductivité de solution d'alimentation ( $\mu\text{S/cm}$ )	Résistivité du produit ( $\text{M}\Omega\text{-cm}$ )	
	Résine standard	Résine uniforme
<b>145</b>	<b>0.4</b>	<b>0.7</b>
<b>87</b>	<b>0.8</b>	<b>1.5</b>
<b>65</b>	<b>1.5</b>	<b>5.2</b>
<b>41</b>	<b>3.4</b>	<b>10.2</b>

#### ➤ Optimisation de l'électrorégénération

La combinaison membrane/résine doit être soigneusement choisie pour catalyser la dissociation électrochimique de l'eau qui est nécessaire pour la régénération des résines. Cette dissociation se produit préférentiellement aux interfaces bipolaires résine/résine et résine/membrane. Le choix des résines est dicté par les contraintes mécaniques et les propriétés de transfert. Il dépend également des conditions opératoires et des contaminants à éliminer.

En plus du choix approprié des résines et des membranes, l'augmentation de la conductivité du concentrât par l'addition d'un sel ou par l'augmentation du taux de recouvrement, diminue sensiblement la résistance électrique du module, augmente le passage du courant, et par conséquent améliore le processus d'électrorégénération.

Cependant l'augmentation du gradient de concentration engendre certains problèmes tels que : la migration retour des co-ions et la fuite osmotique de l'eau.

L'innovation récente dans la technologie d'électrodésionisation à lit mélangé qui consiste à incorporer les résines échangeuses d'ions dans les compartiments de concentration, permet d'éliminer le besoin d'injection du sel, favorise le transfert des ions et réduit la concentration de la couche limite. Il en résulte ainsi une meilleure élimination des sels. Cette innovation a réduit considérablement la résistance du module et a permis d'augmenter le volume du produit avec la même qualité de désionisation [18].

#### II.8.4.1.2. Electrodéionisation à cellules épaisses :

L'électrodéionisation à cellules épaisses est connue commercialement en 1996 où les premières unités pilotes ont été installées.

Dans cette conception le compartiment de dilution est rempli de couches alternées ou de zones séparées de résines échangeuses d'ions.

Le principe d'élimination des ions se distingue par la présence d'un seul type de résine à n'importe quel point donné entre les membranes. Le transfert des co-ions n'est pas possible, il en résulte alors une dissociation de l'eau donnant les ions  $H^+$  et  $OH^-$  nécessaires au transfert tout en maintenant la neutralité électrique.

Parmi les dispositifs d'électrodésionisation à cellules épaisses les plus répandus sur le marché, on distingue les "Clustered-bed" nommés également (CEDI-CB), dans ces dispositifs, l'emplacement séparé des résines anioniques et cationiques est assuré par un liant inerte. Cette conception offre des flux élevés, mais elle présente plusieurs inconvénients ; à savoir l'utilisation d'un liant inerte qui sert à maintenir la résine en place peut bloquer l'écoulement du liquide et le passage du courant, et par conséquent augmente la chute de pression et la résistance électrique du module.

Les problèmes rencontrés dans cette technologie ont été surmontés par l'utilisation d'une nouvelle technique qui consiste à incorporer des couches séparées de résines anioniques et cationiques dans les compartiments de dilution sans avoir recours au matériau liant, de même les compartiments de concentration sont remplis de résine (figure II.12).

Cette nouvelle technologie dite "Layered-bed" ou (CEDI-LB) a réduit considérablement la résistance électrique du module. Cependant elle présente la difficulté de maintenir une densité de courant uniforme à travers les différentes couches de résine.

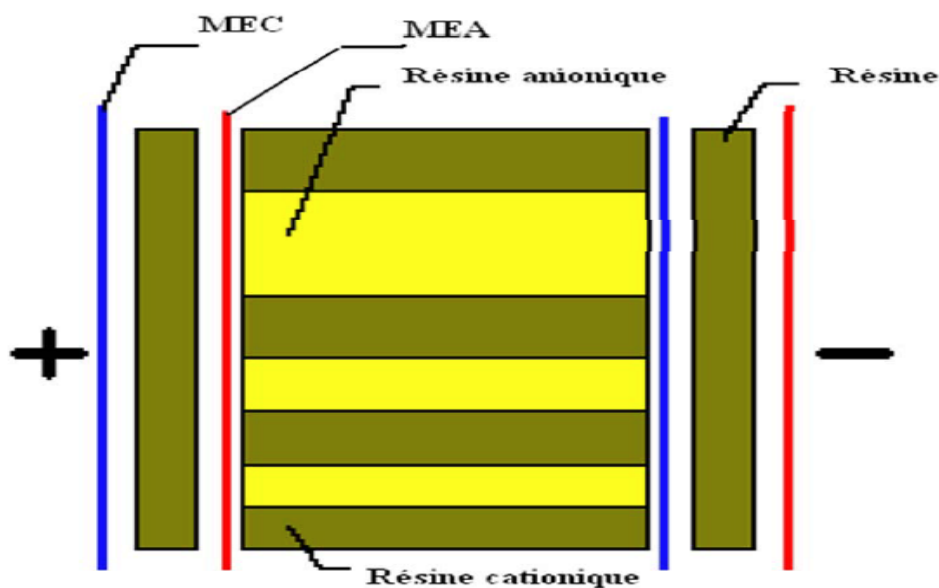
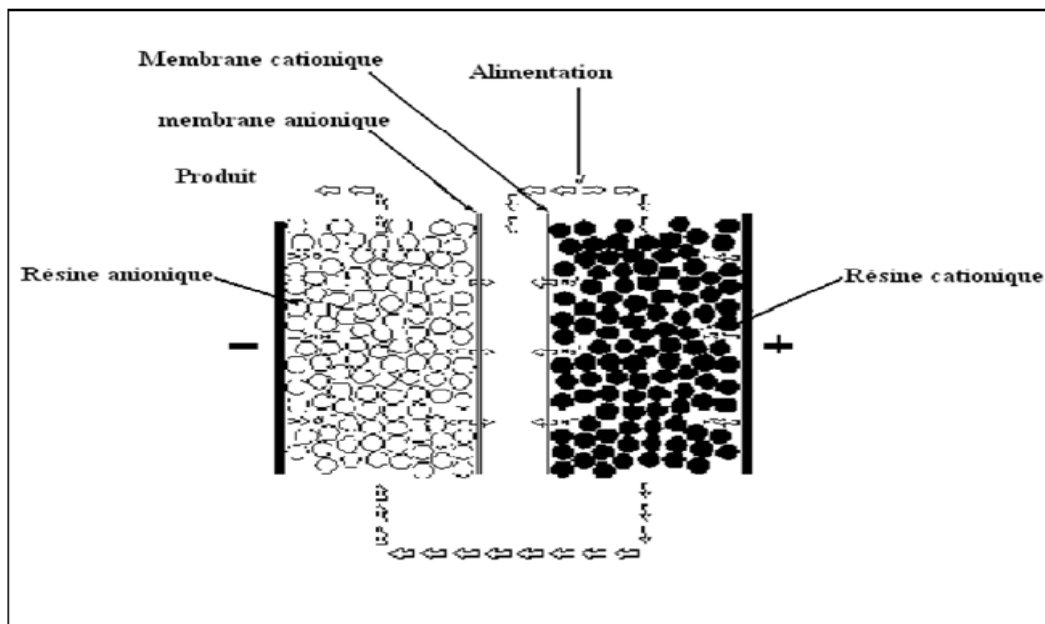


Figure II.12 : Représentation d'une cellule épaisse (CEDI-LB) [18].

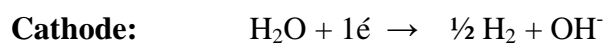
Après avoir mis un accent particulier sur ces deux types de modules, on cite également une autre variante qui semble avoir une très grande importance ; il s'agit de la technique d'électrodésionisation à lits séparés, dont le principe de fonctionnement est illustré par la figure (II.13). Dans ces dispositifs les résines échangeuses d'ions cationiques et anioniques occupent respectivement les compartiments anodique et cathodique qui sont hydrauliquement en série, et séparés par un compartiment central de concentration.

Ce compartiment est limité par une membrane anionique du côté de la cathode, et d'une membrane cationique du côté de l'anode.

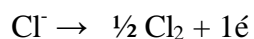


**Figure II.13 :** Principe de fonctionnement de l'électrodésionisation à lits séparés [18].

La régénération des résines échangeuses d'ions dans ce processus est due aux ions  $H^+$  et  $OH^-$  provenant des réactions aux électrodes, mentionnées ci dessous :



Une autre réaction se produit également à l'anode ayant pour conséquence la formation du chlore libre :



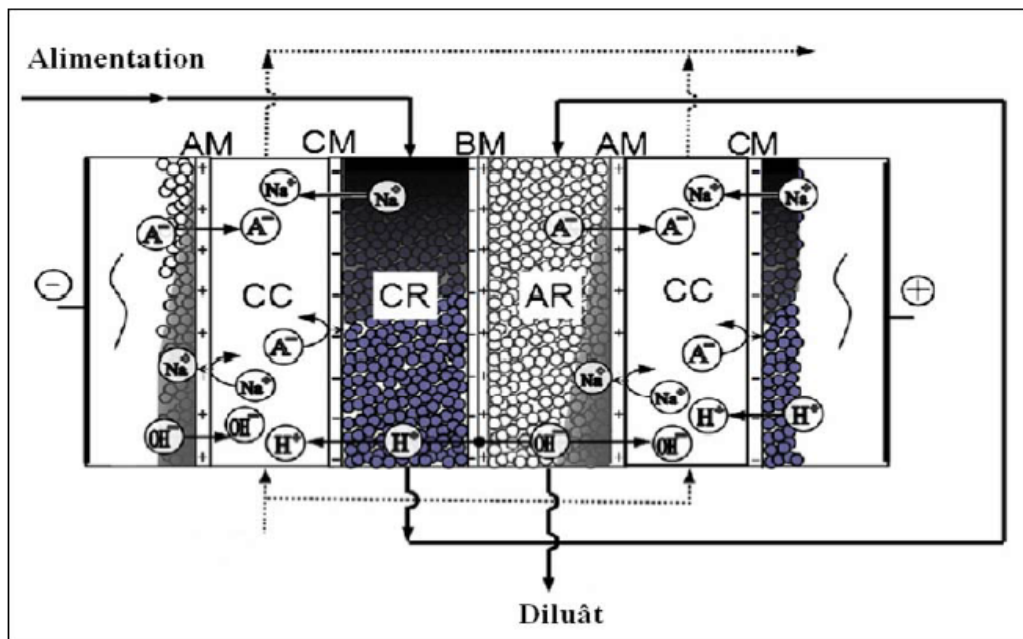
Une étape supplémentaire de dégazage est absolument nécessaire afin d'éliminer les gaz engendrés par ces réactions.

Le procédé d'EDI utilisant des lits séparés de résines cationiques et anioniques offre la possibilité de traitement des effluents industriels avec succès; présente également des avantages en termes de souplesse de conception et de simplicité mécanique. La difficulté potentielle dans

l'exploitation de cette configuration est qu'elle nécessite une paire d'électrodes pour chaque cellule, ce qui rend son empilement non rentable.

En plus de ce qui a été avancé, une autre configuration, qui n'a pas connu le succès commercial des configurations décrites ci-dessus, mérite d'être mentionnée en raison de son originalité et de son intérêt scientifique. Il s'agit de l'électrodésionisation à membranes bipolaires dont le principe de fonctionnement est donné par la figure (II.14).

Dans ce dispositif, le compartiment de résines cationiques est séparé du compartiment de résines anioniques par une membrane bipolaire. La solution à traiter passe successivement à travers les deux lits de résines échangeuses d'ions de polarité différente.



**Figure II.14 :** Principe de l'électrodésionisation à membranes bipolaires [18].

L'application d'un champ électrique entraîne la dissociation de l'eau dans la membrane bipolaire, ce qui permet la régénération en continu de la résine. Cette configuration n'engendre aucun gaz dans le produit, sa performance a été sensiblement améliorée par l'introduction des résines dans le compartiment de concentration ainsi qu'avec l'utilisation d'un compartiment de protection entre le diluât et le concentrât.

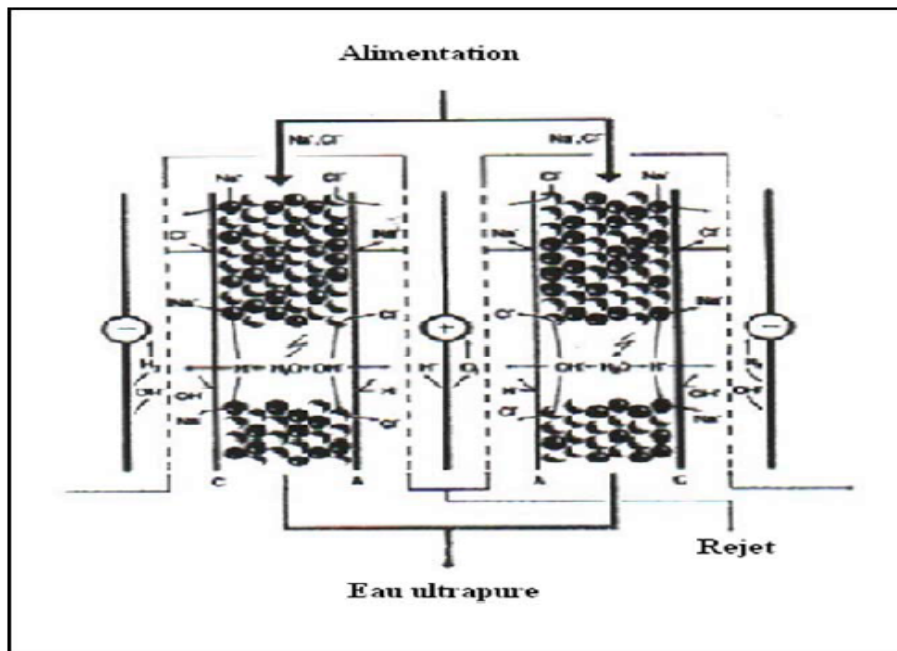
Cette configuration présente une efficacité remarquable, néanmoins sa commercialisation est limitée principalement par la durée de vie des membranes bipolaires [18].

#### II.8.4.2. Configuration en spirale

Ce type de module se présente comme une cellule unitaire, les membranes anioniques et cationiques séparées par les grains de résines sont enroulées en spirale sur une électrode centrale,



l'enroulement se termine par une contre électrode. Le principe de fonctionnement est illustré par la figure (II.15).



**Figure II.15 :** Principe de fonctionnement du module d'électrodésionisation en spirale [18].

Deux courants d'eau traversent le module ; l'un se désionise en traversant les résines échangeuses d'ions selon un chemin en spirale tandis que l'autre se concentre en traversant respectivement l'électrode externe, le compartiment de concentration et finalement l'électrode interne. Cette configuration a l'avantage d'éliminer efficacement les espèces faiblement ionisées telle que la silice, l'anhydride carbonique en raison du degré de régénération élevé des résines.

Ces modules ont gagné une grande acceptation depuis leur apparition en 1994.

Pour la technologie d'électrodésionisation a également envisagé l'utilisation des textiles échangeurs d'ions nés des recherches effectuées pendant plus de 20 ans par l'institut Textile de France. Ces textiles échangeurs d'ions sont des matériaux macro poreux, régénérables, non réticulés, ayant une cinétique d'échange supérieure à celle des résines échangeuses d'ions, ils permettent de traiter des volumes importants sans perte de charge notable.

Avant de clore ce point concernant les différents types de configurations, il paraît utile de citer encore deux variantes du procédé d'électrodésionisation qui ont suscité l'intérêt scientifique des chercheurs notamment pour la dépollution des effluents industriels. Il s'agit de l'électropermutation et de la déionisation capacitive.

### II.8.4.3. Electropermutation

L'électrodialyse possède certaines limites intrinsèques, comme la polarisation de concentration. On peut améliorer ce procédé en ajoutant dans les compartiments de dilution un matériau poreux échangeur d'ions qui augmentera la conductivité du milieu. L'efficacité du procédé pour le traitement des solutions diluées est alors améliorée.

La technique d'électropermutation, appelée aussi électrorégénération ou encore électro-extraction continue, a été décrite pour la première fois en 1952, sans connaître une grande application jusqu'à ce jour. Mais devant la croissance des prix des produits purs et devant les problèmes de pollution causés par les rejets industriels, ce procédé devient intéressant [37].

En 1980 ; ce procédé a été décrit par Strathmann et Kock, pour traiter un effluent contenant du plomb. Ce procédé est représenté schématiquement sur la figure (II.16). La résine échangeuse de cations est placée dans le compartiment central de l'électrodialyseur entre deux membranes de même type. Les deux compartiments d'électrodes contiennent une solution d'acide.

Dans un premier temps l'ion à éliminer  $M^+$  est fixé sur la résine (initialement sous forme protonée) par échange avec les protons. Le courant électrique appliqué induit une migration des protons à travers la première membrane échangeuse de cations (MEC). Ces protons déplacent les ions  $M^+$  fixés, qui migrent ensuite à travers la deuxième MEC, vers la cathode où ils peuvent soit se déposer, soit se concentrer selon la nature du cation  $M^+$  et l'objectif désiré.

L'électroextraction d'un ion  $M^+$  par EP peut être réalisée en une seule étape (électroextraction continue) ou en deux étapes successives (électroextraction discontinue) :

- **L'électroextraction continue** : Le procédé se fait alors en une seule étape pendant laquelle la fixation des cations  $M^+$  apportés par la solution en circulation, la régénération par voie électrochimique des échangeurs ioniques et le transfert des cations  $M^+$  se font simultanément.
- **L'électroextraction discontinue** : Ce procédé se compose de deux étapes : La première est une étape d'épuration des solutions par fixation des ions  $M^+$  sur les échangeurs ioniques en absence de champ électrique. La circulation de la solution est arrêtée dès que la fuite en ions  $M^+$  dépasse un certain seuil de concentration. La seconde est une régénération proprement dite. Sous l'effet d'un champ électrique, les protons ou autres ions extractants, viennent remplacer les ions  $M^+$  sur la résine et les membranes cationiques ; ensuite les ions  $M^+$  seront alors transférés [43].

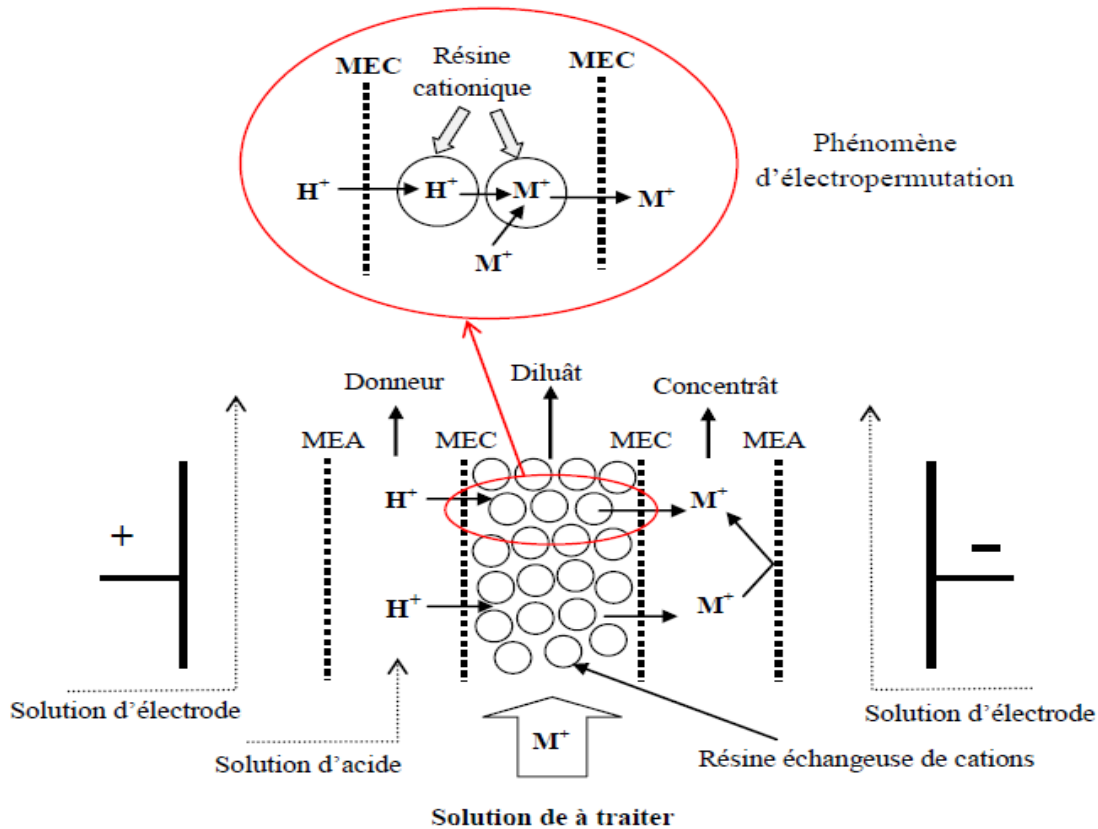


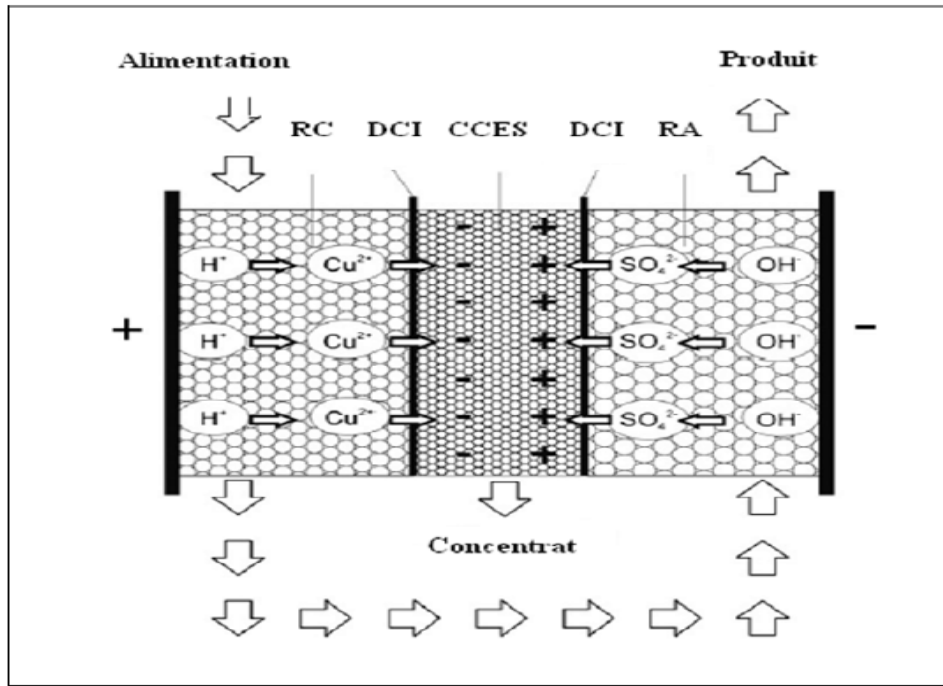
Figure II.16: Schéma du principe de l'électropermutation [43].

Ce procédé se heurte à un phénomène limitatif, dû à la grande mobilité des protons. Le transport du courant par les protons diminue le rendement faradique de transfert des ions à extraire et par suite le rendement de régénération des résines d'échanges ioniques.

#### II.8.4.4. Désionisation capacitive

La désionisation capacitive est un procédé de collection/décharge basé sur la formation de la double couche à l'interface solution/électrode. Ce procédé nécessite des électrodes de grande surface spécifique telles que les aérogels de charbon actif. Son principe de fonctionnement est illustré par la figure (II.17).

L'eau à désioniser traverse la cellule électrochimique, après polarisation les ions sont enlevés électrostatiquement de l'eau et retenus dans la double couche électrique formée à la surface des électrodes. L'eau quittant la cellule est ainsi purifiée. Le système peut fonctionner en polarité inverse sans impact négatif sur le procédé de désionisation, qui est énergétiquement avantageux, car les limitations associées aux membranes telles que la concentration de polarisation et le colmatage ont été surmontées.



**Figure II.17** : Principe de fonctionnement d'une cellule de désionisation capacitive [18].

### II.8.5. Aspect Economique

Les contraintes économiques sont très importantes pour les industriels et s'est généralement le facteur déterminant pour le choix du procédé. La sélection d'un procédé à partir de ces contraintes dépend des coûts capitaux et des dépenses annuelles qui sont très difficiles à évaluer et elles doivent être déterminées au cas par cas.

L'étude économique et comparative de l'électrodésionisation (EDI) et de l'échange ionique à lit mixte (LM) a été effectuée par C. Edmonds Ainsi que par I. Fedorenko [18]. Les résultats les plus importants de leur étude sont résumés ont montré l'influence du taux de salinité et du débit à l'entrée sur les coûts très élevés des opérations de l'EDI et de l'échange ionique.

Cette étude a indiqué également que l'électrodésionisation pourrait être une technique raisonnable et une alternative économique à l'échange ionique pour plusieurs applications.

## II.9. La cogénération

### Introduction

Les centrales thermiques sont des sources importantes d'approvisionnement de l'électricité dans beaucoup de pays en voie de développement. La méthode conventionnelle de production et de fourniture d'électricité au client est inutile dans le sens qu'environ un quart de l'énergie primaire introduite dans la centrale est rendue réellement disponible à l'utilisation sous forme d'électricité. La source principale des pertes dans le processus de conversion est la chaleur rejetée.

D'ailleurs, les utilisateurs peuvent être loin du point de vue génération, qui a comme conséquence des pertes additionnelles de transmission et de distribution dans le réseau.

Pour couvrir les besoins de chaleur et d'électricité, on utilise généralement une chaudière à combustible fossile et on achète l'électricité au réseau. Pourtant, il est possible, et quelquefois avantageux, de couvrir simultanément ses besoins de chaleur et d'électricité par une unité de cogénération. Il s'agit d'un moteur, d'une turbine à gaz ou d'une turbine à vapeur, qui génère simultanément de la chaleur et de l'électricité.

Cette technologie permet un gain en énergie primaire qui s'accompagne d'une réduction sensible des émissions polluantes. Si on a des besoins importants en chaleur, alors la cogénération peut être une solution économiquement rentable.

L'objectif essentiel de notre travail est d'introduire ce nouveau concept qui prend de nos jours une très grande importance à travers le monde et qui est l'une des actions les plus prometteuses de la maîtrise de l'énergie.

### II.9.1. Historique

L'idée de la cogénération ait été en existence pendant plus d'un siècle. Maintenant il a trouvé sa popularité et son intérêt durant la deuxième moitié du siècle passé. Des années 1950 aux années 1980, la cogénération était utilisée pour produire de l'électricité, principalement dans les grandes industries fortement consommatrices d'énergie thermique (sucrieries, papeteries...) et équipées de grosses chaudières délivrant de la vapeur à haute pression nécessaire dans leur procédé.

Les principaux facteurs ayant contribué à ce phénomène sont les chocs pétroliers menant à des prix de l'énergie qui se développèrent en spirale et à la disponibilité des systèmes efficaces et de petites tailles de cogénération qui sont devenus rentables et concurrentielles aussi bien que les unités à grandes échelles conventionnelles de production de l'électricité. Une variété de mesures

a été entreprise par plusieurs autorités internationales pour favoriser la croissance de la cogénération.

Les principales raisons qui ont rétablie l'intérêt pour la cogénération sont de nouveaux, la demande rapidement croissante de l'électricité, des contraintes à faire face par les autorités nationales pour financer la puissance additionnelle produisant des capacités, et le souci croissant de limiter l'émission et la pollution environnementales liée à l'utilisation des énergies fossiles.

La cogénération est actuellement recommandée quand il y a plan pour l'expansion des équipements existants et le développement de nouvelles zones industrielles [44].

### **II.9.2. Définition et principes de base**

On appelle la cogénération (ou encore production combinée d'électricité et de chaleur), un système dans lequel, en brûlant un combustible primaire, on produit simultanément de l'énergie électrique et de l'énergie thermique.

Une centrale de cogénération d'électricité et de chaleur fonctionne grâce à des turbines ou des moteurs à gaz. Le gaz naturel est l'énergie primaire la plus couramment utilisée pour faire fonctionner des centrales de cogénération. Cependant, les sources d'énergies renouvelables et les déchets peuvent être également utilisés.

La chaleur produite par la cogénération peut être utilisée de différentes manières : eau chaude (c'est-à-dire pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire), vapeur et air chaud (pour les usages commerciaux et industriels).

Il est aussi possible de convertir tout ou partie de la chaleur en froid à l'aide d'une machine thermofrigorifique. C'est la trigénération : production simultanée d'électricité, de chaleur et de froid. La trigénération est une option qui peut s'avérer attractive dans des usages où les trois besoins coexistent, comme par exemple des installations de production incluant des équipements de refroidissements ou des logements, bureaux ou commerces nécessitant chauffage et climatisation.

La chaleur peut aussi être utilisée dans une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. C'est ce que l'on s'appelle le cycle combiné [45].

Une centrale électrique classique obtient un rendement électrique d'environ 35%, tandis que le reste de l'énergie (65%) est perdu sous forme de chaleur. Dans un système en cogénération, 30 à 35% de l'énergie primaire est transformée en électricité grâce à un alternateur, tandis que 65% se retrouve sous forme de chaleur, dont 50 à 55% est récupérée pour chauffer un circuit d'eau au travers d'un échangeur. Cette eau peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, de l'eau chaude sanitaire, ou pour des procédés industriels. L'électricité produite sera quant à elle consommée sur place ou revendue sur le réseau électrique public.

Les centrales de cogénération d'électricité et de chaleur peuvent atteindre un rendement énergétique de l'ordre de 90%. Le procédé est plus écologique, car lors de sa combustion, le gaz naturel libère moins de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'oxyde d'azote (NOX) que le pétrole ou le charbon. Le développement de la cogénération pourrait éviter le rejet de 258 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'UE en 2020.

Elle recouvre un ensemble de techniques de production délivrant de façon simultanée de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique figure (II.18). Cette dernière étant le plus souvent utilisée pour produire de l'électricité par couplage à un alternateur. Cette production d'énergie peut s'effectuer à partir du charbon, du gaz naturel, du fioul, du nucléaire, voir du bois et des ordures ménagères.

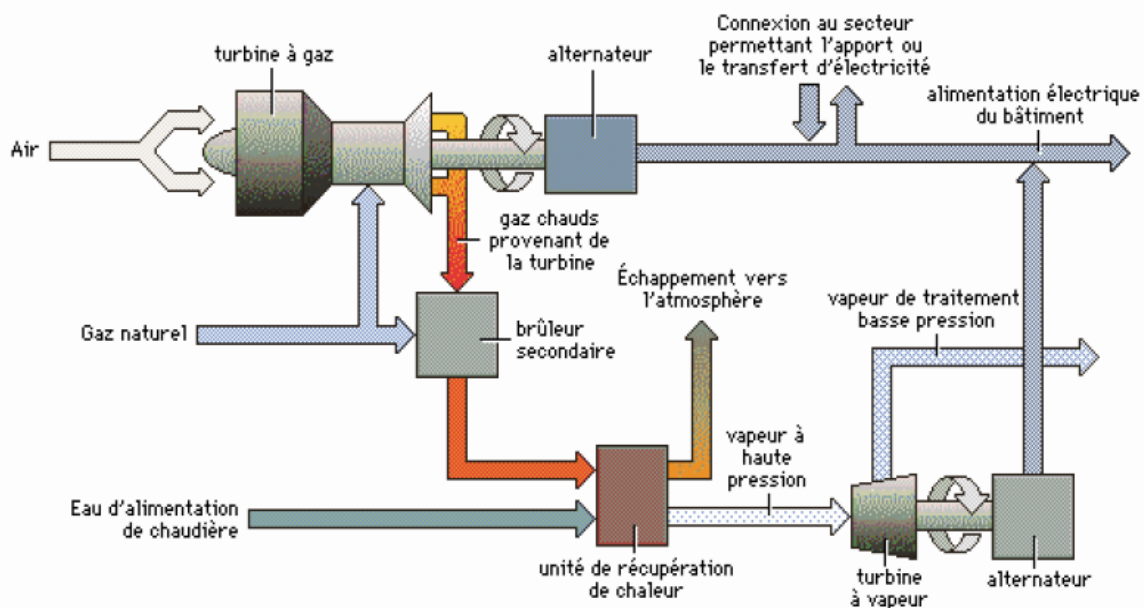


Figure II.18 : Principe d'un processus de cogénération [44].

### II.9.3. Différents types de procédés de cogénération et leurs usages :

#### II.9.3.1. Cogénération par moteur :

Il s'agit d'un moteur à explosion couplé à un alternateur produisant l'électricité. La chaleur est quant à elle récupérée à plusieurs niveaux:

- ✓ La chaleur des gaz d'échappement à 500 °C peut être récupérée à plus de 70% par refroidissement à 120 °C (moteur à gaz) ;
- ✓ La chaleur de l'eau de refroidissement à environ 100 °C représente généralement la plus grande partie;
- ✓ La chaleur de l'huile du moteur à 100 °C et plus peut également être entièrement récupérée;

- ✓ La chaleur de refroidissement du turbo à 55 °C se récupère plus difficilement.

Ces moteurs conviennent bien pour des utilisations d'eau chaude à des températures inférieures à 100 °C, bien qu'une petite quantité de vapeur basse pression puisse néanmoins être générée grâce aux gaz d'échappement.

Ces moteurs sont le plus souvent utilisés pour des petites gammes de puissance, de 5 kWé jusqu'à 7 000 kWé.

On distingue deux types de moteurs concernés par ce type de technologie :

**a) Moteurs diesels :**

Les moteurs diesels sont largement utilisés dans tous les domaines en raison de leur rendement thermique élevé sur une grande plage de puissance, de leur adaptabilité à plusieurs types de combustibles et de leur possibilité d'application à une grande gamme d'applications.

La chaleur peut être récupérée sur trois postes : d'une part sur les gaz d'échappement qui sortent chauds (450 à 550 °C), d'autre part sur l'eau de refroidissement du bloc-moteur et enfin sur le circuit de lubrification. Cette récupération se fait sous forme d'eau chaude (température inférieure à 110 °C) ou de vapeur basse pression (pression relative inférieure à 0,5 bar). Ces fluides et leur niveau thermique sont souvent difficiles à utiliser dans l'industrie, mais par contre bien adaptées au génie climatique.

Cependant les installations à moteur diesel présentent un rendement total faible par rapport aux autres installations. Ceci est dû au faible taux de récupération de l'énergie thermique lié au bon rendement de conversion mécanique [46].

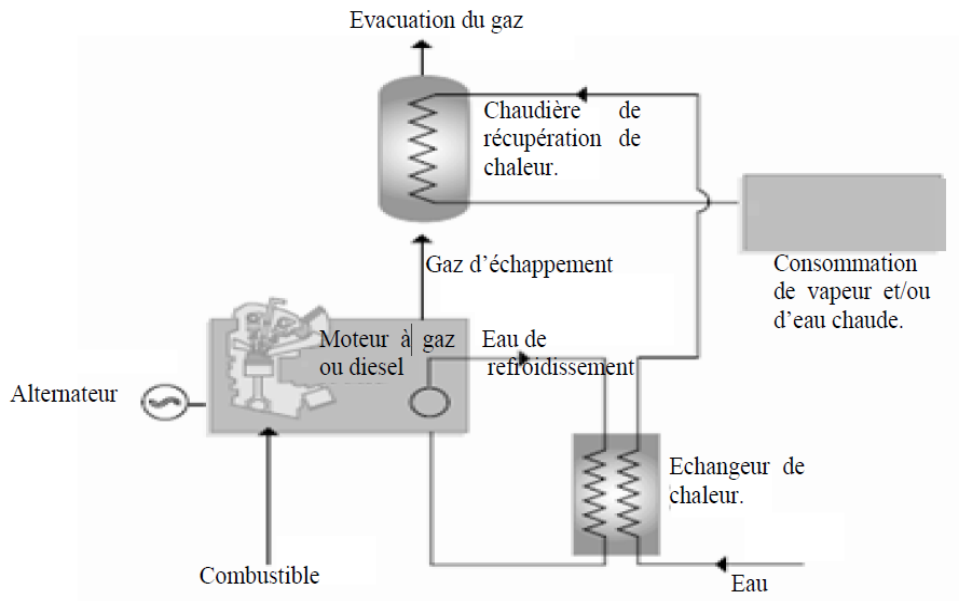
**b) Moteur à gaz**

C'est un moteur alternatif à combustion interne alimenté en gaz naturel ou en biogaz, équipé pour la récupération de la chaleur.

Le moteur à gaz est alimenté à partir d'un réseau de gaz. L'énergie mécanique produite est utilisée pour entraîner des alternateurs fabriquant de l'électricité. Le courant est généralement produit en basse tension mais il peut également être en moyenne tension pour des installations très puissantes.

La chaleur est récupérée, sous forme d'eau chaude par plusieurs échangeurs sur les gaz d'échappement, sur l'eau de circuit de refroidissement, sur le circuit de lubrification et éventuellement sur le refroidissement du turbocompresseur de suralimentation [46].





**Figure II.19** : Schéma de principe d'un moteur à gaz ou diesel [44].

### II.9.3.2. Cogénération par turbine à combustion

L'air est comprimé dans un turbocompresseur entre 15 et 40 bars, selon la puissance électrique délivrée par la turbine, avant d'être introduit dans la chambre de combustion, où il se mélange avec le combustible qui est soit un dérivé pétrolier liquide, soit du gaz naturel. Après la combustion, le mélange produit (sous pression) est détendu dans la turbine, couplée à l'alternateur qui produit le courant électrique. Une partie de l'énergie électrique produite est utilisée pour entraîner le turbocompresseur d'air.

Les gaz qui résultent de la combustion sont produits à haute température (850 à 1200 °C). Les gaz d'échappement sortent encore chauds (450 à 550 °C) et propres. Leur chaleur sensible peut être récupérée dans une chaudière ou dans une simple batterie d'échangeurs.

De plus, leur forte teneur en oxygène permet de les utiliser comme comburant dans des brûleurs spéciaux dits de postcombustion qui peuvent être installés sur la plupart des types de chaudières classiques.

Les turbines permettent ainsi de produire de la vapeur à très haute température, qui peut être utilisée industriellement, ou dans l'optique d'un cycle combiné. L'utilisation de la postcombustion étant indépendante du fonctionnement de la turbine, cela permet d'assurer le plein régime à la turbine du point de vue électrique, et de moduler la postcombustion selon les besoins thermiques de l'utilisateur.

Les turbines à combustion sont surtout utilisées dans les systèmes de puissance supérieure à 1MW.

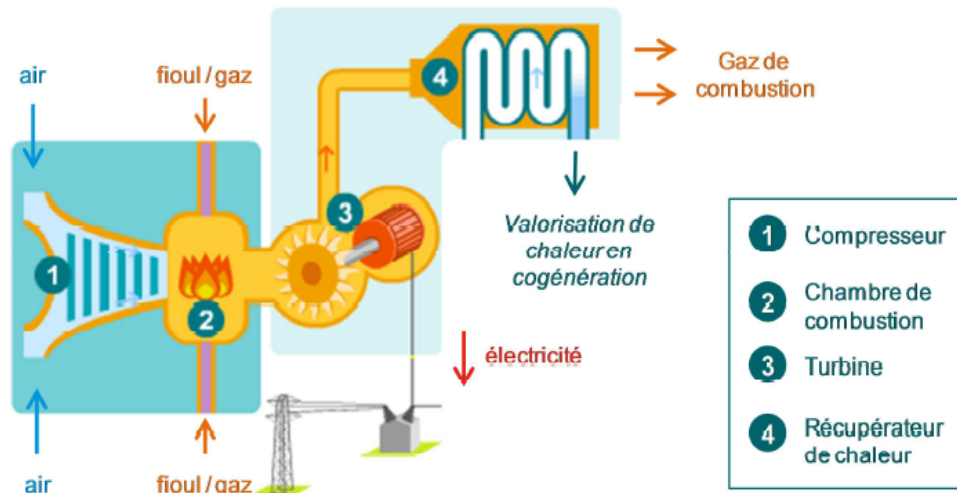


Figure II.20 : Cogénération par turbine à combustion [47].

### II.9.3.3. Cogénération par turbine à vapeur

Cette technique, réservée aux industriels pouvant produire de grandes quantités de vapeur, La cogénération par turbine à vapeur permet la production simultanée d'énergie électrique et d'énergie thermique, et permet d'atteindre des rendements globaux qui peuvent dépasser 90%. La production électrique est assurée par une turbine à vapeur alimentée par une vapeur à haute pression (jusqu'à 130 bar) et haute température (plus de 500 °C). C'est l'une des principale technique utilisée dans les grosses centrales électriques, nucléaires ou à combustibles fossiles, pour convertir l'énergie thermique du combustible en électricité.

La cogénération par turbine à vapeur permet d'utiliser des sources d'énergie primaires variées, dont entre autres les sources d'énergie diverses issues de la valorisation des déchets de l'industrie, de l'incinération des déchets ménagers ou de la biomasse.

À l'aide de la chaleur dégagée par la combustion d'un combustible, on produit de la vapeur à haute pression dans une chaudière. Cette vapeur est ensuite dirigée vers une turbine, où en se détendant, entraîne la turbine. A la sortie de la turbine, la vapeur est condensée et ramenée à la chaudière, où ce cycle recommence. Dans ce cycle, la combustion est externe : c'est-à-dire qu'il n'y a pas de contact direct entre le fluide caloporteur (vapeur) et le foyer. Ainsi le combustible ne requiert pas de qualités spécifiques précises et donc tout combustible peut être employé.

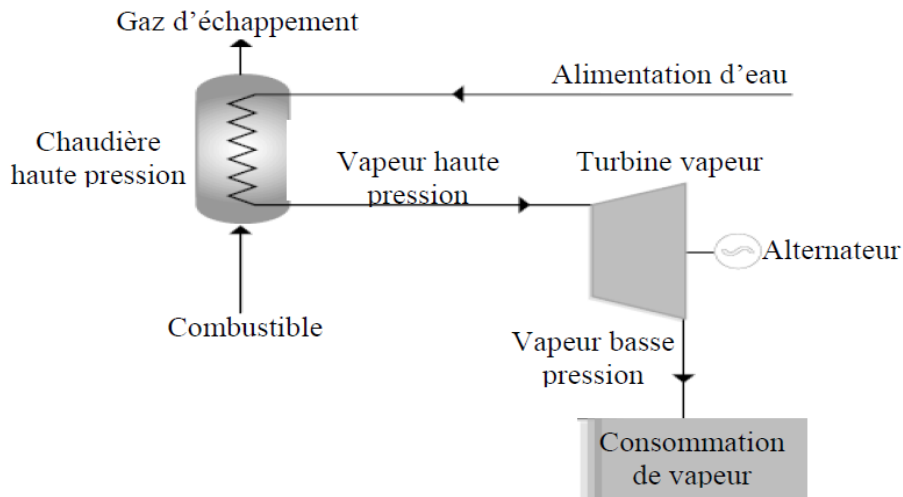


Figure II.21 : Schéma de principe d'une turbine à Vapeur [44].

**II.9.3.4. Cycle combiné**

Une installation à cycle combiné est basée sur le couplage thermique entre une turbine à gaz et une turbine à vapeur, c'est-à-dire elles utilisent une turbine à gaz et une turbine à vapeur pour améliorer le rendement électrique. Le rejet thermique de la turbine à gaz sert pour la production de vapeur de l'installation motrice à vapeur. Dans ce cas, compte tenu de très bon rendement de conversion énergie chimique-énergie électrique, la quantité de chaleur récupérable sur la turbine à gaz est faible.

La pratique essentielle est alors celle du soutirage de vapeur [46].

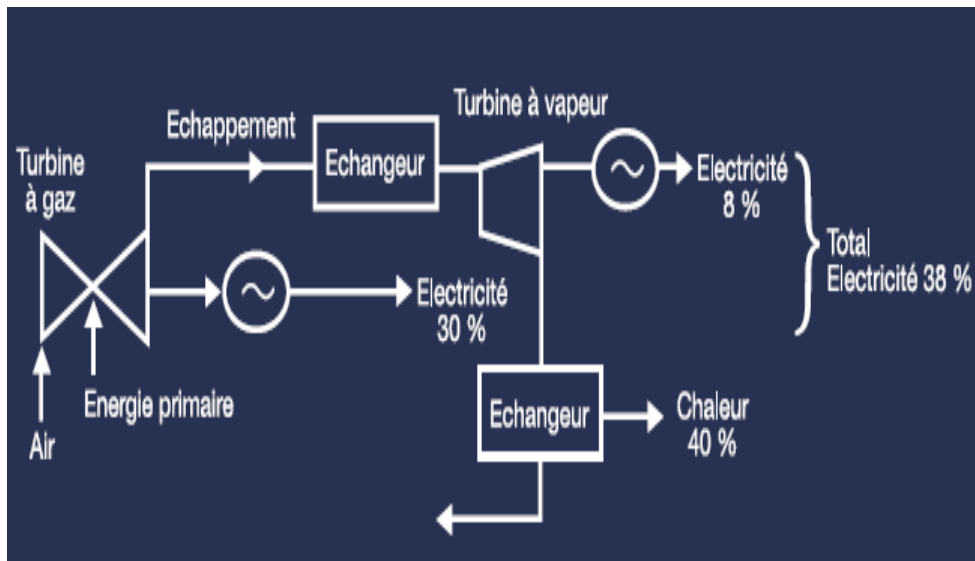
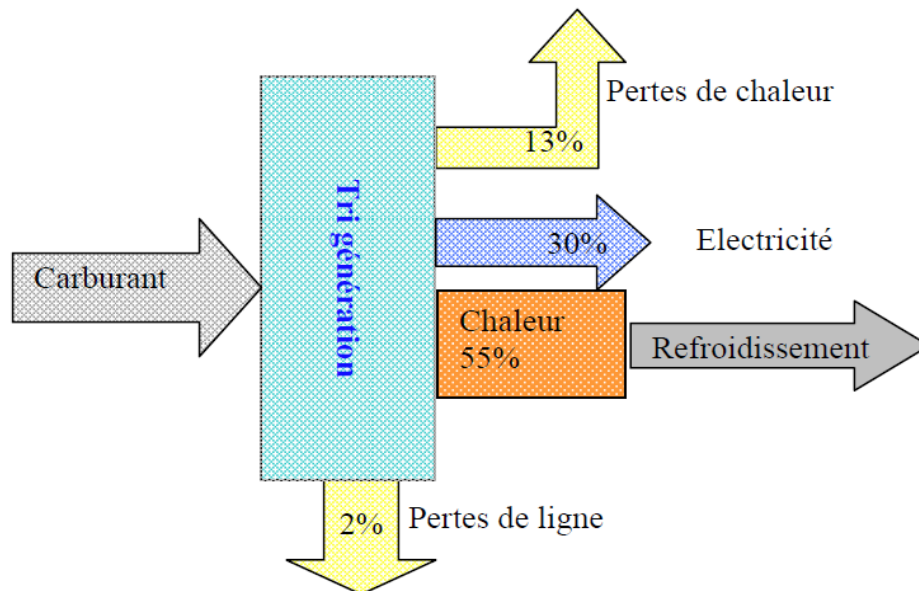


Figure II.22 : Schéma d'un cogénérateur à cycle combiné.

### II.9.3.5. La trigénération

« Trigeneration », c'est le terme anglais désignant la production combinée de chaleur, de froid et d'électricité. Son avantage, c'est que le système couvre en hiver les besoins en chauffage et en été les besoins de rafraîchissement. La production de froid se fait par des installations frigorifiques à absorption [44].



**Figure II.23** : Schéma de principe d'un système de trigénération [44].

#### Définition

On appelle ainsi les installations de Génie climatique qui peuvent produire simultanément du chaud, du froid et de l'électricité. Là où il peut y avoir besoin à la fois de chaleur, de froid et d'électricité, (hôpitaux, immeubles, bureaux, administrations, grands magasins...) la trigénération à partir des déchets est appelée à un solide avenir.

On installe sur l'arbre de sortie de la turbine à vapeur un alternateur et un compresseur frigorifique, indépendants l'un de l'autre grâce à un jeu d'embrayage et de débrayage.

On enclenche l'alternateur quand on veut de l'électricité, le compresseur quand on veut du froid. Ce montage du compresseur directement sur l'arbre de la turbine a l'intérêt d'éviter la double transformation de l'électricité (intermédiaire inutile et coûteux). On estime à 15% l'énergie ainsi économisée [44].

### II.9.4. Les avantages de la Cogénération

La différence essentielle entre la cogénération et les centrales de production d'électricité thermiques classiques ou nucléaires réside dans le principe de la récupération et de l'utilisation de la chaleur produite par la cogénération alors que, dans le cas des centrales thermiques, la vapeur turbinée pour produire l'électricité est ensuite rejetée dans le milieu naturel.

De ce fait, la cogénération se caractérise par un excellent rendement énergétique. Elle permet des économies d'énergie primaire par rapport à des productions distinctes d'électricité (centrales électriques) et de chaleur (chaudières des utilisateurs).

Compétitive par rapport à des moyens de production centralisés, la cogénération présente également un intérêt en termes de diversification du parc de production électrique et peut permettre dans certaines conditions d'éviter des coûts de développement des réseaux électriques et des pertes en ligne.

Elle constitue un facteur de compétitivité pour les entreprises présentant des besoins de vapeur importants (chimie, industrie papetière, industrie sucrière, industrie automobile...). En conjuguant une production de vapeur à une production d'électricité, soit autoconsommée, soit vendue au réseau, la cogénération peut réduire leur facture énergétique et leurs émissions polluantes, diminuer la sensibilité aux évolutions des coûts énergétiques et assurer le secours électrique en cas d'incidents sur le réseau public.

La cogénération est également une solution énergétique attractive pour le secteur tertiaire (hôpitaux, aéroports, écoles...) ainsi que pour les collectivités locales (réseaux de chaleur alimentant des ensembles immobiliers et valorisation énergétique des ordures ménagères).

La promotion de la production combinée de chaleur et d'électricité s'inscrit dans la stratégie communautaire définie par la résolution du Conseil de l'Union européenne du 8 décembre 1997. Celle-ci souligne en effet que la cogénération peut apporter une contribution importante à la réduction des principaux gaz à effet de serre et fixe comme objectif le doublement de la part globale de la production cogénérée dans l'ensemble de la Communauté, à charger pour les états membres de prendre les mesures nécessaires.

Pour fournir les mêmes quantités de chaleur utile et d'électricité qu'une cogénération, une installation à systèmes séparés (chaudière à 90% de rendement et centrale électrique à 52,5% de rendement) consomme 22% de combustible en plus.

On peut citer quelques intérêts de la cogénération :

➤ **Intérêt d'Ordre Energétique**

Les rendements sont très bons. Les centrales de cogénération électricité-chaleur peuvent atteindre un rendement énergétique de l'ordre de 90%. Environ 30% à 40% de l'énergie primaire sont transformés en énergie électrique, tandis que 50 à 60% se retrouvent sous forme de chaleur, utilisable pour alimenter un industriel ou un réseau urbain de chauffage.

La cogénération est l'une des solutions de la maîtrise de l'énergie, donc l'influence de la cogénération sur une unité industrielle est de :

- ✓ Récupérer 2/3 de la chaleur dissipée si l'unité de production est purement électrique;

- ✓ Améliorer le rendement national de l'énergie et la préservation des énergies non renouvelables.
- ✓ La cogénération permet la génération locale de l'énergie et la réduction du coût de transports de l'énergie. Le transport de l'énergie électrique à grande distance est très coûteux, surtout les prix des transformateurs, des pylônes, des lignes et leurs maintenance.

➤ **Intérêt d'Ordre Environnemental**

Le principal intérêt de la cogénération est de diminuer la production de gaz à effet de serre par la quantité d'énergie utilisée, et ce même en employant des combustibles fossiles (gaz en particulier).

Cet impact est positif et maximisé en cas d'utilisation de combustibles d'origine non fossile (bois énergie, biogaz, incinération de déchets...) ou de valorisation des rejets de CO<sub>2</sub> (après traitement) dans des serres afin de favoriser la croissance des plantes.

L'utilisation de système de traitement catalytique des fumées permet de réduire à des niveaux très faibles les émissions polluantes

Pour schématiser, l'impact en matière de pollution de l'air sera favorable si la cogénération se substitue à une production thermique classique, défavorable si elle se substitue à une production nucléaire, comme le montre le tableau ci-dessous.

**Tableau II.4 :** Effets environnementaux des centrales de production d'électricité et de chaleur [44].

Emissions pour 1 kWh produit en ...	CO <sub>2</sub> (kg)	SO <sub>2</sub> (mg)	NOX (mg eq NO <sub>2</sub> )
Centrale thermique charbon (1% de S)	0,95	7500	2800
Centrale thermique fioul (1% de S)	0,80	5000	1800
Centrale nucléaire	0	0	0
Cogénération TAV charbon (*)	0,57	4400	1170
Cogénération TAV fioul (*)	0,46	2930	990

### II.9.5. Paramètres clés des projets de cogénération

Plusieurs facteurs de risques peuvent affecter le succès d'un projet de cogénération. Si l'on fait le choix d'un équipement spécifique à une source d'énergie, il faut commencer par s'assurer de la disponibilité et de l'approvisionnement à long terme de cette source d'énergie. Ensuite, lors de la construction, le projet doit être bien géré pour que ses coûts restent dans les limites budgétaires. Lors de l'exploitation, le défi est d'avoir une bonne corrélation positive entre les besoins d'électricité et ceux de chaleur.

Si on veut valoriser efficacement les rejets thermiques de la centrale, il est nécessaire de pouvoir répondre à des besoins thermiques qui représentent une proportion élevée des rejets thermiques annuels de la centrale. Réciproquement, si la centrale doit combler des besoins thermiques et que toute l'électricité qu'elle produit ne peut être utilisée sur le site même, il est important de disposer de solides contrats de vente d'électricité à long terme.

En général, on dimensionne la production d'électricité en fonction de la charge thermique de base à combler, sachant que la capacité thermique des équipements varie typiquement entre 100 et 200 % de leur capacité électrique.

Finalement, la viabilité financière d'un projet de cogénération dépend considérablement des valeurs relatives de l'électricité produite et du combustible utilisé [48].

### II.9.6. Comparaison de rendements d'énergie

Une turbine à gaz équipée d'une chaudière de récupération peut produire environ 33 mégajoules d'électricité et 50 mégajoules de chaleur à partir de 100 MJ de combustible.

Si les mêmes quantités de chaleur et d'électricité étaient produites séparément, il faudrait consommer environ 80 MJ de combustible pour le groupe électrogène (moteur diesel et alternateur, rendement typique de 40%), plus 55 MJ pour la chaudière (avec un rendement typique de 90%), soit 135 MJ au total.

Dans cet exemple simplifié, la cogénération permet d'économiser environ 25% de combustible par rapport à la production séparée.

- Utilisation de l'eau ultrapure pour la génération d'électricité thermique :

Pour fabriquer la vapeur, de l'eau ultrapure est envoyée vers la chaudière de la centrale thermique. La chaudière transfère à l'eau la chaleur dégagée par la combustion, qui se transforme ainsi en vapeur surchauffée et sous pression. On peut atteindre actuellement des valeurs supercritiques de vapeur d'eau de plus de 250 bars et 600 °C. La vapeur traverse ensuite le rotor de la turbine qu'elle met en rotation et par la suite l'alternateur auquel il est couplé.

La turbine peut fonctionner en évacuant la vapeur en sortie vers l'atmosphère, ce qui induit alors une perte énergétique importante. C'est pourquoi, à l'échappement est généralement installé un dispositif de récupération de calories. Ce dispositif peut être une installation industrielle utilisant de la vapeur pour ses procédés ou bien un condenseur de vapeur. Le condenseur permet de récupérer la vapeur sous forme liquide pour la renvoyer vers le générateur de vapeur, au sein d'un circuit fermé.

La vapeur en sortie de turbine est refroidie dans le condenseur par la circulation d'eau froide dans un circuit secondaire (eau de mer, eau de rivière, air).

Ce principe de fonctionnement est le même pour toutes les centrales thermiques avec turbines à vapeur, quel que soit le combustible, fioul, gaz, incinération, biomasse,... etc.

Les centrales ont donc aussi besoin d'une source froide pour condenser la vapeur à la sortie des turbines avant son retour vers la chaudière. L'eau de refroidissement est soit simplement captée dans une rivière en amont de la centrale ou dans la mer, puis renvoyée réchauffée de quelques degrés Celsius dans le milieu naturel, ou bien stockée dans un circuit de refroidissement où elle est partiellement évaporée lors de son passage dans des tours aéro-réfrigérantes. Cette source froide peut être aussi l'air extérieur, mais avec dans ce cas une baisse de rendement de 10 à 20 % de la centrale, surtout dans les pays chauds.

Dans une centrale thermoélectrique, l'eau va devoir être répartie dans deux circuits indépendants (trois avec l'enceinte de confinement dans le cas des centrales nucléaires) :

- ✓ Le circuit générateur de vapeur qui est fermé et ne consomme que ce qu'est nécessaire à sa maintenance, à l'instar d'un circuit de chauffage central domestique,
- ✓ Le circuit de refroidissement de la vapeur qui y est condensée après son passage dans la turbine avant d'être renvoyée dans la chaudière. Ce second circuit sera soit ouvert sur l'extérieur (refroidissement par de l'eau de rivière ou de mer), soit fermé avec une dissipation de l'énergie par réchauffement de l'air atmosphérique (20 à 25 %) et par évaporation (75 à 80 % de l'énergie restante) dans les tours de refroidissement. Dans ces circuits (surtout le premier) sont ajoutés à l'eau des produits anticorrosifs, biocides, anti dépôts, etc., qui permettent d'accroître la durabilité des équipements, mais qui nécessitent le traitement des eaux de purge.

De plus, l'eau qui entre dans la centrale électrique doit avoir un niveau de pureté qui dépend du circuit dans lequel elle est utilisée. Celle qui en sort doit aussi disposer des qualités compatibles avec le respect de la réglementation environnementale et/ou des conventions passées avec les stations d'épuration locales. L'enjeu consiste donc à réduire les besoins en eau dans les procédés, afin d'en limiter le traitement.



Les besoins en eau des centrales thermiques nucléaires comprennent le refroidissement des circuits auxiliaires nucléaires et industriels, soit 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/s, ainsi que les eaux destinées aux conditionnements et à la compensation des purges, soit 100 000 à 140 000 m<sup>3</sup>/an.

Actuellement, les industriels s'attachent à améliorer, outre l'efficacité énergétique, la sobriété en eau et en matières premières des procédés et à optimiser le recyclage et le traitement de ces eaux.

### II.9.7. Recherche – développement :

Face aux défis environnementaux et économiques liés au marché de l'énergie, il convient de développer et commercialiser de nouvelles technologies dans le domaine de la cogénération, ce qui permet de gagner des points de rendement.

Parmi les diverses technologies employées, les piles à combustible et l'incorporation entre l'hydrogène et le méthane.

Les piles à combustibles ont pour atout majeur de présenter les plus hauts rendements de conversion électrique, au-delà de 35 %. Par ailleurs, l'ensemble des technologies de piles à combustible permettent de concevoir des systèmes de cogénération dans un très large spectre de puissance

De plus, la possibilité offerte par certaines technologies pile à combustible de travailler à haute température (jusqu'à 1 000 °C) permet la transformation de la chaleur produite en électricité par l'intermédiaire d'un cycle combiné présentant dans ce cas des rendements de conversion électrique pouvant dépasser les 60 %.

Si toutefois les technologies piles à combustible nécessitent encore des innovations technologiques afin d'en augmenter les performances, tout en réduisant leur coût de production, il s'avère qu'à ce jour, les ventes de systèmes de micro-cogénération domestique basés sur la technologie pile à combustible ont largement dépassées celles des technologies concurrentes. Ce résultat a pu être obtenu grâce à des incitations publiques (en particulier en Asie) qui ont permis l'émergence de cette technologie dont la maturité technico-économique est aujourd'hui une réalité.

Dans autre cas, la combinaison de l'hydrogène au méthane, est un nouveau système pour gagner à la marge : en « dopant » un moteur à gaz avec de l'hydrogène, le front de flamme change de configuration, la combustion se trouve améliorée et dégage davantage d'énergie.

« Nous gagnons un à deux points de rendement. Cela peut paraître faible, mais sur une installation fonctionnant 4 000 heures par an, cela finit par faire beaucoup ».

***CHAPITRE III :***  
***Mise en œuvre de la***  
***méthodologie expérimentale***

*Chapitre III***III. Mise en œuvre de la méthodologie expérimentale****III.1. Historique du groupe du CEVITAL**

Cevital SPA a été créée avec des fonds privés en 1998 et elle est la première société privée dans l'industrie de raffinage d'huiles brutes sur le marché algérien. Elle a pour actionnaires principaux, Mr ISSAD REBRAB & Fils. Son adresse est fixée au nouveau quai, arrière port de BEJAIA. La société peut avoir des bureaux, agences commerciales, unités partout où le conseil d'administration le jugera utile, tant en Algérie qu'à l'étranger sous réserve de l'accord préalable des autorités compétentes en la matière.

Les statuts constitutifs de la SPA Cevital, ont été établis par acte notarié en date du 13 avril 1998, auprès de l'étude notariale de Maîtres HAMADI & OUADHOR, 40 BD Mohamed V Alger.

Si on suit l'évolution de l'entreprise pour les cinq premières années on trouve que : En **1999** : Entrée en production de la raffinerie d'huile et lancement de la 1ère marque d'huile de table de haute qualité, 100% tournesol "FLEURIAL" ;

**2001** : Entrée en production de la margarinerie et lancement de la 1ère marque de margarine de table: "FLEURIAL" ;

**2003** : Entrée en production de la raffinerie de sucre (sucre blanc cristallisé aux normes de l'Union Européenne) ; lancement de la margarine de feuilletage "La parisienne", pour les boulangeries pâtisseries ;

**Avril 2005** : Lancement de trois nouveaux projets dont deux sur le site de Larbaâ (verre plat ; fabrication industrielle de produits manufacturés en béton), et l'acquisition des eaux minérales Lalla Khadîdja.

**2006** : Installation de l'unité de cogénération.

Cevital Agro-Industrie offre des produits de qualité supérieure à des prix compétitifs, grâce à son savoir-faire, ses unités de production ultramodernes, son contrôle strict de qualité et son réseau de distribution. Elle couvre les besoins nationaux et a permis de faire passer l'Algérie du stade d'importateur à celui d'exportateur pour les huiles, les margarines et le sucre.

Ses produits se vendent aujourd'hui dans plusieurs pays, notamment en Europe, au Maghreb, au Moyen Orient et en Afrique de l'Ouest. Aujourd'hui, Cevital Agro-industrie est le plus grand complexe privé en Algérie. Ses outils de production ultra performants se répartissent comme suit :

- **Sucre liquide** : capacité de production de 210.000t (équivalent matière sèche)/an.
- **Boissons** : eau minérale, boissons fruitées. L'eau minérale « Lalla Khedidja » avec une capacité de production de 3.000.000 bouteilles/jour, boissons fruitées «TCHINA» d'une capacité de production de 600.000 bouteilles par heure.
- **Conserverie** : de tomates et de confitures avec une capacité de production de 80 t/jour.
- **Silos portuaire** : 182.000 tonnes.
- **Terminal de déchargement portuaire** : 2.000 t/heure, le plus important du bassin méditerranéen.

### III.2. Source de l'eau utilisée pour la production de l'eau ultrapure

Au niveau du CEVITAL, l'eau brute utilisée est une eau obtenue à partir de deux sources :

- ✓ La première source est une eau de forage issue d'un puits artésien situé à Ibouracene environ 12km du complexe à Oued Ghir (Bejaïa) composé de trois puits ouverts dont l'eau épuisée d'une nappe phréatique, chaque puits possède une pompe à environ 40m de profondeur, ceci envois environ (9000-10000) m<sup>3</sup>/jour.
- ✓ La deuxième source situé au niveau de Tichy haff (Bejaïa) sous forme d'un barrage d'eau qui envoi après traitement un débit environ 4000 m<sup>3</sup>/jour.

### III.3. Description du processus de traitement par osmose inverse

L'unité d'osmose inverse est dotée de 4 lignes d'une capacité de production de 400 m<sup>3</sup> par heure d'eau déminéralisée (100 m<sup>3</sup>/ h pour chaque ligne), elle est alimentée en eau de forage sédimentée (eau brute) préalablement traitée avant son passage a travers des filtres à sable (20 filtres a sables : 10 filtres de pré filtration et 10 filtres de filtration), ce traitement consiste à injecter en permanence 1,5 à 2 mg/L du hypochlorite de sodium (NaOCl) et ainsi de flocculant (TD-FLOC) à l'aide des pompes doseuse.

L'eau préfiltrée est collectée dans un réservoir de 170 m<sup>3</sup>, ensuite passe par un système de vannes et parallèlement reçoit une dose de métabisulfite de sodium (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et du séquestrant (TD-ASCAL), puis l'eau pré filtrée traverse les filtres à cartouches (2 filtres) ayant un seuil de coupure de 1µm.

L'eau filtrée parcourt le 1<sup>er</sup> étage de l'osmoseur sous pression de l'ordre de 18 bars exercés par 3 pompes à haute pression.

Le perméat (eau osmose) est stocké dans un bac de 200 m<sup>3</sup>, tandis que, les rejets de 1<sup>er</sup> étage sont introduits dans le 2<sup>eme</sup> étage de l’osmoseur sous une pression de 10 bars.

Le processus général de traitement de l’eau par osmose inverse au niveau de Cevital est schématisé dans la figure (III.1)

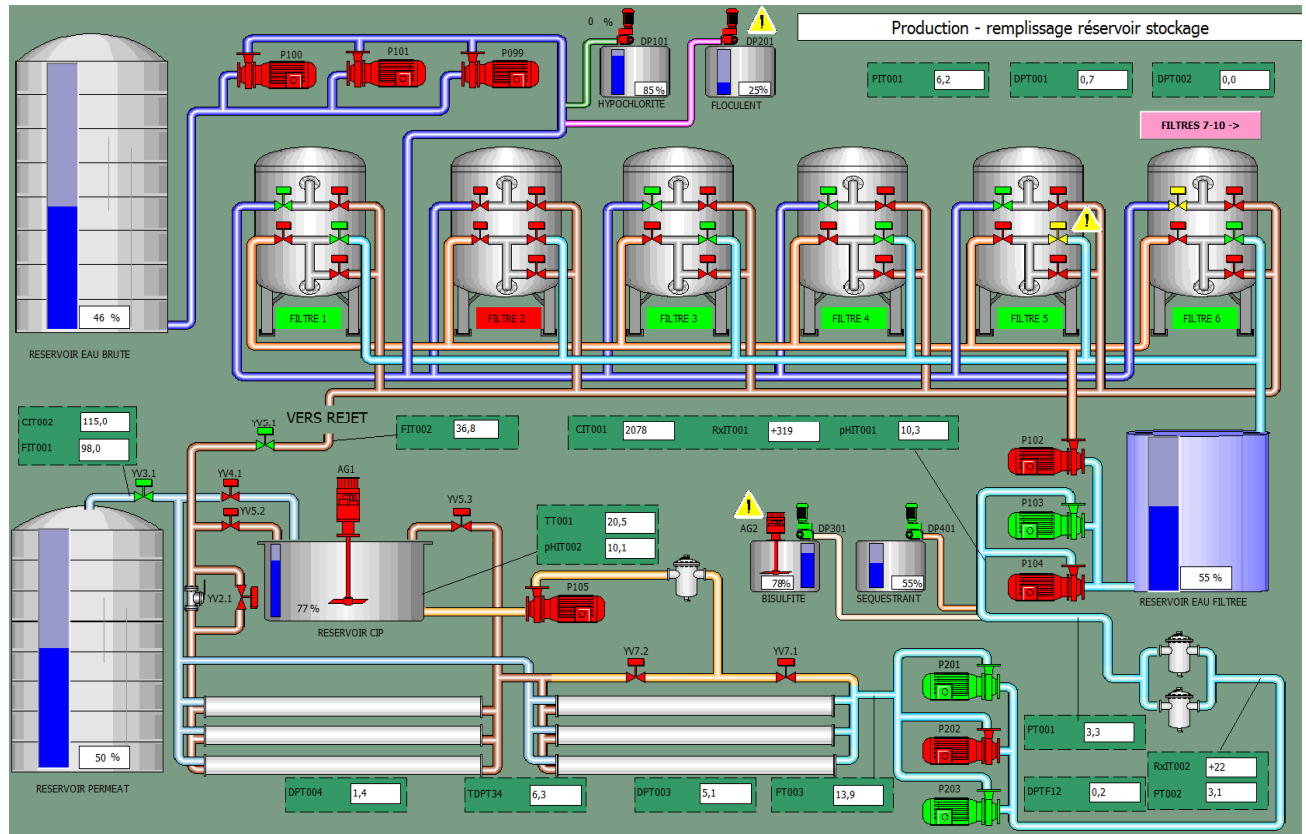


Figure III.1 : Processus de traitement de l’eau par osmose inverse au niveau de Cevital.

### III.3.1. Les étapes du procédé

Le système de traitement par osmose inverse passe de plusieurs étapes parmi ces étapes on peut citer :

- ❖ Un système d’alimentation en eau brute ;
- ❖ Un système de prétraitement composé de :
  - ✓ Système de stérilisation et régénération du dioxyde de manganèse ;
  - ✓ Prétraitement avec filtres à sable ;
  - ✓ Réservoir de stockage de l’eau filtrée ;
  - ✓ Groupe de déchloration ;
  - ✓ Groupe de dosage de produit séquestrant ;
  - ✓ Groupe de dosage de produit biocide ;

- ✓ Filtres à cartouche ;
- ✓ Système de contre lavage ;
- ❖ Système d'osmose inverse ;
- ❖ CIP (Cleaning In Place).

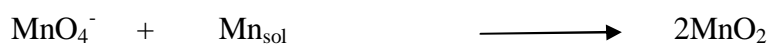
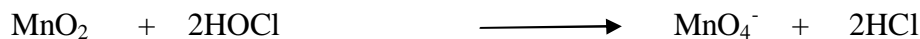
### III.3.1.1. système d'alimentation en eau brute

Après passage par filtres à sable et filtres à cartouches, l'eau utilisée au niveau d'osmose inverse est une eau proviennent d'un puits de forage issue d'un puits artésien IBOURACEN et d'une station d'épuration de TICHYHAFF. L'eau est pompée puis acheminée vers un bassin de pré-décantation de 120 m de longueur et 30 m de largeur. A ce niveau, de l'hypochlorite de sodium est dosé en favorisant l'oxydation des ions ferreux et la formation de l'hydroxyde de fer capable de précipiter.

### III.3.1.2. système de prétraitement

#### III.3.1.2.1. groupe de stérilisation et régénération du dioxyde de manganèse

A l'entrée des filtres à sable, de l'hypochlorite de sodium est dosé afin de prévenir toutes proliférations bactériennes. De même le dosage en continu du chlore permet la régénération du dioxyde de manganèse par réaction catalytique du manganèse soluble après oxydation superficielle du  $MnO_2$  en  $MnO_4^-$  suivant la réaction :



Pour éliminer le fer, le floculant (TD-FLOC) est dosé. La déferrisation utilise aussi le  $MnO_2$  (pyrolusite) par l'oxydation des ions ferreux pour former de l'hydroxyde de fer.

#### III.3.1.2.2. Prétraitement avec des filtres à sable

Cevital est munit de 20 filtres a sable, 10 filtres de pré filtration, et 10 filtres de filtration, qui ont une capacité de 50 m<sup>3</sup>/ h pour chaque filtre. Dans ce cas la filtration s'effectue le long d'un milieu poreux (le sable qui constituée de multicouches en pyrolusite (dioxyde de manganèse), plus ou moins tortueux, Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure, qui se colmatara en

profondeur au fur et à mesure de l'accumulation des particules en suspension lors du passage du fluide.

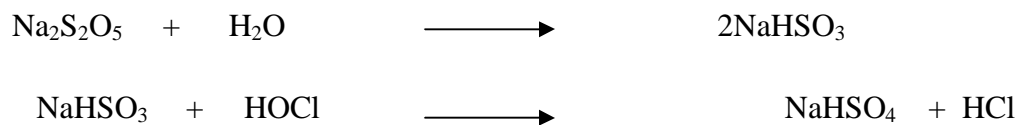
Ce système permet d'éliminer la plupart des particules en suspension ayant un diamètre supérieur à 40 µm, huile et graisse contenant dans l'eau brute; produit une eau filtrée à basse turbidité prête pour l'étape d'OI.

#### **III.3.1.2.3. Réservoir de stockage de l'eau filtrée**

L'eau filtrée est stockée dans un réservoir intermédiaire, ce qui rend indépendant la section osmose.

#### **III.3.1.2.4. Groupe de déchloration**

Sur la ligne d'alimentation des lignes d'osmose, et avant les filtres à cartouche, du métabisulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) est dosé pour neutraliser le chlore libre. Ce dernier peut oxyder les parois superficielles des membranes en polyamide. La réaction du métabisulfite de sodium avec le chlore et l'eau est la suivante :



L'avantage du métabisulfite, par rapport aux autres techniques (photochimie, filtres à charbon actif...), est qu'il est aussi un réducteur d'oxygène, ce qui ralentit considérablement le développement des germes sur l'osmoseur.

#### **III.3.1.2.5. Groupe de dosage de produit séquestrant**

Avant les filtres à cartouche, une quantité préétablie du produit séquestrant (TD-ASCAL) est dosée dans l'eau d'alimentation, pour permettre la dispersion des carbonates de calcium, des sulfates de calcium, des sulfates de baryum...etc. Il retarde ainsi leur précipitation, et de cette manière, les membranes s'encrassent moins rapidement et le nombre de CIP diminue.

#### **III.3.1.2.6. Groupe de dosage de produits biocides**

Pour éviter toute prolifération bactérienne et formation de biofilm, il est prévu de doser une fois par semaine un produit biocide. Le dosage (le nettoyage) s'effectue d'une demi heure jusqu'à trois (3) heures pour chaque ligne des membranes d'osmose inverse (ligne par ligne).

#### **III.3.1.2.7. Filtre à cartouche**

L'entreprise agro-alimentaire Cevital est disposées de deux (2) filtres a cartouches, chaque cartouche est constitué d'une enveloppe de pression contenant la ou les cartouches (18 cartouche pour chaque filtre) avec un orifice d'arrivée d'eau à filtrer et un orifice de sortie d'eau filtrée, ces filtres d'encombrement réduits. Ils sont prévus pour éliminer toutes les particules ayant un diamètre supérieur à 1µm.



**Figure III.2 :** Face externe des filtres à cartouches utilisées au niveau de Cevital.

#### **III.3.1.2.8. Contre lavage**

Pour éviter tout encrassement des filtres à sable on procède à leur lavage qui s'effectue en deux phases

✓ **Première phase**

L'air passe à travers ces filtres pour détacher du matériau filtrant les impuretés retenus.

✓ **Deuxième phase**

On effectue un retour d'eau à fort débit assurant une mise en expansion des matériaux filtrant. Cette dernière permet d'extraire du lit et d'évacuer les impuretés détachées lors de la première phase.

#### **III.3.1.3. Système d'osmose inverse**

C'est la section principale de tout les systèmes, le système d'OI au niveau de Cevital est composé de quatre lignes de 400 m<sup>3</sup>/h (100 m<sup>3</sup>/h pour chacune). L'eau provenant des filtres de sécurité est envoyée aux modules R01, R02, R03 et R04 par des pompes hautes pression.

Dans ces modules, l'eau est séparée en eau déminéralisée (produit) et en concentrât (eau rejeté). Le taux de récupération est de 72%. Une partie de l'eau produite est stockée et acheminée vers les chaudières par deux pompes centrifuges (l'utilisation des vapeurs d'eau



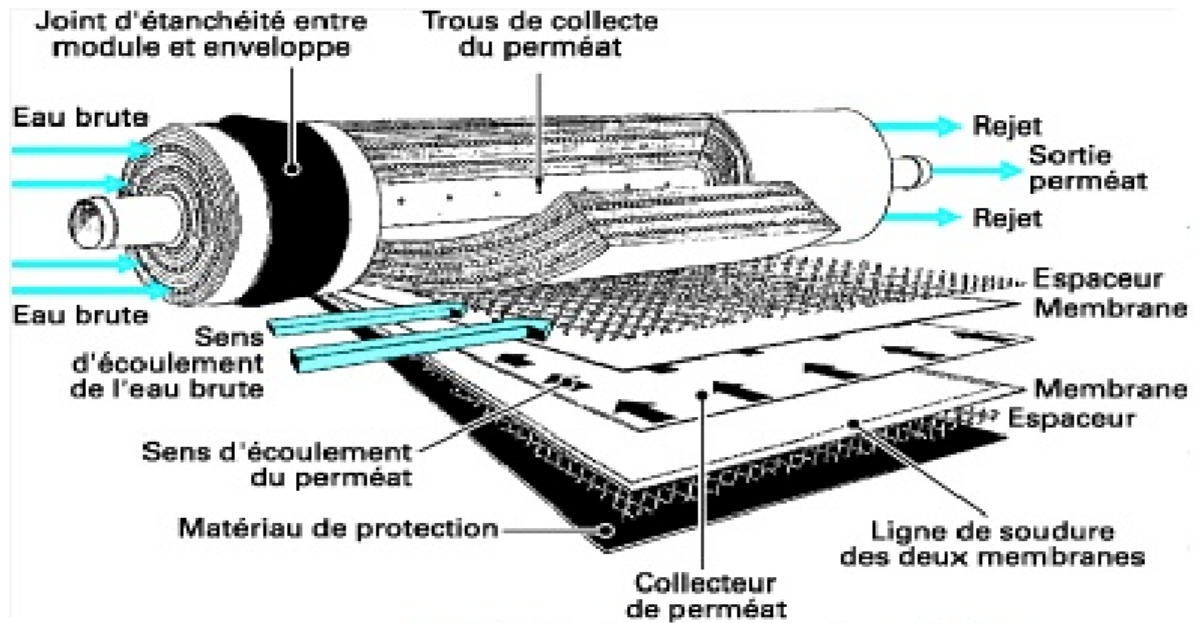
osmosée dans la raffinerie du sucre), tandis que l'autre partie de perméat de l'eau osmosée est accédé à l'étape suivant (l'électrodésionisation) pour la production de l'eau ultrapure.

Les modules spirales d'osmose inverse sont constitués des membranes piquées (6 membranes par module), ces membranes sont enroulées sur elle même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat (perméat de l'eau osmosée). On obtient ainsi un cylindre multicouche où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

Ces membranes sont composées d'un matériau organique et ayant une durée de vie de 4 ans (au niveau de Cevital, les membranes seront changés chaque 3 ans). Les modules sont composés d'un tube sur lequel sont enroulés successivement une membrane, une grille fine, une autre membrane et une grille plus grossière. Les membranes doivent donc être suffisamment flexibles pour être enroulées. Le retentât circule à travers la grille moins fine tandis que le filtrat (perméat) va aller jusqu'à la grille plus fine où il passera dans le creux central du tube.



**Figures III.3 :** La face externe d'un module d'osmose inverse utilisée au niveau de Cevital.



**Figure III.4 :** Schéma d'une coupe de cartouche de la membrane d'osmose inverse.

#### III.3.1.4. Lavage sur place (CIP)

Lorsque la pression d'exercice sur les membranes diminue de 10% pour les mêmes conditions d'exercice, il est nécessaire de laver les membranes avec un produit acide ou basique. Le produit acide est un mélange de :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{HCL ou un produit (TD WACH 1)} \\ + \\ \text{Eau osmosée} \end{array} \right.$$

Tandis que le produit basique est le (TD WACH 2).

#### III.4. Electrodéionisation

Le système d'électrodéionisation (CEDI) utilisé au Cevital, est composé de 2 lignes de 48 m<sup>3</sup>/h (24 m<sup>3</sup> pour chaque ligne), mais cela ne produit que de 30 m<sup>3</sup>/h d'eau ultrapure (15 m<sup>3</sup>/h pour chaque ligne), figure (III.4).



**Figure III.5 :** La face externe des modules d’CEDI utilisée au niveau de Cevital.

La conductivité de l’eau de produit typiquement fournit par le système de CEDI et tout à fait en conformité avec les spécifications.

Le système de CEDI est alimenté par le perméat pressurisé, produit par l’unité d’OI, L’eau produite par le système de CEDI sera dirigée vers le réservoir de stockage de l’eau ultrapure.

Ce process permet d’attirer et d’éliminer tous les composants chargés, encore présents dans l’eau osmosée.

L’unité de traitement d’eau équipée d’un module d’électrodéionisation nous assure :

- Conductivité < 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Réduction d’un facteur 10 du Carbone Organique Total (TOC)
- Absence de métaux lourds
- pH neutre

#### **III.4.1. Spécifications du CEDI**

L’un des inconvénients major de l’électrodéionisation est leur nécessité d’une eau de très bonne qualité. Pour répondre a la qualité de l’eau ultrapure, des normes spécifiques doivent être respectés lors de l’alimentation, sa spécification se résume dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : spécification de l'eau d'alimentation maximum du CEDI.

Spécification de l'eau d'alimentation maximum (perméat l'eau osmosée)	
Conductivité de l'eau d'alimentation	<40µS/cm
Source de l'eau d'alimentation	Eau de perméat de l'osmose inverse
température	41-113°F (5 – 45°C)
Pression à l'entrée	30 – 100psi (2,1 -7 bar)
Fer	<0 ,01ppm
Manganèse	<0,01ppm
Ion sulfite(S <sup>-</sup> )	<0,01ppm
PH	4 - 11
Dureté totale de CaCO <sub>3</sub>	≤ 2,00ppm
Matière organique dissoute	<0,5ppm
Maximum du chlore libre	<0,02ppm
La silice (SiO <sub>2</sub> )	<1,00ppm

III.4.2. Description du processus

Le système de CEDI est conçu pour produire (en continue) de l'eau déionisée (eau ultrapure) à partir du perméat de l'eau osmosée, figure (III.6).

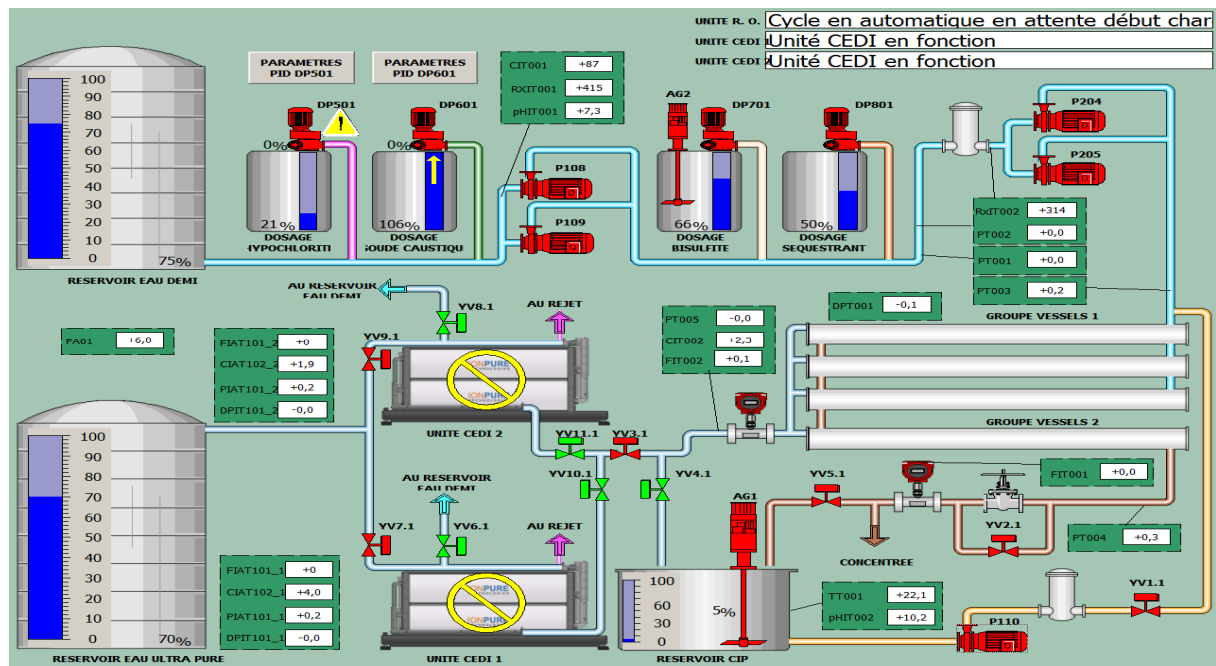


Figure III.6 : Schéma de production d'eau ultrapure par la combinaison OI-CEDI.

Les modules de CEDI se composent de plusieurs compartiments constitués en alternance par des membranes d'échange anionique et cationique. L'espace situé au centre de la cellule, entre les deux membranes "compartiment de dilution" est remplis de résine échangeuse d'ions. Les cellules sont séparées les unes des autres par des compartiments intercellulaires nommés compartiments de concentration.

L'eau d'alimentation entre dans le module à un point et distribuée dans les modules à travers des chemins d'écoulements de perméat (eau ultra pure), de concentrât et d'électrode. Sous l'action d'un potentiel électrique créée par une alimentation de courant continu, les ions vont migrer aux travers les membranes vers un compartiment de concentration tout en régénérant les résines sans interruption de process.

De cette manière le perméat se résilier graduellement des ions jusqu'à la sortie pour devenir une eau ultra pure.

Le potentiel électrique décompose l'eau en ions d'hydrogène (H<sup>+</sup>) et d'hydroxyle (OH<sup>-</sup>), ce qui régénère alternativement les résines échangeuses d'ions.

Comme uniquement les ions peuvent passer à travers les membranes sélectives, une partie de l'eau d'alimentation est employée pour éliminer les ions des compartiments de concentré et d'électrode. Ce concentré s'appelle l'eau de rejet (concentrât) et réutilisé en amont de l'unité d'OI. Le débit des rejets est en général 5-10% du débit d'alimentation.

Une petite partie traverse les canaux d'électrodes pour emporter les concentrés et le peu de gaz formés sur la superficie d'électrodes. Le rejet est repris en amont de l'unité d'osmose inverse.

**Tableau III.2 : Caractéristiques du module type CEDI.**

Module type CEDI	IP-VNX50-2
Capacité	24 000 l/h
Récupération	9.0%
Débit rejet (à réutiliser en amont)	≥ 1200 l/h (≥5%)
Pression d'utilisation	2.0-7.0 bar

**III.4.3. Les commandes de régulation du procédé**

Le panneau de commande contient les composants suivants:

- Instruments de conductivité.

- Unité d'alimentation électrique.
- Interface pour l'opérateur.
- Borniez (terminal) pour relier le courant électrique  $3 \times 400V$ , le signal de commande Start/stop et signaux externes.
- Relais, commutateurs etc., nécessaires pour le fonctionnement correct de l'unité.

#### **III.4.3.1. Instrument de conductivité**

Les transmetteurs/indicateurs contrôlent la conductivité de l'eau d'alimentation, du produit et du rejet.

Des valeurs de conductivité et de température sont indiquées sur l'affichage à cristaux liquide de l'interface de l'opérateur. Les instruments sont équipés de trois sorties programmables d'alarme. L'instrument est également équipé des deux signaux de sortie programmables pour la conductivité et/ou la température.

#### **III.4.3.2. Alimentation d'énergie**

L'unité d'alimentation dans le tableau de commande est l'élément principal pour le fonctionnement correct du module de CEDI. L'unité d'alimentation se compose d'un transformateur d'isolement suivi d'un redresseur de tension. Les signaux de sortie pour la tension et l'ampérage sont disponibles sur la carte d'alimentation pour visualiser les valeurs réelles sur le panneau d'interface de l'opérateur.

#### **III.4.3.3. Interface pour l'opérateur**

Une interface pour l'opérateur est incorporée dans le tableau de commande, pour la commande générale du système du CEDI. Des valeurs des processus sont affichées sur des divers écrans de l'interface pour l'opérateur comme indiqué dans le schéma (III.6).

### **III.5. Description du procédé de la cogénération mise en place**

La cogénération est une production combinée de chaleur et d'électricité qui recouvre un ensemble de techniques de production délivrant de façon simultanée de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique, cette dernière étant le plus souvent utilisée pour produire de l'électricité par couplage à un alternateur. L'énergie primaire utilisée peut être le fuel, le gaz, le charbon, le bois...etc.

Ce concept technique classique répond aux préoccupations actuelles de préservation de l'environnement, non seulement en réduisant la consommation d'énergie, mais aussi en

limitant les rejets nocifs. Les industries les plus concernées sont celles dont les process utilisent l'eau chaude, la vapeur ou l'air chaud.

Le groupe Cevital a opté pour ce type d'installation afin de répondre à ses besoins en matière d'énergie électrique et thermique pour son complexe agro-alimentaire situé à Bejaia.

### **III.5.1. Présentation de l'installation**

L'atelier cogénération comporte :

- Une bache d'alimentation de 88 m<sup>3</sup> qui sert d'appoint pour les deux chaudières ; Deux chaudières à vapeur d'une capacité d'alimentation en eau ultrapure de 15 m<sup>3</sup>/h pour les deux chaudières (7.5 m<sup>3</sup>/h pour chaque chaudière), et une capacité de production de 150 t/h de vapeur pour chaque chaudière, à 54 bar et 480°C ;
- Deux turbines à vapeur de 50 MW (25 MW par turbine), avec turbine à contrepression (admission 54 bar, 480 C°, échappement réglable entre 2.7 et 3.7 bar (température de 140 à 220 °C suivant le régime) ;
- Une installation de détente désurchauffe pouvant détendre et désurchauffer 300t/h de vapeur de (54 bar à 2.7 bar) à 140°C ;
- Six (6) bouilleurs d'une capacité de production de 300t de vapeurs secondaires (50t de vapeur par bouilleur).
- Une batterie d'Aérocondenseurs permettant de condenser au maximum 150 t/h de vapeur d'échappement de la turbine ;
- Les bacs à eau déminéralisées et bacs à condensats ainsi que les pompes correspondantes.

#### **III.5.1.1. Bâche dégazant**

C'est un réservoir d'eau de 88 m<sup>3</sup> qui permet de préparer l'eau des chaudières. La bache est alimentée en eau déminéralisée (eau ultrapure) chauffée à 105°C par le retour de vapeur des turbines.

#### **III.5.1.2. Chaudières**

Ce sont des générateurs à « tubes d'eau », à simple ballon et à circulation naturelle. Elles sont du type compact en ligne, à chambre de rayonnement horizontales et équipées de deux brûleurs installés en façade avant la chaudière (brûleur BAS NO<sub>x</sub> gaz naturel). Ces chaudières ont des capacités d'alimentations en eau ultrapure de 15 m<sup>3</sup>/h (7.5 m<sup>3</sup>/h pour chaque chaudière), et destinées à produire chacune en marche nominale 150 t/h de vapeur surchauffée à une pression de 54 bars et une température de 480°C.

Les faisceaux évaporateurs sont constitués de harpes disposées verticalement dans un carneau horizontal situé dans le prolongement de la chambre de combustion.

Chaque générateur est équipé d'une surchauffeur pendulaire à deux étages ; un étage haute température (SHT) et un étage à basse température (SBT) disposés verticalement en amont des faisceaux évaporateurs.

La désurchauffe est obtenue par injection d'eau d'alimentation entre les deux étages de surchauffe.

Chaque chaudière est équipée d'un ballon vapeur qui sert de réservoir pour la vapeur provenant de l'économiseur et de la chambre de combustion. Au niveau de ce ballon sont dosés :

- Des produits pour la désoxygénation à base de DEHA (DiethylHydroxylAmine) ;
- Des produits à base d'amine pour la protection des circuits de vapeur et condensat ;
- Des produits polymériques dispersants et des mélanges de phosphates pour l'effet tampon du pH, indiqué pour l'eau d'alimentation ultra pure.

Chaque chaudière est équipée d'un économiseur installé à l'arrière (à la sortie des faisceaux évaporateur) et entièrement indépendant. Une cheminée commune aux deux chaudières est installée à l'arrière de ces dernières.

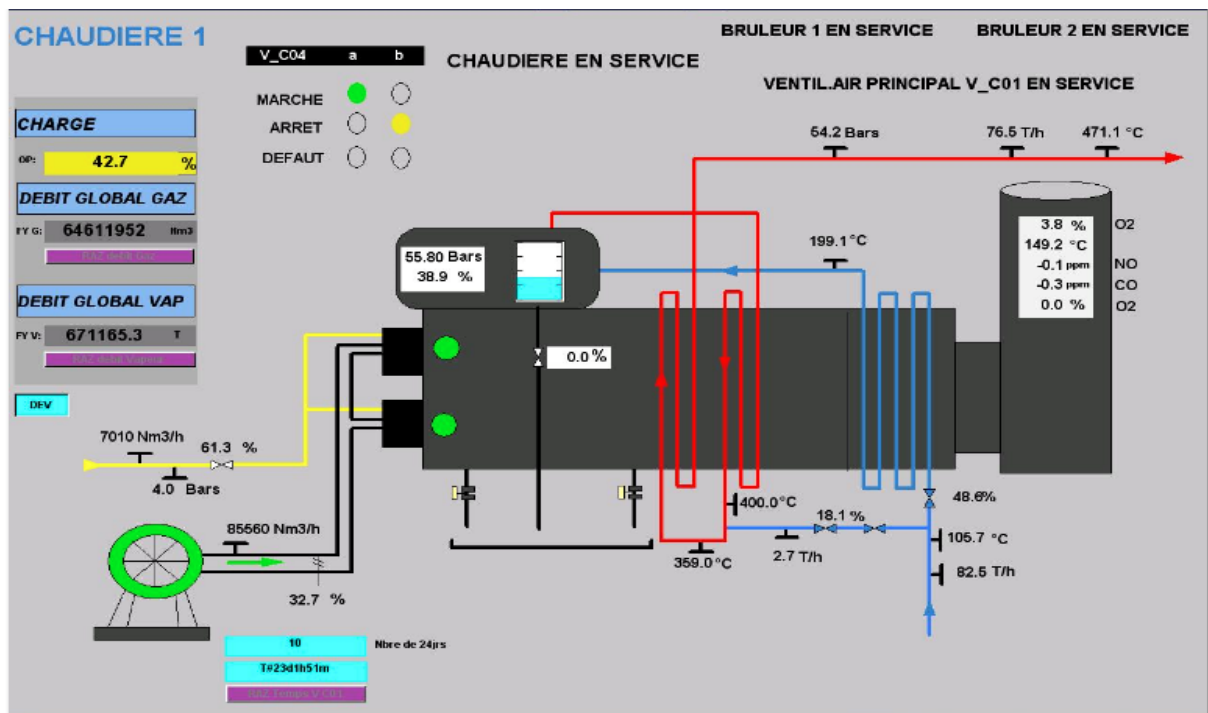


Figure III.7 : Schéma illustre l'entrée de l'eau ultrapure dans une chaudière au niveau de Ceval.



**III.5.1.3. Turbines à vapeur**

Dans les turbines à vapeur, l'énergie mécanique (puis électrique) est produite par la détente de vapeur haute pression générée dans une chaudière. Les caractéristiques de chaque turbine sont les suivantes :

- Production : 25 MW chacune
- Consommation : 150T/J de vapeur par turbine.
- Restitution : 150 T/h de vapeur détendue entre 2 et 4 bars.

Au niveau du complexe, ces deux turbines à vapeur ont des capacités de production de 50MW/jour ; mais son fonctionnement est programmé pour produire seulement 20 MW/jour d'électricité (10 MW pour chaque turbine), en effet, cette production est supérieur a une quantité d'électricité consommée par toute la ville de Bejaia, s'achant que cette dernière consomme environ 12 MW par jour.

**III.5.1.4. Bouilleurs KAPP**

La fonction des bouilleurs est de transformer la vapeur d'échappement des turbines (2.7 à 3.7 bar) en vapeur pour le process (2.0 bar) de façon à retourner les condensats provenant de la vapeur d'échappement (condensat primaire) à la bêche alimentaire, sans risque de contamination.

Cevital est dotées de 6 bouilleurs d'une capacité de production de 300t de vapeur (50t de vapeur par bouilleur).

**III.5.1.5. Les aérocondenseurs**

En cas de disfonctionnement ou de panne au niveau des EVAPO-CONDENSEURS, des AEROCODENSEURS sont prévus pour permettre le refroidissement de la vapeur issue des turbines. L'eau est acheminée vers deux bacs de stockage de l'eau ultra pure.

Il sert à abaisser la température des vidanges et des purges, avec une eau de refroidissement (volume environ 3.6 m<sup>3</sup>).

**III.5.1.6. Cheminée (commune aux deux chaudières)**

Elle sert à l'évacuation du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) dégagé par la combustion des deux chaudières. Elle est munie d'un analyseur de vapeur pour déterminer le taux de CO et de NO.

**III.5.2. Le procédé de l'eau ultra pure**

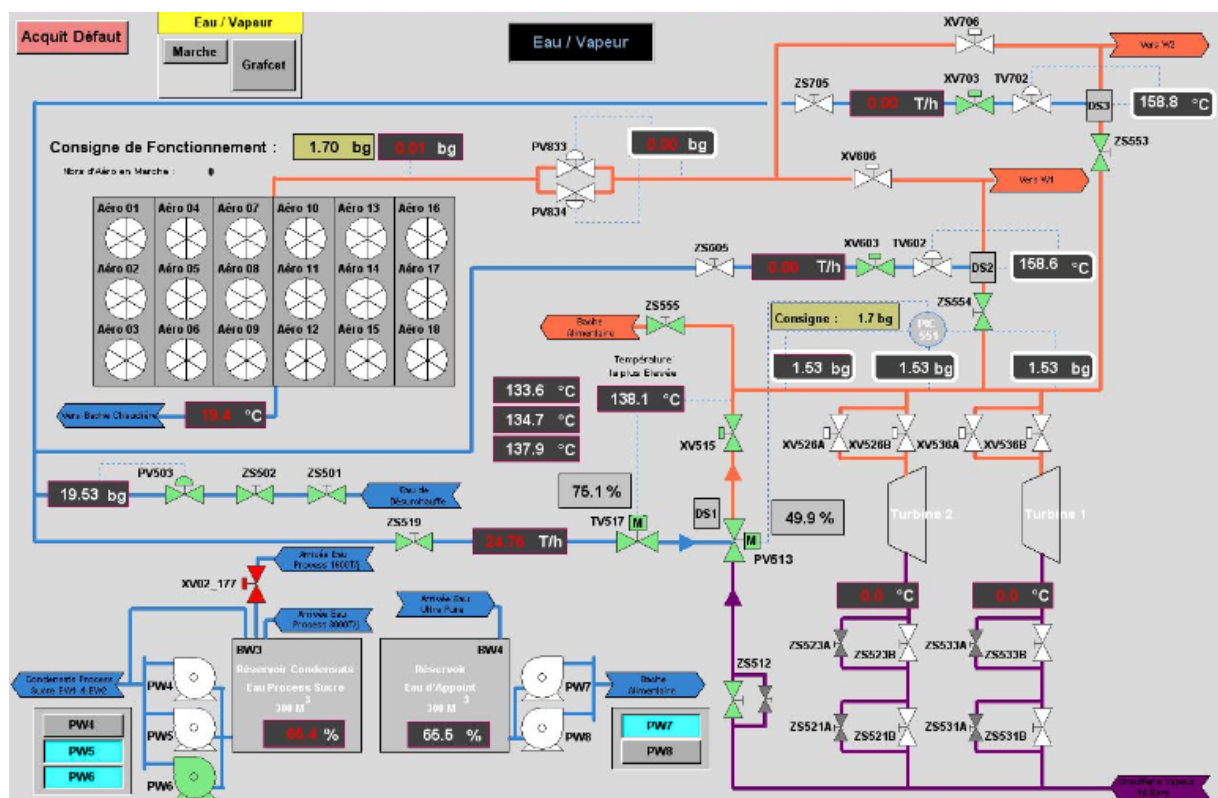
L'eau ultra pure est produite par les modules d'électrodéionisation à partir de perméat de l'eau osmosée. Elle est acheminée vers un bac de stockage de 300 m<sup>3</sup> qui sert d'appoint à

la bache alimentaire. Le retour de vapeur des turbines condensées par les aérocondenseurs permet d'élever la température au niveau de la bache à 105°C.

Trois pompes dont une en stand-by envoient l'eau de la bache vers les économiseurs des deux chaudières, au niveau desquels la température de la vapeur d'eau atteint 200°C, pour être ensuite acheminée vers la chambre de combustion de la chaudière, via un ballon vapeur. A ce niveau la vapeur atteint 374°C sous une pression de 56 bars.

La vapeur est réacheminée vers le ballon puis vers une surchauffeur basse température (SBT), pour atteindre 400°C et enfin vers la surchauffeur haute température (SHT) où la vapeur d'eau atteint 480°C sous une pression de 65bars.

Une désurchauffe entre les deux compartiments par une eau alimentaire permet d'avoir une température à la sortie du SBT de 392°C. La vapeur produite à 480°C est drainée vers deux turbines pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique.



**Figure III.8 :** Schéma de système de production d'électricité à partir de l'eau ultrapure au niveau de Cevital.

Les turbines se composent de tuyères ou de jets et d'ailettes. La vapeur s'écoule dans les tuyères, et par le phénomène de dilatation, la température et l'énergie interne diminuent et l'énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression et exécute un

travail contre les ailettes entraînant leur rotation ce qui permet à la turbine d'actionner l'alternateur.



**Figure III.9 :** La face externe d'une turbine à vapeur utilisée au Cevital.

La vapeur de 480°C sous une pression de 65bars est détendue au niveau des turbines à une pression de 2.7 à 3.7bars. Elle est envoyée vers les évapocondenseurs et mise en contact avec l'eau osmosée, pour la production d'une vapeur d'eau osmosée (utilisée au niveau de la raffinerie de sucre) sous une pression de 2 bars.

### **III.6. Contrôle et suivi par analyses physico-chimiques de l'eau brute et des eaux de process aux différents points de colmatage : eau brute- osmoseur – CED**

#### **III.6.1. Le potentiel d'hydrogène (pH)**

##### **❖ Définition**

Le potentiel d'hydrogène est une mesure de l'acidité, de l'alcalinité ou de la neutralité d'une solution aqueuse, exprimée par le logarithme décimal de l'inverse de la concentration de la solution en ions hydrogène ( $H^+$ ) exprimée en mole/l. Le pH varie entre 0 et 14 ; 7 étant le pH correspondant à la neutralité. Une eau est d'autant plus acide que son pH (inférieur à 7) est plus près de 0, et d'autant plus alcaline que son pH (supérieur à 7) est plus près de 14.

##### **❖ Le principe**

C'est la mesure de la différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence plongeant dans une même solution séparées par une jonction caractérisée par son potentiel propre (potentiel de jonction). Le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions  $H^+$ .

**❖ Matériels**

- ✓ pH-mètre HACH HQ40D
- ✓ bécher

**❖ Mode opératoire:**

- étalonner le pH-mètre avec deux solutions étalons de pH (7 et 10) ou (4 et 7) selon la gamme de mesure à réaliser ;
- prendre un bécher contenant l'eau à analyser ;
- plonger la sonde du pH-mètre dans l'échantillon ;
- après stabilisation, lire le résultat.

**III.6.2. La conductivité****❖ Définition**

La conductivité électrique de l'eau représente la propriété d'une solution de conduire le courant électrique, en fonction de la quantité de ions présents dans l'eau (exprimée en micro siemens par centimètre). Elle augmente avec la température et la concentration des sels dissous.

**❖ Le principe**

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (en platine ou en graphite) de  $1\text{cm}^2$  de surface et séparées l'une de l'autre d'une distance de 1 cm. elle est l'inverse de la résistivité électrique.

**❖ Matériels :**

- ✓ conductimètre HACH HQH40D
- ✓ bécher

**❖ Mode opératoire**

Après avoir étalonné le conductimètre avec une solution de KCl :

- plonger la sonde de l'appareil préalablement rincée dans un bécher avec l'eau à analyser
- secouer la sonde légèrement afin d'éliminer les bulles d'air ;
- attendre quelques secondes et mesurer la conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**III.6.3. Méthodes titrimétriques (TA-TAC-TH)****III.6.3.1. Le titre alcalimétrique (TA)****❖ Définition**

L'alcalinité d'une eau correspond à la somme des concentrations des ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et des ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ), déterminée par addition de la quantité d'acide sulfurique nécessaire au virage de la phénophtaléine du rouge à l'incolore à pH égale 8,3.

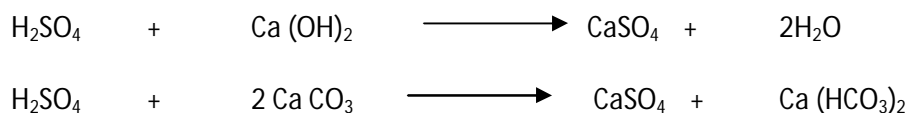
Si le pH est inférieur à 8,3, le TA est nul et l'eau ne contient pratiquement que des bicarbonates.

Le TA s'exprime en degrés français ( $^\circ\text{f}$ ). La notion équivalente allemande est le «pWert», exprimé en degré allemands ( $^\circ\text{dH}$ ).

#### ❖ Principe

Détermination du volume d'acide fort en solution diluée nécessaire pour neutraliser au niveau de pH 8,3, le volume d'eau à analyser.

#### ❖ Réaction chimique



#### ❖ Matériels

- ✓ ERLLENMEYER 250 ml ;
- ✓ fiole de 100 ml ;
- ✓ burette graduée de 10 ml.

#### ❖ Réactifs

- ✓ acide sulfurique (0,04 N) ;
- ✓ phénophtaléine.

#### ❖ Mode opératoire

- ✓ prendre 100 ml d'une eau à analyser dans un ERLLENMEYER ;
- ✓ ajouter deux gouttes de Phénophtaléine (un indicateur de pH) et agiter.
- ✓ si la solution reste incolore, le TA est considéré comme nul ( $\text{TA} = 0$ ), et cela indique que le pH est inférieur à 8,3.
- ✓ dans le cas où une coloration rose se forme, titrer avec une solution étalon d'acide sulfurique à 0,04 N jusqu'à la décoloration totale.

#### ❖ Expression des résultats

Le calcul de TA :

$$\text{TA } (^\circ\text{f}) = V \text{ ml} \times 2$$

\* TA : Titre alcalimétrique.

\*  $^\circ\text{F}$  : Degrés français ( $1^\circ\text{F} = 10\text{meq/l}$  de  $\text{CaCO}_3$ ).

\* V : Volume de la chute de la burette en ml.

### III.6.3.2. Le titre alcalimétrique complet (TAC)

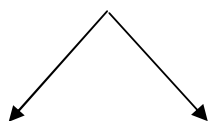
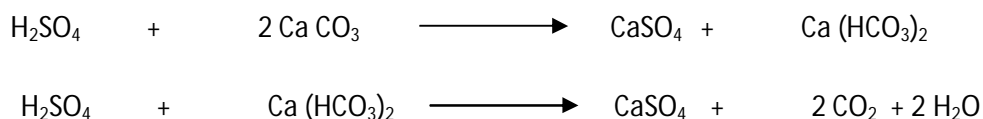
#### ❖ Définition

Le TAC mesure la teneur en hydrogénocarbonate, hydroxyde libre et en carbonate et bicarbonate contenus dans l'eau, déterminée par addition de la quantité d'acide sulfurique nécessaire au virage du méthylorange (ou hélianthine) du jaune à l'orangé à pH 4,3. Le TAC est exprimé en degrés français.

#### ❖ Principe

Détermination du volume d'acide fort en solution diluée nécessaire pour neutraliser au niveau de pH 8,3, le volume d'eau à analyser.

#### ❖ Réactions chimiques du TAC



Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> déjà existant

Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> formé dans 2<sup>ème</sup> réaction

#### ❖ Matériels

- ✓ ERLLENMEYER 250 ml.
- ✓ fiole de 100 ml.
- ✓ burette graduée de 10 ml.

#### ❖ Réactifs

- ✓ acide sulfurique (0.04 N).
- ✓ méthyle orange.

#### ❖ Mode opératoire

- ✓ prendre le même échantillon pour l'analyse du TA et ajouter 2 gouttes d'Hélianthine ou du Méthyle Orange.
- ✓ une coloration jaune doit apparaître.
- ✓ titrer avec le même acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) jusqu'au virage de la coloration jaune vers l'orange.

## ❖ Expression des résultats

Le calcul du TAC :

$$\text{TAC } ^\circ\text{F} = (V'' - 0,1) \text{ ml} \times 2.$$

## III.6. 3.3. Le titre hydrotimétrique total TH (dureté totale)

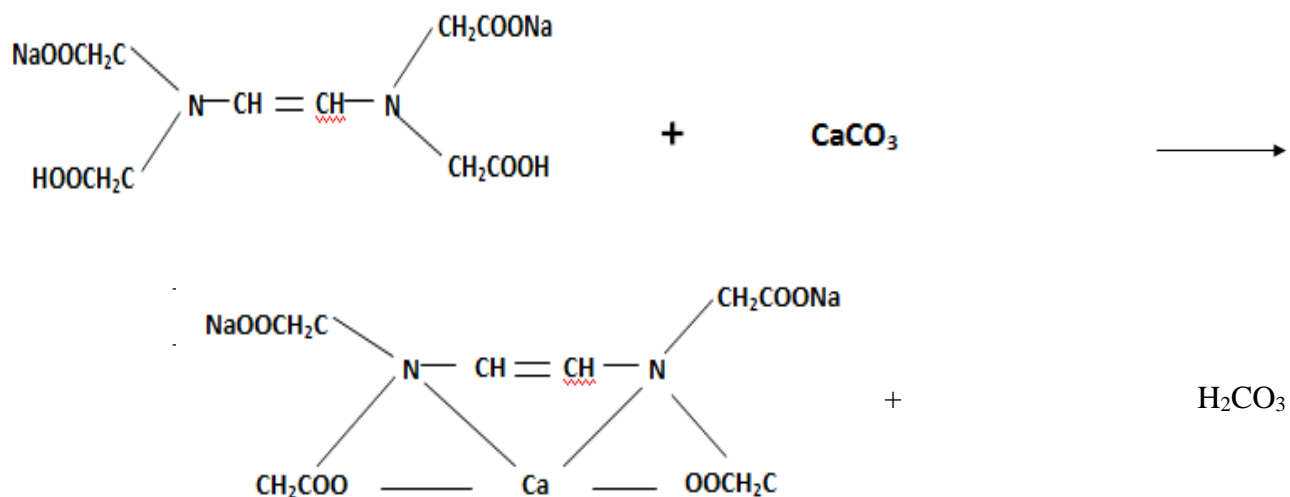
## ❖ Définition

Le titre Hydrotimétrique total (dureté totale) ou le TH total est une mesure globale de la concentration en sels dissous de calcium et de magnésium dans l'eau.

## ❖ Principe

Le TH total est déterminé par dosage complexométrique en présence de sel disodique (EDTA-NA) et du Noir Eriochrome comme indicateur coloré. Le sel disodique de l'EDTA (complexon) se combine aux ions calcium puis magnésium, en donnant des complexes solubles peu dissociés. La fin de la réaction est mise en évidence par le noir Eriochrome T, qui vire du violet au bleu l'orsque les dernières traces d'ions magnésium sont complexées.

## ❖ Réactions chimiques



## ❖ Matériels

- ✓ ERLNMEYER 250 ml.
- ✓ fiole de 100 ml.
- ✓ burette graduée de 10 ml.

## ❖ Réactifs

- ✓ EDTA (0.04 N).

- ✓ solution tampon ammoniacal pH=10.
- ✓ noir Eriochrome T (NET) indicateur coloré.

#### ❖ Mode opératoire

- prendre 100 ml de l'eau à analyser dans un ERLLENMEYER ;
- ajouter 8 gouttes de la solution Tampon Ammoniacal (qui sert à stabiliser le pH durant le titrage) ;
- ajouter quelques gouttes de N.E.T. (Noir Eriochrome T) et mélanger ;
- si une coloration bleu apparaît, le TH est nul ( $TH = 0^{\circ}F$ ) ;
- si une coloration violette apparaît (présence d'ions de  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$ ) ; titrer le mélange avec une liqueur hydrométrique d'EDTA (sel Tétracalcique de l'acide Ethylène Diamine Tétracétique) à 0,04N jusqu'au virage de la coloration violette vers le bleu vert.

#### ❖ Expression des résultats

Le calcul du TH total :

$$TH \text{ total } (^{\circ}F) = 2 \times V \text{ ml}$$

TH total : Titre hydrotimétrique total.

- \*  $^{\circ}F$  : Degrés français ( $1^{\circ}F = 10 \text{ meq/l de } CaCO_3$ ).
- \* V : Volume, chute de la burette.

### III.6.3.4. Le titre hydrotimétrique calcique (TH $Ca^{++}$ )

#### ❖ Définition

Le titre hydrotimétrique calcique: ou le  $TH_{Ca^{++}}$  est une mesure globale de la concentration en sels dissous calcium dans l'eau.

#### ❖ Principe

Pour le dosage du calcium, on procède de la même manière que pour le titre hydrotimétrique total en changeant uniquement l'indicateur coloré (N.E.T) par du MUREXIDE. Le pH est porté à 12-13 par addition de soude pour faire précipiter les ions  $Mg^{++}$  sous formes d'hydroxydes.

#### ❖ Matériels

- ✓ ERLLENMEYER 250 ml ;
- ✓ fiole de 100 ml ;
- ✓ burette graduée de 10 ml.

#### ❖ Réactifs

- ✓ EDTA (0.04 N) ;



- ✓ solution de soude caustique à 5N ;
- ✓ murexide.

#### ❖ Mode opératoire

- prendre 100 ml de l'eau à analyser dans un ERLLENMEYER ;
- ajouter 25 gouttes de NaOH à 5N (soude), en remuant délicatement ;
- ajouter une pincée de Murexide (indicateur coloré) et mélanger ;
- une coloration rose doit alors se développer ; titrer alors avec la solution d'EDTA (sel tétrasodique de l'acide Ethylène Diamine Tétra Acétique) à 0,04N jusqu'au virage du rose au violet.

#### ❖ Expression des résultats

Le calcul du TH Ca<sup>++</sup> :

$$\text{TH Ca}^{++} (\text{°F}) = V \text{ ml} \times 2$$

- \* TH Ca<sup>++</sup> : Titre hydrométrique calcique.
- \* °F : Degrés français (1°F= 10 mg/l de CaCO<sub>3</sub>).
- \* V : Chute de la burette en ml

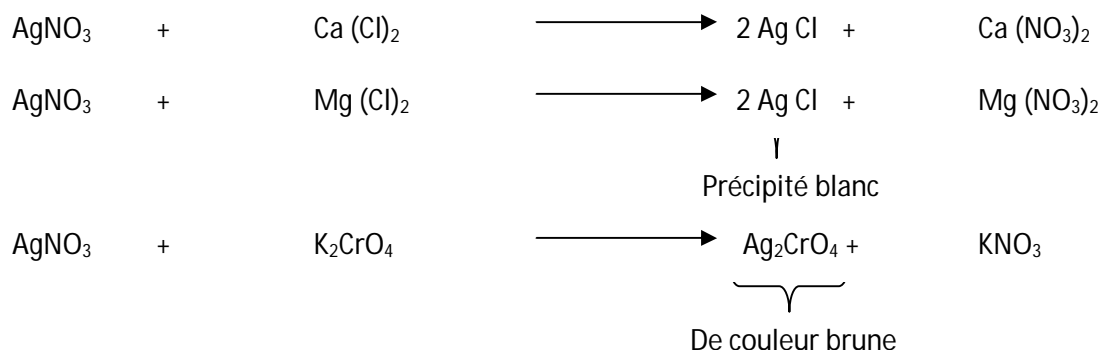
### III.6.3.5. Les chlorures Cl

#### ❖ Principe

C'est la réaction des ions chlorures avec des ions argent (méthode de Mohr) pour former des chlorures d'argent insoluble qui est précipité quantitativement.

L'addition d'un petit excès d'ions d'argent réagit avec le chromate d'argent pour donner un sel de chromate d'argent de couleur brun rouge. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage.

#### ❖ Réactions chimiques des chlorures



#### ❖ Matériels

- ✓ ERLLENMEYER 250 ml.
- ✓ fiole de 100 ml.

✓ burette graduée de 10 ml.

❖ **Réactifs**

✓ nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  (0.04N).

✓ chromate de potassium

❖ **Mode opératoire**

✓ dans un ERLLENMEYER, prendre un échantillon de 100 ml d'eau à analyser,

✓ ajouter 5 gouttes de chromate de potassium (Indicateur coloré). Une coloration rose doit alors apparaître.

✓ titrer avec la solution  $\text{AgNO}_3$  à 0,04N (Le nitrate d'argent précipite les chlorures alcalins et alcalino-terreux sous forme de chlorures d'argent) et agiter délicatement le soluté jusqu'à l'obtention d'une teinte rouge brique signalant la fin de la réaction.

❖ **Expression des résultats**

Le calcul du titre en chlorures :

$$\text{Cl}^- (\text{°F}) = V \text{ ml} \times 2.$$

- V : chute de burette.

### III.6.4. Méthodes spectrophotométriques par UV-visible et par SAA

#### III.6.4.1. Méthodes spectrophotométriques par UV-visible

La spectroscopie d'absorption dans l'UV et le visible est une méthode très commune dans les laboratoires. Elle est basée sur la propriété des molécules d'absorber des radiations lumineuses de longueur d'onde déterminée.

Dans une molécule, les transitions électroniques UV-visibles mettent en jeu les énergies les plus importantes de la chimie (environ de  $13000$  à  $50000 \text{ cm}^{-1}$  soit  $160$  à  $665 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). L'ordre de grandeur des énergies mises en jeu est celui des énergies de liaison des molécules et ces rayonnements peuvent parfois provoquer des ruptures de liaisons. Plus généralement, ils provoquent des transitions électroniques entre les différents niveaux d'énergie des molécules.

Au niveau du laboratoire des analyses des eaux au Cevital, les méthodes UV/VIS sont appliquées pour déterminer la concentration des minéraux ci-dessous :

**III.6.4.1.1. Le fer (Fe)****❖ Principe**

Le fer(II) réagit avec un autre dérivé pour donner un complexe violet. La capsule NANOFIX sert pour la réduction de Fe(III) en Fe(II) et pour l'ajustage du pH.

**❖ Matériels**

- ✓ cuve ronde NANOCOLOR ; pipette 5 ml
- ✓ spectrophotomètre UV/VIS

**❖ Réactifs**

- ✓ réactifs 2 NANOCOLOR

**❖ Mode opératoire**

Dans une cuve ronde, ajouter 4 ml de l'échantillon à analyser et un NANOFIX R2 (fermer le tube de NANOFIX immédiatement après l'addition de R2) et mesurer après 10 mn. Le blanc est préparé avec 4 ml d'eau distillée et un NANOFIX R2.

La lecture se fait à une longueur d'onde de 540 nm.

**III.6.4.1.2. Le manganèse ( $Mn^{2+}$ ) :****❖ Principe**

Les ions manganèse réagissent en milieu alcalin avec la formaldoxime pour donner un complexe orange-rouge.

**❖ Matériels**

- ✓ Cuve ronde NANOCOLOR;
- ✓ Pipette 1 ml et 5ml ;
- ✓ Spectrophotomètre NANOCOLOR UV/VIS

**❖ Réactifs**

- ✓ Réactifs 2,3 NANOCOLOR;

**❖ Mode opératoire**

Dans une cuve ronde, ajouter 4 ml de l'échantillon à analyser et 0.5 ml de R2. Fermer, mélanger et attendre une minute, puis ajouter une cuillère de mesure de R3 et mesurer après 5mn.

Le blanc est préparé avec 4 ml de l'échantillon à analyser, 0.5 ml de R2 et une cuillère de mesure de R3.

La lecture se fait à une longueur d'onde de 540 nm

**III.6.4.1.3. Le chlore libre (Cl<sub>2</sub>):****❖ Principe**

Le chlore libre, réagit avec la DPD (N, N-diéthyl-1,4-phénylènediamine) pour donner une coloration rouge-violette par addition d'une quantité définie d'ions iodures. Les turbidités provoquées par des particules en suspension peuvent être éliminées par centrifugation de l'échantillon. Les oxydants comme le bromure, les bromamines, l'iode et les composés de manganèse de haute valence simulent le chlore libre.

**❖ Matériels**

- ✓ cuve rectangulaire 5cm ;
- ✓ pipette 1 ml, 20ml ;
- ✓ fiole 25 ml ;
- ✓ spectrophotomètre UV/VIS

**❖ Réactifs**

- ✓ réactifs 1 et 2

**❖ Mode opératoire**

Introduire respectivement dans une fiole de 25 ml :

- 20 ml d'échantillon à analyser
- 1 ml de R1, mélangé ;
- une pincée de R2, mélangé ;

Ajuster à 25 ml avec de l'eau distillée et mesurer après 30 secondes après avoir transvasé dans des cuves rectangulaires.

La lecture se fait à une longueur d'onde de 540 nm.

**III.6.4.1.4. La silice SiO<sub>2</sub>:****❖ Principe**

La silice dissoute et les silicates réagissent en milieu acide avec le molybdate d'ammonium pour former de l'acide silicomolybdique jaune. Ce dernier sera réduit en un composé bleu par addition d'un réducteur.

**❖ Matériels**

- ✓ cuve rectangulaire 5cm NANOCOLOR ;
- ✓ pipette 1 ml, 20ml ;
- ✓ fiole de 25 ml ;
- ✓ spectrophotomètre NANOCOLOR UV/VIS

**❖ Réactifs**

- ✓ réactifs 1, 2 et 3 NANOCOLOR UV/VIS

#### ❖ Mode opératoire

Introduire respectivement dans une fiole de 25 ml :

- 20 ml d'échantillon à analyser
- 1 ml de R1, mélanger et attendre 3 mn ;
- 1 ml de R2, mélanger et attendre 1 mn ;
- 1 ml de R3

Ajuster à 25 ml avec de l'eau distillée et mesurer après 15 mn après avoir transvaser dans des cuves rectangulaires.

La lecture se fait à une longueur d'onde de 690 nm.

#### III.6.4.2. Méthodes spectrophotométriques par SAA

L'appareil utilisé pour notre travail est un spectrophotomètre d'absorption atomique à Flamme (air/acétylène), doté d'un micro-ordinateur. Il comporte:

- ✓ un générateur d'atomes constitué par un dispositif de nébulisation, brûleur et une flamme
- ✓ un système de sélection de la longueur d'onde
- ✓ un récepteur.

Le principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique en flamme consiste à vaporiser l'échantillon liquide et à le chauffer à l'aide d'une flamme (généralement une flamme air/acétylène). La flamme est dirigée vers une lumière émise par une lampe appropriée (lampe à cathode creuse) émettant les longueurs d'onde caractéristiques de l'élément recherché. En traversant la flamme, les ondes lumineuses, dont les longueurs d'onde correspondent à l'élément dosé, sont absorbées par les ions excités présents dans la flamme. L'absorption est mesurée à l'aide d'une cellule photoélectrique et qui est directement proportionnelle à la concentration de l'élément à doser.

##### III.6.4.2.1. Le sodium Na<sup>+</sup>

#### ❖ Dosage de sodium

##### a). Préparation de la solution mère de Na<sup>+</sup> à 1000mg/l = 1000ppm

Dissoudre une prise d'essai de 254,2 mg de NaCl à 99% de pureté dans une fiole de 100 ml. Compléter au trait de Jauge avec l'eau bi distillée (1,1 μS/cm).

##### b). Préparation de la solution fille à 10 mg/l = 10 ppm de Na<sup>+</sup>

Prélevez 1ml de la solution mère à 100 ppm de  $\text{Na}^+$  dans une fiole de 100 ml. Compléter jusqu'au trait de jauge avec l'eau bi distillée.

**c). Préparation des étalons de  $\text{Na}^+$** 

Préparer 5 étalons à un volume de 25 ml dans 5 fioles de 25 ml où dans 5 tubes à essais de 25 ml. Dans chaque fiole ou tube on met respectivement des volumes de 5 ml, 6 ml, 7 ml, 8ml, 10 ml de la solution fille de  $\text{Na}^+$ .

**d). préparation des échantillons de Cevital**

Doser les échantillons (perméat) de l'eau ultrapure, ( perméat) de l'eau osmosée directement sans dilution.

Par contre, on va faire la dilution pour les échantillons de (concentrât) de l'eau ultrapure, (concentrât) de l'eau osmose, et l'eau brute. Prélever 1 ml de chaque échantillon (concentrât de l'eau ultrapure, concentrât de l'eau osmose, eau brute) dans des fioles ou des tubes à essais de 25 ml. Compléter au trait de jauge avec le blanc (l'eau bi distillée).

**❖ Matériels**

- fioles ou tubes à essais
- entonnoirs
- verre de montre
- spatule
- pipette de 5 ml
- micro pipette de 25  $\mu\text{l}$
- balance électronique
- spectrophotomètre par SAA

**❖ Réactif**

- eau bi distillée
- NaCl solide à 99% de pureté

**III.6.4.2.2. Le zinc  $\text{Zn}^{2+}$** **❖ Dosage du zinc****a). Préparation de la solution mère de  $\text{Zn}^{2+}$  à 1g/l**

Dissoudre une prise d'essai de 212,6 mg de  $\text{ZnCl}_2$  à 98% de pureté dans une fiole de 100 ml. Compléter au trait de Jauge avec l'eau bidistillée (1,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). On ajoute 1 ml de l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) pour éviter la précipitation de la solution.

**b). Préparation de la solution fille au standard de  $Zn^{2+}$  à 10 ppm**

Prélevez 1ml de la solution mère à 100 ppm de  $Zn^{2+}$  dans une fiole de 100 ml. Compléter jusqu'au trait de jauge avec l'eau bi distillée.

**c). Préparation des étalons de  $Zn^{2+}$** 

Préparer 5 étalons à un volume de 25 ml dans 5 fioles de 25 ml où dans 5 tubes a essais de 25 ml. Dans chaque fiole ou tube on met respectivement des volumes de 0.25ml, 0.5ml, 0.75 ml, 1ml, 1.25 ml de la solution fille de  $Zn^{2+}$ .

**d). préparation des échantillons de Cevital**

Doser l'échantillon (perméat) de l'eau ultrapure, (perméat) de l'eau osmosée directement sans dilution.

Par contre, on va faire la dilution pour l'échantillon de (concentrât) de l'eau ultrapure, (concentrât) de l'eau osmose, et l'eau brute. Prélever 1 ml de chaque échantillon (concentrât de l'eau ultrapure, concentrât de l'eau osmose, eau brute) dans des fioles ou des tubes à essais de 25 ml. Compléter au trait de jauge avec le blanc (l'eau bi distillée).

**❖ Matériels**

- fioles ou tubes a essais
- entonnoirs
- spatule
- verre de montre
- pipette de 5 ml
- micro pipette de 25  $\mu$ l
- balance électronique
- spectrophotomètre par SAA

**❖ Réactif**

- eau bi distillée
- $ZnCl_2$  solide à 98% de pureté

**III.6.4.2.3. Le plomb  $Pb^{2+}$** **❖ Dosage du plomb****a). Préparation de la solution mère à 50 mg/l de  $Pb^{2+}$** 

Dissoudre une prise d'essai de 135,6 mg de  $PbCl_2$  à 99% de pureté dans une fiole de 100 ml. Compléter au trait de Jauge avec l'eau bi distillée (1,1  $\mu$ S/cm).

**b). Préparation de la solution fille à 1 mg/l ou 1ppm de Pb<sup>2+</sup>**

Prélevez 1ml de la solution mère à 100 ppm de Pb<sup>2+</sup> dans une fiole de 100 ml. Compléter jusqu'au trait de jauge avec l'eau bi distillée. On ajoute 1 ml de l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) pour éviter la précipitation de la solution.

**c). Préparation des étalons de Pb<sup>2+</sup>**

Préparer 5 étalons à un volume de 25 ml dans 5 fioles de 25 ml où dans 5 tubes à essais de 25 ml. Dans chaque fiole ou tube on met respectivement des volumes de 0.25ml, 0.5ml, 0.75 ml, 1ml, 1.25 ml de la solution fille de Pb<sup>2+</sup>.

**d). préparation des échantillons de Cevital**

Doser toutes les échantillons (perméat) de l'eau ultrapure, (perméat) de l'eau osmosée, (concentrât) de l'eau ultrapure, (concentrât) de l'eau osmose, et l'eau brute directement sans dilution, car les quantités de plomb présentés dans l'eau sont en faibles quantités.

Donc prélever 10 ml de chacun de ces échantillons dans des fioles ou tubes à essais, et faire l'analyse par SAA.

**❖ Matériels**

- fioles ou tubes à essais
- entonnoirs
- verre de montre
- spatule
- pipette de 5 ml
- micro pipette de 25 µl
- balance électronique
- spectrophotomètre par SAA

**❖ Réactif**

- eau bi distillée
- PbCl<sub>2</sub> solide à 99 % de pureté



***CHAPITRE IV :***  
***Résultats et discussion***

## Chapitre IV

### IV. Résultats et discussion

L'étude expérimentale réalisée sur les différents échantillons prélevés représente la qualité de l'eau à travers les différentes étapes de traitement, ainsi que l'efficacité des eaux ultrapures, ceci sont donnée dans ce chapitre sous forme graphique ou tableau conforme à des normes industrielles.

Pour les valeurs de l'eau filtrée de certains échantillons nous avons pris les valeurs de l'année précédente à cause d'une panne liée aux niveaux des prises des échantillons.

Les analyses sont effectuées sur six échantillons d'eau qui sont :

- Eau d'alimentation
- Eau filtrée
- Eau osmosée (perméat, concentrât)
- Eau ultrapure (perméat, concentrât)

Les paramètres étudiés sont : le pH, la conductivité, TH, TH<sub>Ca<sup>++</sup></sub>, TA, TAC, Cl<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe, Mn<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> et les chlorures.

#### IV.1. potentiel d'hydrogène (pH)

La mesure du pH nous indique la mesure de l'acidité, de l'alcalinité ou de la neutralité d'une solution aqueuse, donc les résultats trouvés pour les différents échantillons se résument dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1** : Valeurs de pH des eaux de process de Cevital et du l'eau d'alimentation.

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
pH mesuré	7,87	7,62	7,94	6,4	6,34	6,67
Normes industrielles	7<pH<8	7<pH<8	7<pH<8	5,5<pH<7,5	5,5<pH<7,5	4<pH<7

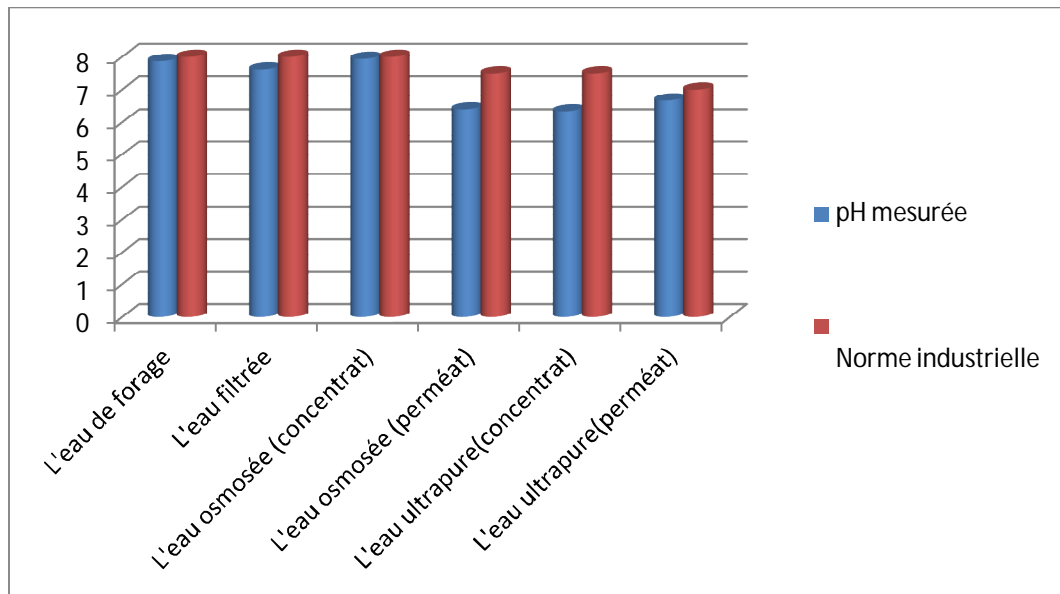


Figure IV.1 : pH des eaux de process de Cevital.

- **Discussion**

Le pH est un paramètre très important donnant une idée sur l'équilibre de l'eau ainsi que sur la qualité de l'eau produite. D'après les résultats trouvés sur les eaux de process, à l'étape du prétraitement, la diminution de pH de l'eau brute de 7,87 jusqu'à 6.4 pour le (perméat de l'eau osmosée) est principalement due à l'injection des produits séquestrant. Cette injection a pour but d'éviter la précipitation des sels à base de sulfate et de carbonate sur les membranes.

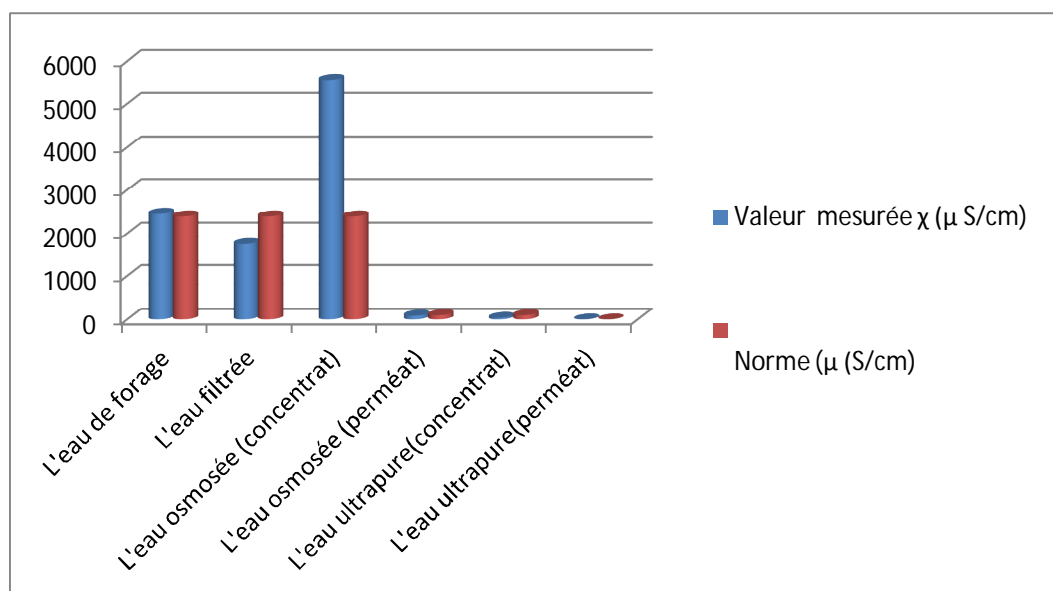
Pour la qualité recherchée de l'eau ultrapure, la valeur du pH répond à la norme, et même proche du milieu de pH neutre.

## IV.2. La conductivité

Pour la conductivité électrique, les résultats des analyses montrent une variation entre 5560  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 0,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces résultats sont conformes aux normes sauf pour la valeur de l'eau de l'alimentation et le concentrat de l'eau osmosé.

**Tableau IV.2 :** Conductivités ioniques des eaux de process de Cevital

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée ( $\mu$ S/cm)	2460	1750	5560	39,9	99,5	0,5
Norme ( $\mu$ S/cm)	<2400	<2400	<2400	<100	<100	$0,055 < \chi < 0,6$



**Figure IV.2 :** Conductivités ioniques des eaux de process de Cevital.

• **Discussion**

Pour la conductivité électrique, les résultats des analyses montrent une variation entre (0.5  $\mu$ S/cm et 5560  $\mu$ S/cm). Les valeurs de l'eau brute et de concentrât de l'eau osmosée ne sont pas conformes aux normes. Donc, nous pouvons dire que l'eau d'alimentation de Cevital n'est pas une eau de très bonne qualité, et elle doit subir à un contrôle plus strict des eaux d'alimentation (le barrage et le puits de forage) et instaurer un système de mélange des volumes des deux eaux d'alimentations, pour qu'elle puisse répondre à la norme de qualité exigée pour l'alimentation des installations de Cevital. La valeur très élevée, enregistrée pour

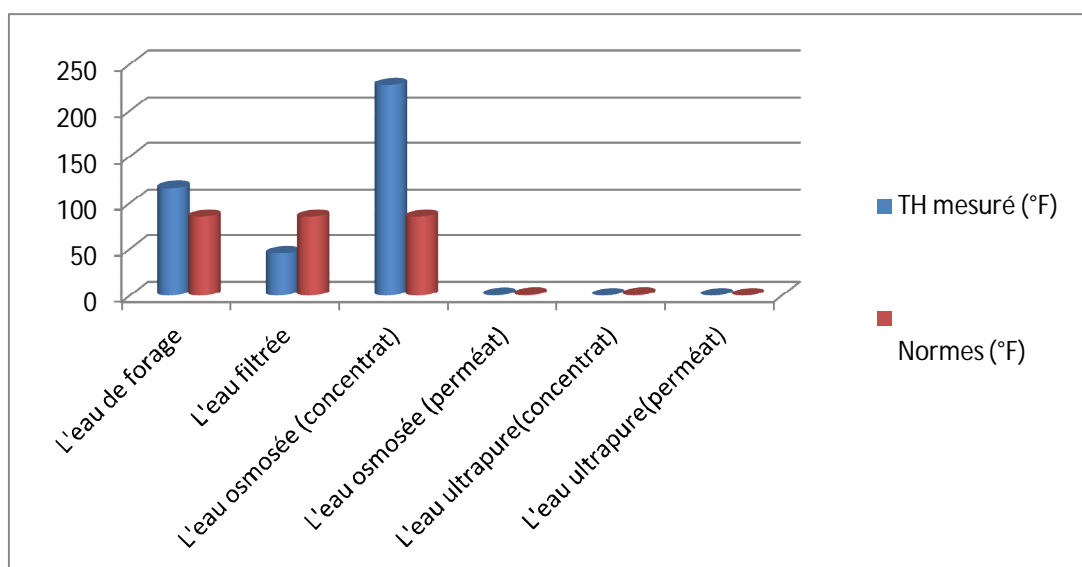
le concentrât de l'eau osmosée (5560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), est due à l'excès des ions chlorures et des ions sodium qui subsistent lors de la filtration par membrane de l'osmoseur inverse. La valeur de la conductivité du perméat de l'eau ultrapure obtenue à la sortie du CEDI répond beaucoup plus à la norme de l'eau ultrapure de type II (0.055-0.6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), mais la valeur est jugée insuffisante pour une eau ultrapure de type I (<0.055  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### IV.3. Le titre hydrotimétrique total TH (dureté totale)

Afin de déterminer la concentration en sel de calcium et du magnésium dissout dans l'eau, le tableau ci-dessous nous indique les résultats des différents échantillons.

**Tableau IV.3 :** Valeurs mesurées de duretés totales TH

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée TH °F	<b>116,40</b>	45	<b>228</b>	0,7	0	<b>0</b>
Norme °F	<85	<85	<85	<1	<1	0



**Figure IV.3 :** Représentation de la dureté totale TH.

• **Discussion**

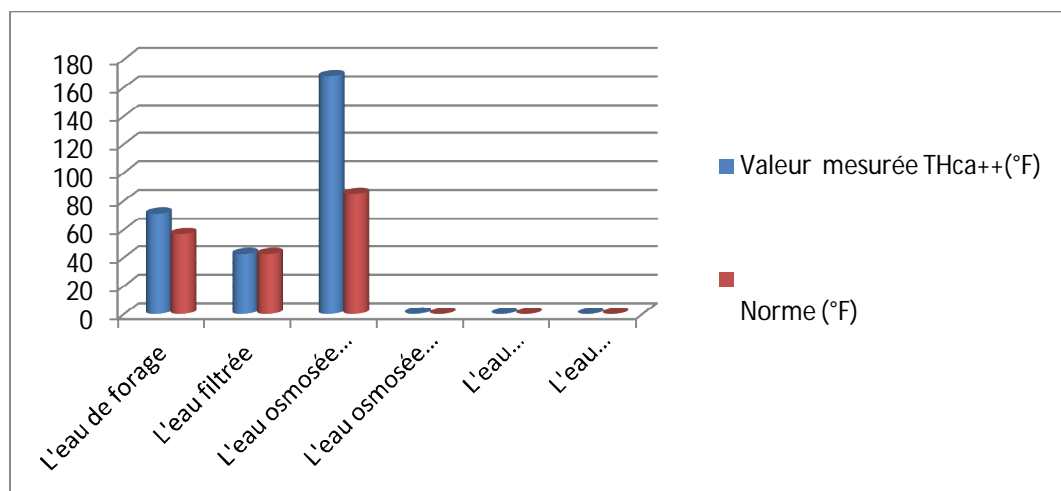
Les valeurs enregistrées montrent la présence des ions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  en excès pour l'eau de l'alimentation et le concentrât de l'eau osmosée avec des valeurs respectivement (116.40 et 228) °F. Par rapport au concentrât, ceci est expliqué par l'accumulation des anions carbonates dans les membranes qui favorisent la précipitation des carbonates de calcium et de magnésium. Ce qui entraîne l'augmentation de la dureté totale. Ce qui signifie que les eaux du perméat osmosée et de l'eau ultrapure (perméat) soient débrassées de la dureté qui s'annule dans l'eau ultrapure. Celle-ci répond à la norme (TH = zéro) exigée pour ce paramètre.

**IV.4. Le titre hydrotimétrique calcique  $TH_{Ca^{++}}$**

Nous avons déterminé la présence des ions  $Ca^{++}$  dans les différents échantillons qui est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées ( $CaCO_3$ ), soit la dissolution de formations gypseuses ( $CaSO_4$ ).

**Tableau IV.4 :** valeurs mesurés de duretés totales  $TH_{Ca^{++}}$

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée $TH_{Ca^{++}}$ °F	71,20	42,5	168	0,5	0	0
Norme (°F)	56,8	42,4	85	0	0	0



**Figure IV.4 :** Représentation de la dureté calcique  $TH_{Ca^{++}}$

- **Discussion**

On note dès le départ un excès des ions  $\text{Ca}^{++}$  supérieur à la norme pour l'eau brute, le traitement de ce dernier par les filtres à sable amène un équilibre totale d'une dureté  $\text{THCa}^{++}$  a sa norme dans l'eau filtrée, puis lors du traitement avec l'OI, les ions  $\text{Ca}^{++}$  sont agglutinés dans le concentrât de l'eau osmosée, pour donner une valeur très supérieure à la norme. Tandis que les valeurs de l'eau ultrapure (perméats) sont nulles. On peut donc conclure que le traitement de l'eau par osmose inverse est très efficace et suffisant pour éliminer toute la dureté calcique qui existe.

#### IV.5. Le titre alcalimétrique TA

Après vérification, les valeurs obtenues pour tous les échantillons testés sont pratiquement nulles, donc l'eau ne contient pas de base forte ( $\text{OH}^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ ), ils contiennent que des bicarbonates.

#### IV.6. Le titre alcalimétrique complet TAC

Nous avons déterminé la somme des teneurs d'une eau, en hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ), en carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), et en bicarbonates ou hydrogénocarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) alcalins et alcalino-terreux.

**Tableau IV.5 :** Valeurs de TAC pour les eaux de process et l'eau d'alimentation

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée TAC (°F)	<b>31</b>	<b>20,5</b>	91,4	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>0,1</b>
Norme (°F)	28,8	24,8	22,6	0,5	0,1	0,1

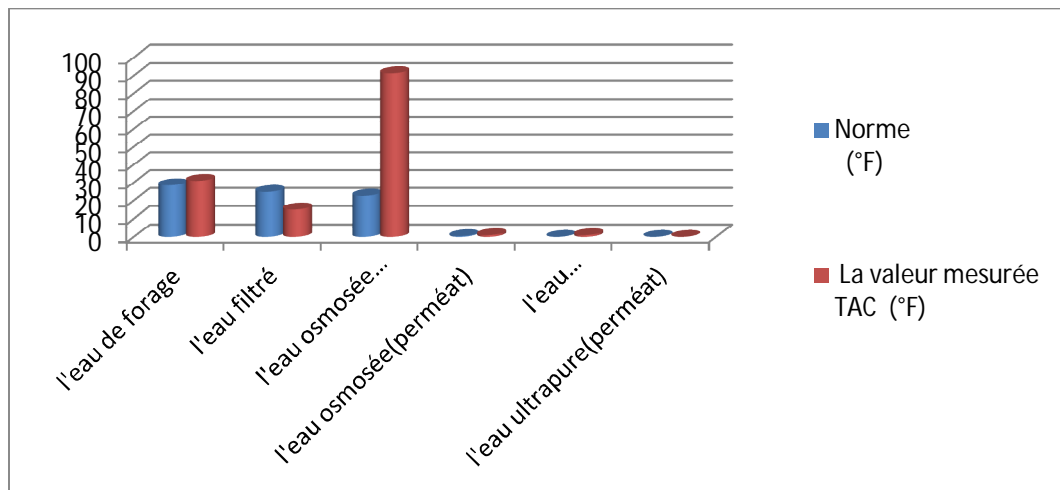


Figure IV.5 : Valeurs mesurés de TAC.

• **Discussion**

D’après les valeurs enregistrées, la teneur de TAC pour l’eau d’alimentation est supérieure à la norme, ce qui nous indique que cette eau est riche en ions  $\text{HCO}_3^-$ . La diminution de la valeur dans l’eau filtrée est due à la précipitation de ces ions. Ces derniers sont retenus au niveau des membranes d’osmose inverse, faisant augmenter la valeur du TAC dans le concentrât jusqu’à 91°F, tandis que le perméat de l’eau ultrapure les valeurs sont dans les normes. Donc en constate que l’élimination des ions hydroxydes et bicarbonates nécessitent un passage par toutes les étapes de traitement, y’compris la filtration.

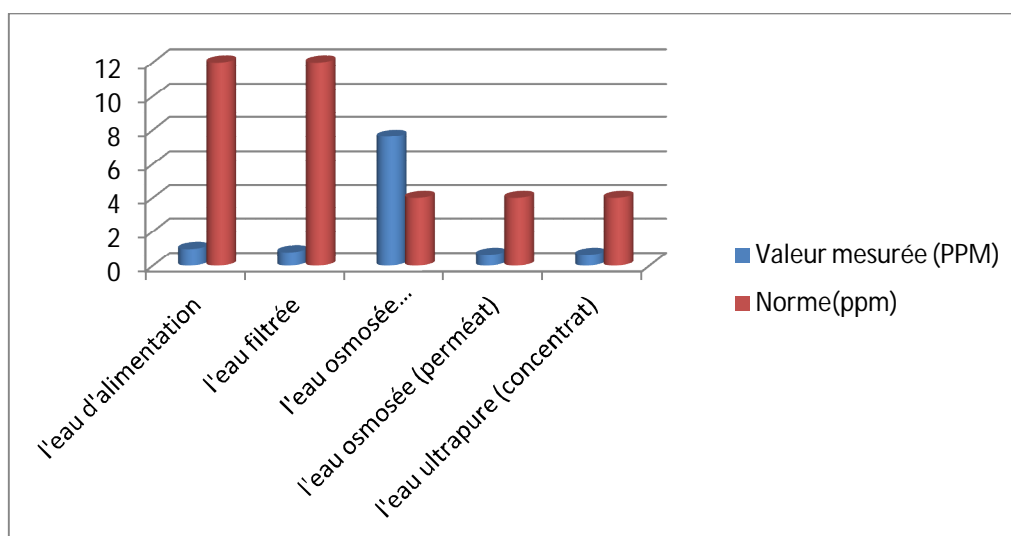
**IV.7. Les Chlorures  $\text{Cl}^-$**

Le tableau suivant indique les valeurs mesurées pour le dosage des ions chlorures dans les différents échantillons.

**Tableau IV.6 : Dosage des ions chlorures pour les cinq échantillons**

Echantillons d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure cencentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée $\text{Cl}^-$ (°F)	<b>59,6</b>	<b>124</b>	<b>3,8</b>	<b>1,7</b>	<b>1</b>
Norme (°F)	28,8	24,8	22,6	0,5	0,1





**Figure IV.6 :** Représentation graphique pour le dosage des ions chlorures.

- **Discussion**

D'après le tableau (IV.6), on remarque une eau d'alimentation chargée par des ions chlorures qui présentent des valeurs au dessus de la norme. Ce qui revient la présence de ces ions à la source principale (Ibouracen, Techyhaff).

Le traitement de ces ions par l'OI marque une présence des chlorures, que sa soit dans le concentrât ou dans le perméat qui proviennent de l'ajout d'hypochlorites de sodium où d'acide chlorhydrique lors du nettoyage des membranes d'OI en provoquant la précipitation des sels de chlorures insolubles qui colmatent les membranes, et qui subsiste même dans les eaux ultrapures, malgré le passage de l'eau osmosée dans le déioniseur.

## IV.8. Méthodes spectroscopiques par UV-VIS et par SAA

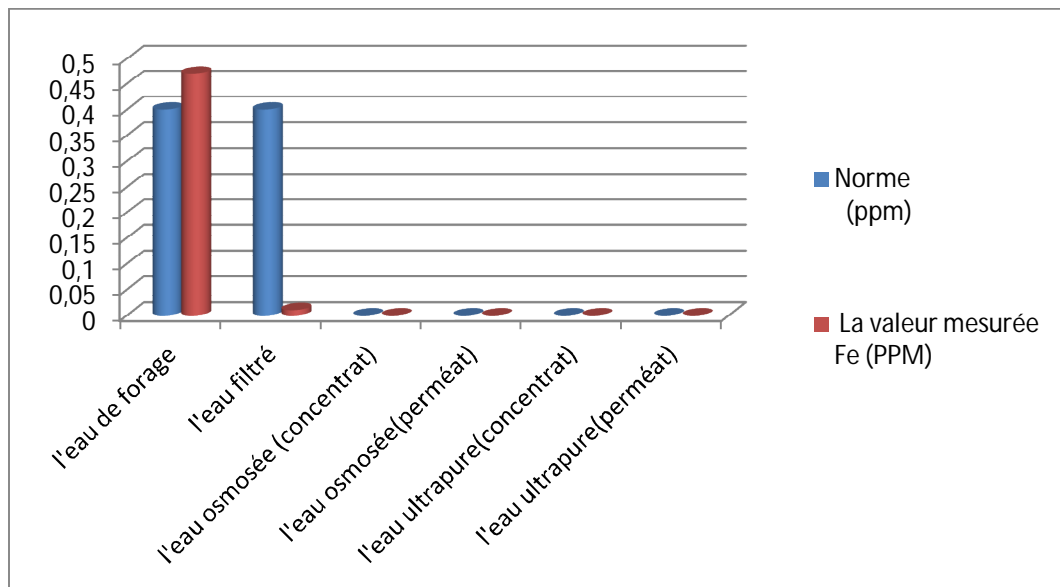
### IV.8.1. Méthodes spectroscopiques par UV-VIS

#### IV.8.1.1. Le Fer (ppm)

Les résultats obtenus sont regroupé dans un tableau suivant sous forme de cations ferriques  $Fe^{3+}$

**Tableau IV.7 :** Les valeurs mesurées de Fer ferriques Fe<sup>3+</sup>.

Echantillon d'eau	L'eau de L'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée Fer ppm	<b>0,47</b>	0,01	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Norme ppm	0,4	0,4	0	0	0	0



**Figure IV.7 :** Concentrations des eaux de process en Fer ferrique Fe<sup>3+</sup>.

• **Discussion**

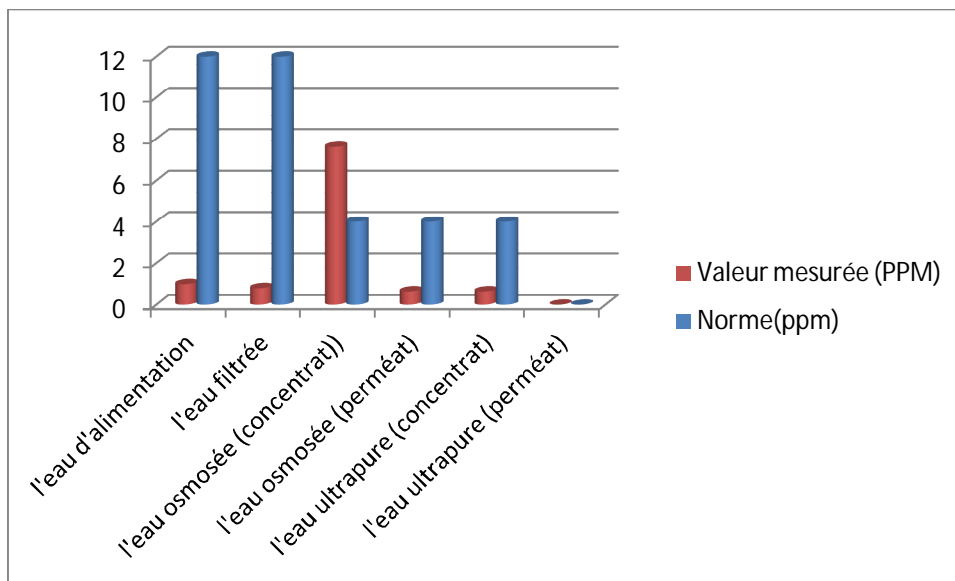
Les résultats obtenus montrent que les concentrations sont inférieures à 0,1ppm, pour les eaux osmosées et déionisées, mais elles sont au dessus de la norme. La valeur maximale égale à 0,47 ppm légèrement supérieure à la norme, est enregistrée pour l'eau de l'alimentation. Donc, elle doit subir un bon traitement de defferisation avant qu'elle ne soit évacuée dans le process. Malgré leur traitement avec un procédé combiné OI-CEDI, des traces de fer sont toujours détectées au niveau des eaux produites.

**IV.8.1.2. La silice SiO<sub>2</sub>**

Les valeurs trouvé est comme suit :

**Tableau IV.8 :** Teneur en silice pour les eaux de process

Echantillon d'eau	L'eau de L'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrat	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée SiO <sub>2</sub> ppm	<b>0,98</b>	0,79	7,6	0,64	0,64	<b>0</b>
Norme ppm	<12	<12	<4	<4	<4	0



**Figure IV.8 :** Variation de la teneur en silice pour les eaux de process.

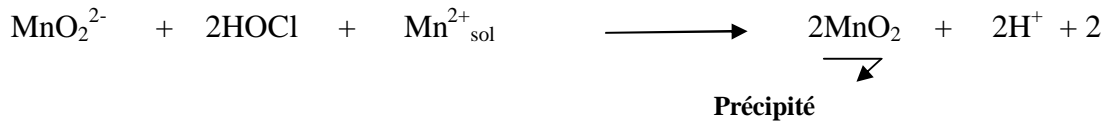
• **Discussion**

On remarque une teneur en silice SiO<sub>2</sub> assez faible pour l'eau de l'alimentation et l'eau filtrée, cela revient à la bonne qualité d'une source d'alimentation d'eau en silice. Cependant, le traitement par osmose inverse observe une grande augmentation au dessus de la norme de (36,6 ppm) pour le concentrât de l'eau osmosée, dû à l'efficacité de l'élimination de la silice par les membranes de l'OI. Ce qui entraine une diminution très nette de ce paramètre dans les eaux osmosée perméat, les eaux ultrapures concentrât et perméat.

**IV.8.1.3. Le Manganèse Mn<sup>2+</sup>**

La présence du manganèse est enregistrée seulement dans l'eau de l'alimentation, avec une valeur de 0,98 ppm inférieure à la norme exigée ( 1,2 ppm). Cette quantité d'ions de manganèse s'élimine complètement dans les filtres à sable, lors de l'injection de

l'hypochlorite de sodium qui favorise la régénération du dioxyde de manganèse qui précipite et est retenu par le filtre, selon la réaction :



**IV.8.1.4. Le chlore libre Cl<sub>2</sub>:**

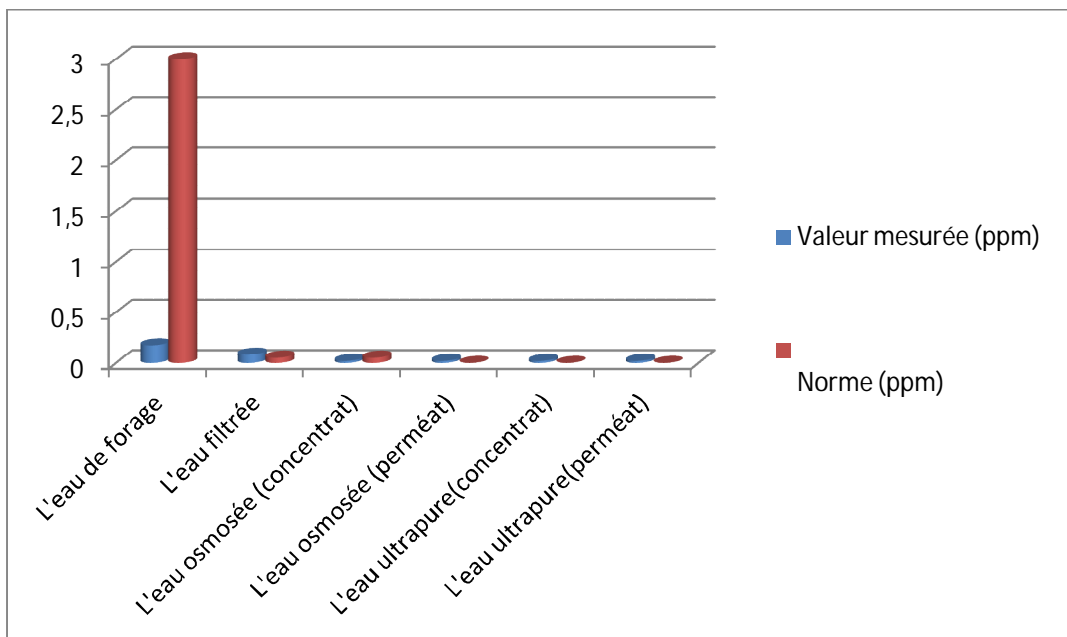
Les valeurs sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.9 :** Mesure de chlore libre pour les eaux de process.

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau filtrée	L'eau osmosée concentrât	L'eau osmosée perméat	L'eau ultrapure concentrât	L'eau ultrapure perméat
Valeur mesurée Cl <sub>2</sub> ppm	<b>0,17</b>	0,08	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Norme ppm	<3	<0,05	<0,05	0	0	0

• **Discussion**

On remarque que le chlore libre est dans les normes pour l'eau d'alimentation avec une valeur de 0,17 ppm, son traitement avec le procédé combiné OI-CEDI produit une qualité d'eau ultrapure proche de sa norme d'ordre (<0,2 ppm).



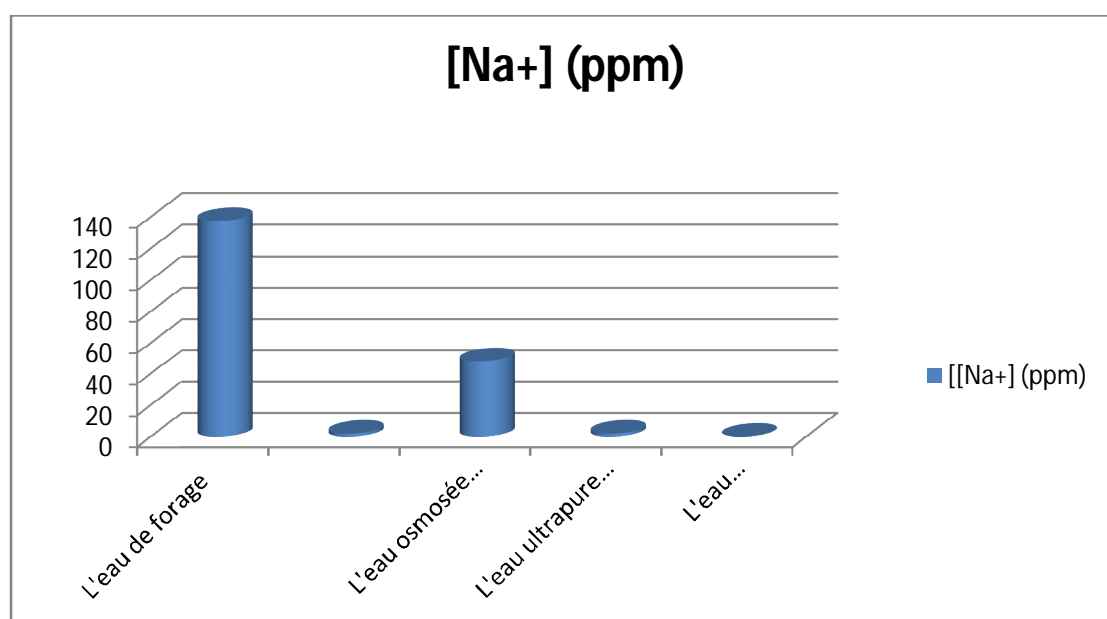
**Figure IV.9 :** Valeurs mesurés pour le chlore libre.

## IV.8.2. Méthodes spectroscopique d'adsorption atomique (SAA)

### IV.8.2.1. Le Sodium Na<sup>+</sup>

**Tableau IV.10 :** Absorbance Na<sup>+</sup> des différentes concentrations pour les eaux de process

Echantillon d'eau	L'eau de l'alimentation	L'eau osmosée (concentrât)	L'eau osmosée (perméat)	L'eau ultrapure (concentrât)	L'eau ultrapure (perméat)	Norme
[Na <sup>+</sup> ] (ppm)	137,47	<b>171,59</b>	1,93	48,01	<b>1,95</b>	Eau ultrapure Type I : <1ppb



**Figure IV.10 :** Représentation de Na<sup>+</sup> des différents échantillons.

- **Interprétation**

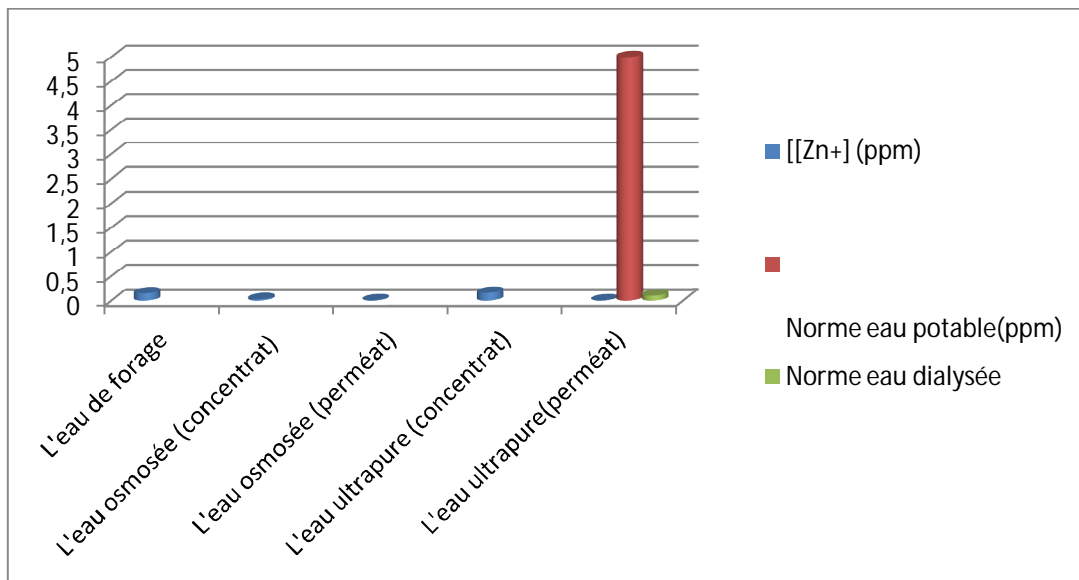
Nous remarquons que par rapport aux concentrations des eaux de l'alimentation (137,47ppm), de l'eau osmosée (concentrât) (171,59ppm) et de l'eau ultrapure (concentrât) (48,01), les valeurs des concentrations du sodium dans l'eau osmosée (perméat) (1.93ppm) et dans l'eau ultrapure (perméat) (1,95 ppm) sont très inférieures, la plus faible de l'ordre 1,93 ppm, enregistrée dans le perméat de l'eau osmosée, est légèrement supérieure à celle de l'eau ultrapure produite à la sortie de l'électrodéionisation (CEDI). Ceci est dû à l'accumulation du chlorure de sodium par recristallisation et précipitation dans les membranes du CEDI. Les

cristaux de NaCl peuvent être drainés et lessivés à la longue par les eaux produites à la sortie du CEDI. Mais, les valeurs des eaux ultrapures sont supérieures à la norme (1ppb) ce qui nous permet de conclure pour le sodium, l'eau ultrapure produite n'est pas de type I elle correspond beaucoup plus à une eau de type II.

**IV.8.2.2. Le Zinc Zn<sup>2+</sup>**

**Tableau IV.11 :** Concentrations de Zn<sup>2+</sup> des différents échantillons des eaux de process

Echantillon d'eau	Eau brute	Eau osmosée (concentrât)	Eau osmosée (perméat)	Eau ultrapure (concentrât)	Eau ultrapure (perméat)
[Zn <sup>2+</sup> ] (ppm)	0,1475	0,03	0,0072	0,1575	<b>0,0058</b>
Norme SI	<b>Eau potable : &lt;5ppm</b>				<b>Eau dialysée : &lt;0,1ppm</b>



**Figure IV.11 :** Représentation de Zn<sup>2+</sup> des différents échantillons.

• **Interprétation**

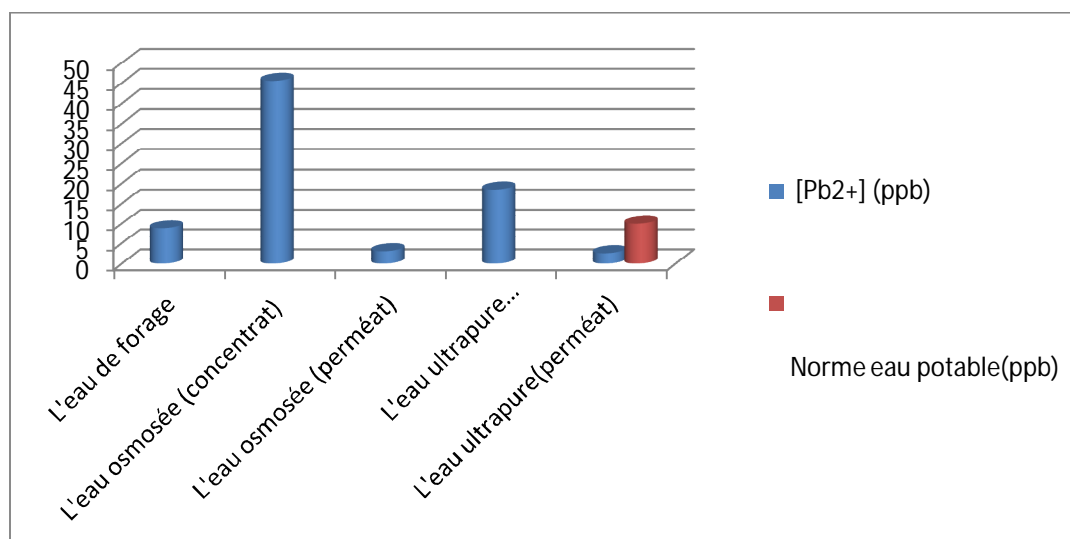
La concentration de l'eau ultrapure perméat (CEDI) estimée à 0,0058ppm, de l'eau osmosée (perméat) et de l'eau osmosée concentrat sont inférieures à la norme recommandée pour l'eau

dialysée qui est de même qualité que l'eau ultrapure (0,1ppm). La plus faible est celle obtenue pour l'eau ultrapure (perméat). Les valeurs des concentrations de l'eau brute et du concentrat de l'eau ultrapure sont dans la limite de la norme spécifiée pour l'eau potable (5ppm).

**IV.8.2.3. Le plomb Pb<sup>2+</sup>**

**Tableau IV.12 :** Concentrations de Pb<sup>2+</sup> des différents échantillons des eaux de process

Echantillon d'eau	Eau brute	eau osmosée (concentrât)	Eau osmosée (perméat)	Eau ultrapure (concentrât)	Eau ultrapure (perméat)	Norme IS
Concentration (ppb)	8,863	<b>45,573</b>	3,067	<b>18,524</b>	<b>2,584</b>	Eau potable : <10ppb



**Figure IV.12 :** Représentation de Pb<sup>2+</sup> des différents échantillons

• **Interprétation**

Pour les deux concentrât, les valeurs enregistrées des concentrations de Pb sont supérieures à la norme de l'eau potable (10 ppb). Tandis que les valeurs des concentrations pour les eaux, brute, osmosée (perméat) et de l'eau ultrapure (perméat) sont au-dessous de la norme. La plus faible est celle de l'eau ultrapure (perméat) produite dans le CEDI. Nous pouvons conclure que le procédé est conforme à la norme. De plus, la concentration du plomb n'est soumise à

aucune limitation relative aux réglementations internationales et américaine (ASTM) de production des eaux ultrapures.



***CONCLUSION***  
***GÉNÉRALE***

## ***Conclusion générale***

Les procédés d'obtention d'eau ultrapure mettent souvent en jeu, dans une étape de finition, une opération unitaire d'échange d'ions. Les performances de cette phase sont souvent limitées par des contraintes de la qualité de l'eau de l'alimentation et du phénomène de colmatage, qui peut être rencontré lors d'une étape d'osmose inverse. Ainsi, c'est sur l'étude de ces limitations que nous avons choisi de focaliser notre travail.

Pour cela les résultats expérimentaux sont exploités sous forme graphique ou tableau auquel se réfère toute interprétation.

Les conditions opératoires à mettre en œuvre pour permettre à ce procédé de fournir les résultats les plus fiables ont été recherchées. Divers ions anioniques et cationiques ont été étudiés. Une extension du contrôle de suivi du colmatage dans le procédé, combiné osmose inverse-électrodéionisation (CEDI) à montré qu'elle permettait aussi d'obtenir une eau ultrapure de très bonne qualité.

Les différents résultats des paramètres étudiés sont : le pH, la conductivité, TH, TH<sub>Ca<sup>++</sup></sub>, TA, TAC, Cl<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, les chlorures, Fe, Na, Zn, Pb, ont abouti aux remarques et conclusions suivantes :

- Pour la qualité recherchée de l'eau ultrapure, la valeur du pH répond à la norme, et même proche du milieu de pH neutre.
- Pour la conductivité électrique, les résultats des analyses montrent une variation entre (0.5 µS/cm et 5560 µS/cm). Les valeurs de l'eau brute et du concentrât de l'eau osmosée ne sont pas conformes aux normes. L'eau d'alimentation de Cevital n'est pas une eau de très bonne qualité, elle doit subir à un contrôle plus strict des eaux d'alimentation (le barrage et le puits de forage) pour qu'elle puisse répondre à la norme de qualité exigée pour l'alimentation des installations de Cevital.

La conductivité du perméat de l'eau ultrapure obtenue répond beaucoup plus à la norme de l'eau ultrapure osmosée ( 0.055-0.6 µS/cm) de type II. La valeur est jugée insuffisante pour une eau ultrapure de type I (<.0.055 µS/cm).

- Les valeurs enregistrées montrent la présence des ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> en excès pour l'eau de l'alimentation et le concentrât de l'eau osmosée avec des valeurs respectivement

(116.40 et 228) °F. Les eaux du perméat osmosée et de l'eau ultrapure (perméat) affichent une valeur nulle pour la dureté totale. Celle-ci répond à la norme exigée pour ce paramètre.

- les valeurs obtenues pour le TA sont dans les normes pour les eaux du process, donc l'eau ne contient pas de base forte ( $\text{OH}^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ ). Mais, pour le TAC, les valeurs sont supérieures à la norme pour l'eau d'alimentation et le concentrât de l'eau osmosée (91°F), ce qui nous indique que ces eaux sont riches en ions  $\text{HCO}_3^-$ . Et les eaux ultrapures sont très faibles et proches de la norme. La valeur du TAC pour l'eau ultrapure perméat est de 0,1°F égale à la norme.
- L'eau d'alimentation ainsi que les eaux de process sont très chargées par les ions chlorures, qui présentent des valeurs au dessus de la norme. Ce qui revient la présence de ces ions à la source principale (Ibouracen, Tchyhaff).
- Le fer a été décelé à l'état de traces, la valeur maximale égale à 0,47 ppm légèrement supérieure à la norme, est enregistrée pour l'eau de l'alimentation. Les teneurs dans les eaux ultrapures sont légèrement au dessus de la norme, mais celles-ci sont proches.
- On remarque une teneur en silice  $\text{SiO}_2$  assez faible pour l'eau de l'alimentation et l'eau filtrée, cela revient à la bonne qualité d'une source d'alimentation d'eau en silice. Sauf pour l'eau osmosée concentrât qui affiche une valeur de 36,6 ppm très supérieure à la norme. Mais, comme ces eaux ne sont pas recyclées et sont considérées comme des rejets, donc ceci ne constitue pas un problème du point de vue conformité.
- Les teneurs du manganèse sont très faibles et inférieures à la norme.
- Le chlore libre est dans les normes pour l'eau d'alimentation avec une valeur de 0,17 ppm, son traitement avec le procédé combiné OI-CEDI produit une qualité d'eau ultrapure proche de sa norme d'ordre ( $<0,2$  ppm).
- Les concentrations du sodium sont très élevées dans les eaux de l'alimentation (137,47ppm), de l'eau osmosée (concentrât) (171,59ppm). Mais, celles-ci sont conformes aux normes des eaux potables. Les valeurs des concentrations sont très faibles dans les eaux ultrapures. Cependant, celle de l'eau ultrapure déionisée perméat celle-ci est au dessus de la norme requise pour l'eau ultrapure de type I.
- Les valeurs des concentrations de zinc pour l'eau brute et du concentrât de l'eau ultrapure sont dans la limite de la norme spécifiée pour l'eau potable (5ppm). La concentration de l'eau ultrapure perméat, de l'eau osmosée perméat et de l'eau

osmosée concentrât sont inférieures à la norme recommandée pour l'eau dialysée qui est de même qualité que l'eau ultrapure (0,1ppm).

- Les concentrations du plomb pour les eaux, brute, osmosée (perméat) et de l'eau ultrapure (perméat) sont au-dessous de la norme. Sauf, pour les deux concentrâts, les valeurs enregistrées des concentrations de Pb sont supérieures à la norme de l'eau potable (10ppb).

Nous pouvons conclure, que malgré l'insuffisance de la qualité de l'eau de l'alimentation, l'eau produite par le procédé combiné OI-CEDI peut se référer à une eau ultrapure de Type II.

## ***PERSPECTIVES***

Si nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la meilleure production des eaux ultrapures, notre travail, celle-ci pourrait être étendu à suivre les paramètres les plus rencontrés dans le traitement des eaux.

Ce travail a aussi mis en évidence un cas de compétition entre les paramètres physico-chimique, il serait intéressant de réaliser ces analyses pour toutes les étapes du procédé.

Mettre au point une méthode de nettoyage des membranes de l'osmoseur inverse, avec un délai de périodicité plus rapproché (chaque 3 jours au lieu de une semaine). Optimiser et prolonger la durée du traitement et du lavage jusqu'à quelques heures.

Notre effort est uniquement basé de suivre certains paramètres, donc une des perspectives envisageables, est de faire des analyses pour d'autres paramètres et contrôler les eaux d'alimentation, du barrage de Tychihaf et du puits de forage de Ibouacène, en instaurant un plan d'expérience qui permettra de mieux calculer les volumes et les proportions en eaux d'alimentation, en fonction des paramètres.

Comme la qualité de l'eau qui nous provient du puits de forage de Ibouacène dépasse les normes, pour certains paramètres mesurés, donc nous proposons une meilleure préfiltration avant d'être envoyée à l'alimentation en amont de la station.

## *Références bibliographiques*

- [1] **Isabelle MONZIE. (2003).** Echange d'ions pour la production d'eau très pure ; Etude des limitations cinétiques par la méthode des micro-colonnes  
Extension à l'électrodéionisation. These doctorat. ENSIC INP de LORRIANE. France.
- [2] **THIELBORGER P. (2014).** The right(s) to water. Ed. Springer-Verlag. Berlin. 231p.
- [3] **Clément 1979** « Larousse agricole » édition Larousse p48.
- [4] **Kharfallh N. et Mohdeb L.** Mémoire D.E.U.A. Contrôle de fluor, sodium, potassium et les métaux lourds dans les eaux. Bejaia. 2007.
- [5] **Hachemaoui B. (2014).** Qualité physico-chimique de l'eau dessalée et traitée par la station de dessalement de l'eau de mer de souk tlata. Mémoire master. Université de Tlemcen
- [6] **Abderrazak Atallah. (2014).** procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau de mer de honaine. Mémoire master en biologie. Université de Tlemcen
- [7] **Tharreau V.** Techniques du traitement de l'eau dans les bâtiments. 3<sup>e</sup> édition, Paris. 2009.
- [8] **ALPHA S. M, (2005).** Qualité organoleptique de l'eau de consommation produit et distribuer par l'EDMSA dans la ville de Bamako. Doctorat en pharmacie, université de Bamako.
- [9] **SAVARY P. (2010).** Guide des analyses de la qualité de l'eau. Ed. *Territorial Voiron*. 261 p.
- [10] **Cojan et Renard M. (2003).** Sédimentologie. Edition Dunod, France. 136pages.
- [11] **RODIER J. (2009).** L'analyse de l'eau .9eme édition Dunod, Paris, 2009. ISBN 978-2-10- 054179-9. 1526p.
- [12] **KEMMER F. N. (1984).** Manuel de l'eau. Technique & Documentation Lavoisier. ISBN 2-85206-220-8.
- [13] **BELGHITI M.L., CHAHLAOUI A., BENGOUMI D., EL MOUSTAINE R. (2013).** Etude de La qualité physico -chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe

plio-quaternaire dans la région de Mknès .Maroc. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°14, Juin 2013, pp. 21-36 © 2013.

[14] **Tardart M, (1994)**. La chimie de l'eau. Edition Griffon d'argile, Québec. 130 pages.

[15] **OMS (W.H.O.): WORLD HEALTH ORGANISATION**. (2003). Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva. World Health Organisation.

[16] Dégrement « Mémento technique de l'eau », Lavoisier-Lexique technique de l'eau. Tome1, Paris, 2005.

[17] **Sadler (1993)**. Sadler M.A. Developments in the production and control of ultrapure water. **In:** Ion exchanges processes: advances and applications [proceedings of the Internationale Conference on Ion-Exchange (Ion-Ex' 93) 1993.

[18] **LAKEHAL AICHA. (2011)**. Influence de la nature des ions et des résines échangeuses sur les performances de l'électrodéionisation/ Application aux métaux lourds pour la dépollution et aux eaux naturelles pour la déminéralisation. Thèse doctorat. Université El Hadj Lakhdar- Batna.

[19] **Collentro (1993)**. Collentro W.V. An overview of USP purified water -Part III. Ultrapure Water, 1993, Vol. 10, 3, pp. 27-34.

[20] **Mustapha CHIKHI (2008)**. Etude de la complexation des cations métalliques en vue de leur séparation par un procédé membranaire. Thèse doctorat. Constantine. Université Mentouri Constantine.

[21] **Benjamin Espinasse (2003)**. Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage. Thèse doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse III. France 21pages.

[22] **J-P. BRUN**. «Procédés de séparation par membranes ; transport, techniques membranaires, applications» Masson, Paris, 1989.

[23] : **El khebbaze H (2008)**. Traitement des solutions modèle du lait par des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse. Thèse de doctorat. Rabat : Université Mohamed V-AGDAL.151page.

[24] **Dans l'ultrafiltration. A Maurel** «Osmose inverse et ultrafiltration; Technologie et applications» Techniques de l'ingénieur, J 2796 - J 2798, 1989.

[25] **S. LOEB, S. SOURIRAJAN** «Sea water demineralization by means of osmotic membrane» Advances in Chemistry Series, 38, pages 32 - 117, 1962; Amer. Chem. Soc.

[26] **M. METAICHE (2014)**. Technologie Membranaire. Bouira. Université de Bouira.12 Pages

[27] **J-P. BRUN (1989)**. «Procédés de séparation par membranes ; transport, techniques membranaires, applications» Masson, Paris.

[28] Chaufer et al. 1996, Yaroschuck et al. 1992, 1993, Alami–Younssi et al. 1995.

[29] **Cakaew T (2009)**. Procédés Hybrides à membranes pour le traitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Thèse doctorat. Toulouse. Université de Toulouse. Page 41.

[30] **Jaffrin M.Y., Chellam S., Bonacquisti T.P.**, Treatment of surface water by double membrane systems : assessment of fouling, permeate water quality and cost , In: Water supply, Vol. 18, No.1, IWA publishing, 2000 p. 438-441.

[31] **Schippers J.C., Verdouw J.**, The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water, In: Desalination no.32/1980,p.137-148.

[32] **Belfort G., Davis R.H., Zydney A.L.**, The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration, **In: Journal of Membrane Science**, no. 96/1994, p. 1-58.

[33] **Bessiere. Y** , Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtre critique pour l'anticipation et le contrôle de colmatage.

Thèse de doctorat 2005, L'université Paul Sabatier, Toulouse III

[34] **Thorsen T.**, Fundamental studies on membrane filtration of coloured surface water, Thèse de doctorat, Norway University of science and technology/ 1999, p 352.



- [35] **Hong S., Elimelech M.**, Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes, **In: Journal of Membrane Science**, no. 132/1997, p. 159-181.
- [36] **Valérie JACQUET VIOLLEAU (1999)**. Déminéralisation par électrodialyse en présence d'un complexant application au Lactosérum. Thèse doctorat. Toulouse. Université de Toulouse.
- [37] **MECIBAH. W (2013)**. Thèse doctorat. Elimination des métaux lourds de l'acide phosphorique par un procédé membranaire. Université Annaba.
- [38] **Sadrzadeh M., Mohamadi T., (2009) Treatment** of sea water using electrodialysis : Current efficiency evaluation. *Desalination*, Vol. 294, PP. 279-285.
- [39] **WeiL., (2010)** Etude de l'échange d'ions modulé électriquement : Application du couplage échange d'ions-électrodialyse à la séparation de biomolécules. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de lorraine.
- [40] **Anjushris K., Thang H., Jamiea H., (2009)** Simulation and Optimal Design of Electrodeionization Process: Separation of Multicomponent Electrolyte Solution. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 48, pp. 9268–9277.
- [41] **H.Strathmann (2004)**. Ion Exchange Membrane Separation Process, Membrane Science and Technology series 9, Elsevier.
- [42] **MEHELLOU Ahmed (2014)**. Elimination des métaux lourds par électrodialyse associée à l'échange d'ions. Thèse doctorat. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA. P 90.
- [43] **SELMA GANA. (2008)**. Etude technico-économique de la cogénération. Mémoire magister. Université de Batna.
- [44] **Article technique de l'ingénieur. Thierry PRIEM. (2014)**. Pile a combustible et cogénération. CEA-LITEN, Grenoble, France.
- [45] **Damien Descieux. (2007)**. Modélisation et comparaison thermo-énergétique de systèmes de Cogénération. Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I. France. P69.
- [46] **EDF, «Les TAC, une production de pointe,» 2012.**

[47] Description d'un système de cogénération [www. Retscreen.net / download.php / fr / 289 / 2 / cours\\_ cogen.pdf](http://www.Retscreen.net/download.php/fr/289/2/cours_cogen.pdf)

# *Lexiques*

- **Biofilm**

Un biofilm est une communauté multicellulaire plus ou moins complexe, souvent symbiotique, de micro-organismes (bactéries, champignons, algues ou protozoaires), adhérant entre eux et à une surface, et marquée par la sécrétion d'une matrice adhésive et protectrice. Il se forme généralement dans l'eau ou en milieu aqueux.

- **Bâche d'alimentation**

Capacité destinée au stockage de l'eau d'alimentation d'une chaudière à vapeur.

- **Clarification**

La clarification de l'eau ou d'un jus de fruit consiste à le rendre plus clair par filtration, centrifugation ou collage. Ces procédés permettent la séparation de la phase liquide et des éléments solides qui en général troublent la boisson. La filtration est une technique très utilisée que ce soit dans le domaine de l'agro-alimentaire ou de la pharmacie...etc.

- **Concentrât**

Désigne un fluide enrichi et concentré en substances retenus par la membrane.

- **Colmatage**

Le colmatage peut être défini comme la conséquence des phénomènes résultant du passage de la matière à travers la membrane.

- **CIP (cleaning in place “ Nettoyage en place (NEP)”):**

Éléments de conception de l'installation qui permettent de disposer sur l'installation des moyens permettant de réaliser le nettoyage.

- **Comburant**

Un comburant est une substance chimique qui a pour propriété de permettre la combustion d'un combustible. Un mélange approprié de comburant et de combustible peut entraîner une combustion, un incendie en présence d'une source d'ignition (étincelle, point chaud, flamme, etc.), le comburant étant l'un des trois éléments du triangle du feu.

- **Décarbonatation à la chaux**

La décarbonatation à la chaux est le procédé de précipitation le plus largement utilisé. Son but est d'éliminer la dureté bicarbonatée (ou temporaire) liée au calcium et au magnésium, c'est-à-dire la présence dans l'eau d'hydrogénocarbonates et carbonates de  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$ , en ajoutant de la chaux hydratée à l'eau qui précipite  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ou les deux à la fois.

- **Détergeant**

Un détergent (ou agent de surface, détersif, surfactant) est un composé chimique, généralement issu du pétrole, doté de propriétés tensioactives, ce qui le rend capable d'enlever les salissures.

- **Membranes denses**

On appelle membranes denses des membranes qui n'ont plus aucune porosité libre. Elles sont gonflées par le solvant mais celui-ci, fortement lié chimiquement au matériau membranaire, a perdu toutes ses propriétés de solvatation ; le solvant traverse alors la membrane sans entraîner de soluté.

- **Module**

Ensemble élémentaire d'une installation de séparation par membranes comprenant un ou plusieurs éléments filtrants (membranes) et les éléments nécessaires à leur insertion dans un procédé (carter, cadre, tuyauterie...).

Il existe plusieurs types de modules (plan, tubulaire, fibre creuse, spirale), qui correspondent aux différentes géométries de membranes (planes, tubulaires, fibres creuses).

- **Perméat**

Phase traversant la membrane lors de la filtration, appelé aussi filtrat

- **Pression transmembranaire**

Pression différentielle entre le côté retentât et le côté perméat. La PTM moyenne est la moyenne des pressions d'entrée et de sortie du fluide à traiter côté retentât, moins la pression de sortie du perméat.

Membrane sans entraîner de soluté. Celle-ci se comporte comme un mélange hydro-organique ayant des propriétés de solvatation particulières.

- **Pression osmotique**

La pression osmotique, dans un phénomène d'osmose, est une force déterminée par une différence de concentration entre deux solutions situées de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Les forces osmotiques favorisent la diffusion des substances à travers la membrane, en milieu interne, le solvant passant de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée. La pression osmotique définit le minimum de pression qui doit être appliquée à une solution pour empêcher l'écoulement vers l'intérieur de l'eau à travers une membrane semi-perméable. Elle est également définie comme la mesure de la tendance d'une solution à prendre de l'eau par osmose. Les valeurs sont régies par le coefficient osmotique.

- **Permsélectivité**

Terme qualifiant des membranes qui retiennent ou laissent passer les anions où les cations de manière sélective.

- **Primage dans les chaudières**

Le primage de l'eau de chaudière est la contamination de la vapeur par des solides présents dans l'eau. Les bulles ou la mousse sont créés à la surface de l'eau des chaudières et sortent avec la vapeur. Ceci est appelé le moussage et est causé par de forte concentration en solides dans l'eau des chaudières.

- **Polarité**

La polarité est la caractéristique d'une molécule dont les charges négatives et positives sont concentrées les unes à l'opposé des autres, aux deux extrémités de la molécule.

L'électronégativité est à l'origine de la polarité de certaines molécules. Une molécule polaire est caractérisée par son moment dipolaire : plus celui-ci est élevé, plus la molécule est polaire (il est nul pour les molécules apolaires).

La polarité (ou non) d'une molécule influe sur ses caractéristiques, par exemple les molécules polaires sont facilement solubles dans d'autres composés polaires et pratiquement insolubles dans des composés apolaires. L'une des molécules les plus connues, l'eau, H<sub>2</sub>O, est fortement polaire.

- **Retentât**

Phase retenue par la membrane lors de la filtration.

- **Substances humiques**

Les substances humiques sont le résultat de la décomposition des matières organiques ; proviennent de l'accumulation et de la réaction chimique naturelle des sous-produits résultant de la décomposition des matières organiques. L'on retrouve fréquemment ces substances dans les sols, les eaux de surface, les eaux usées, le compost, les sédiments marins et ceux des lacs, les tourbières, les schistes carbonneux et les lignites. Il existe trois types de substances humiques dont l'acidité et la composition chimique diffèrent légèrement; il s'agit des acides humiques, des acides fulviques et des humines.

---

**Annexes****Annexe N° 01****Définitions :**

- **Produits biocide**

Le mot biocide (étymologiquement : bio + cide « qui tue la vie ») désigne une large famille de substances chimiques qui regroupe les pesticides, les antiparasitaires et les antibiotiques à usages médicaux, vétérinaires, domestiques ou industriels, les désinfectants de l'eau, de l'air, de sols, surfaces de travail, ... etc.

- **Produits séquestrants :**

Les séquestrants, sont, au sens chimique, des ligands qui forment des complexes chimiques avec les ions métalliques, tels que le cuivre, le fer et le nickel, qui servent comme catalyseurs dans l'oxydation des matières grasses. Les séquestrants limitent donc la disponibilité de ces cations.

Les séquestrants sont donc en quelque sorte des agents conservateurs et des antioxydants. Les séquestrants communs sont :

- ✓ Acide éthylène-diamine-tétra acétique ( $C_{10}H_{16}N_2O_8$ ).
- ✓ Acétate de sodium ( $CH_3COONa$ ).

- **séquestrant (TD-ASCAL) :**

C'est le nom commercial du séquestrant utilisé avant les filtres à cartouche au niveau de Cevital.

- **floculant (TD-FLOC) :**

Un floculant est un polymère (c'est-à-dire une longue molécule constituée par la répétition d'un motif de base) qui emprisonne les matières colloïdales agglomérées et forme ainsi des flocons volumineux qui se déposent par sédimentation et peuvent être plus facilement arrêtés par les filtres.

Le floculant (TD FLOC) est le nom commercial du floculant utilisé au niveau des filtres à sable.

- **.l'hypochlorite de sodium (NaOCl) :**

L'hypochlorite de sodium est un composé chimique de formule brute NaOCl. C'est un solide blanc très instable couramment utilisé en solution aqueuse comme agent désinfectant et agent de blanchiment, notamment sous forme d'eau de Javel pour un usage domestique.

- **Métabisulfite de sodium (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) :**

Le métabisulfite de sodium ou pyrosulfite de sodium est un désinfectant, antioxydant et conservateur alimentaire jaunâtre. Il est couramment utilisé dans le brassage et la vinification pour désinfecter les équipements. Il est utilisé comme agent de nettoyage pour les membranes d'osmose inverse utilisées dans le traitement de l'eau potable et pour les systèmes de dessalement. Il est également utilisé pour éliminer le chloramine de l'eau potable après le traitement.

- **TD WACH 1**

C'est le nom commercial de la solution acide utilisée pour le lavage des membranes au niveau de Cevital.

- **TD WACH 2**

C'est le nom commercial de la solution basique utilisée pour le lavage des membranes au niveau de Cevital.

- **Pyrolusite**

Dioxyde naturel de manganèse, dont la molécule contient un atome de manganèse et 2 atomes d'oxygène (MnO<sub>2</sub>).

C'est un solide cristallin noir.

- **Degré français:**

Il est encore en usage en France pour exprimer les concentrations des principaux ions d'une eau et correspond à la concentration d'une solution N/5000.

$$1 \text{ meq.L}^{-1} = 5 \text{ }^{\circ}\text{F}$$



**Tableau (annexe 1) :** Equivalence en  $\text{mg.l}^{-1}$  du milliéquivalent. $\text{l}^{-1}$  et du degré français pour différents ions et composé présentes dans l'eau.

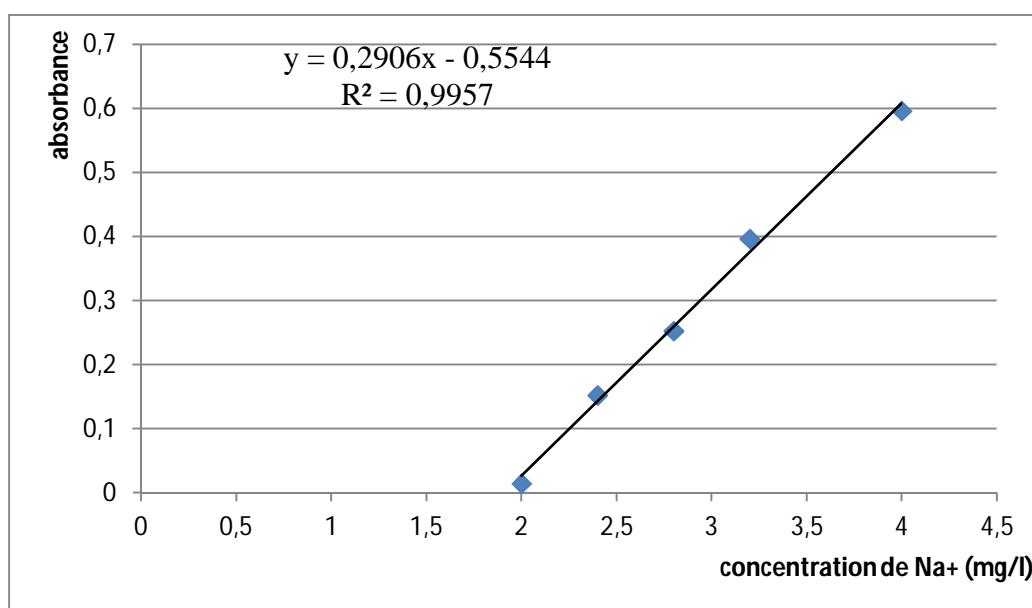
élément	Formule	Masse molaire	Valeur ( $\text{mg.l}^{-1}$ )	
			Pour 1 meq. $\text{l}^{-1}$	Pour 1 <sup>0</sup> F
Carbonate de calcium	$\text{CaCO}_3$	100	50	10
Carbonate de magnésium	$\text{MgCO}_3$	84	42	8,4
Calcium	$\text{Ca}^{2+}$	40	20	4
Magnésium	$\text{Mg}^{2+}$	24,3	12,5	2,43
Carbonate	$\text{CO}_3^{2-}$	60	30	6
Bicarbonate (hydrogénocarbonate)	$\text{HCO}_3^-$	61	61	12,2
Chlorure	$\text{Cl}^-$	35,5	35,5	7,1
hydroxyde	$\text{OH}^-$	17	17	3,4

## Annexe N° 02

- Dosage de sodium

**Tableau (annexe 2) :** Valeur d'absorbance  $\text{Na}^+$  des différentes concentrations pour chaque étalon

N <sup>bre</sup> d'étalons	1	2	3	4	5
$[\text{Na}^{2+}]$ (mg /L)	2	2,4	2,8	3,2	4
Absorbance à $\lambda_{\text{max}} = 589\text{nm}$	0,0147	0,1524	0,2527	0,3964	0,5960

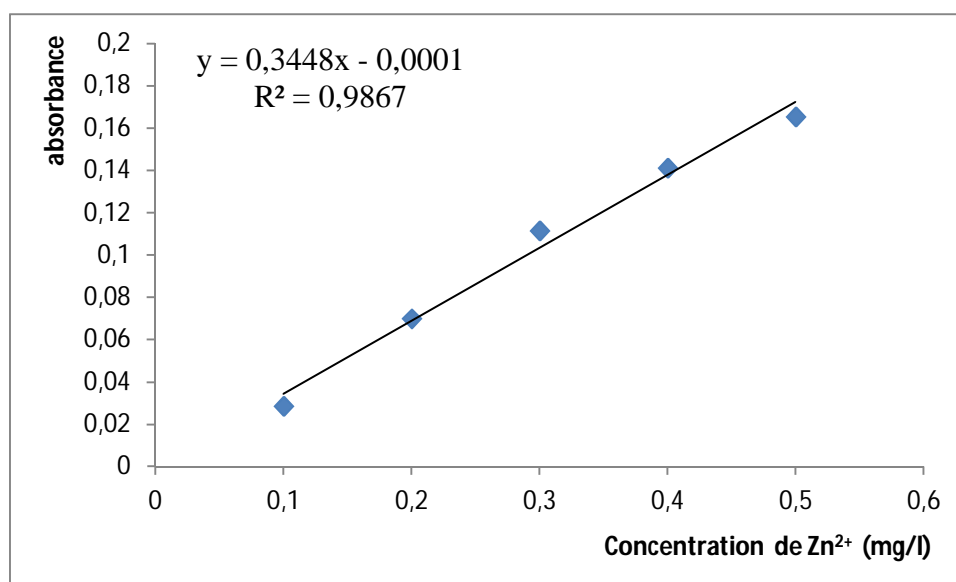


**Figure (annexe 2) :** Courbe d'étalonnage de sodium par SAA

- Dosage de zinc

**Tableau (annexe 2.1) :** Valeur d'absorbance  $Zn^{2+}$  des différentes concentrations pour chaque étalon

N <sup>bre</sup> d'étalons	1	2	3	4	5
Concentrations (mg /L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Absorbance à $\lambda_{max}=213,9nm$	0,0286	0,07	0,1115	0,1412	0,1654

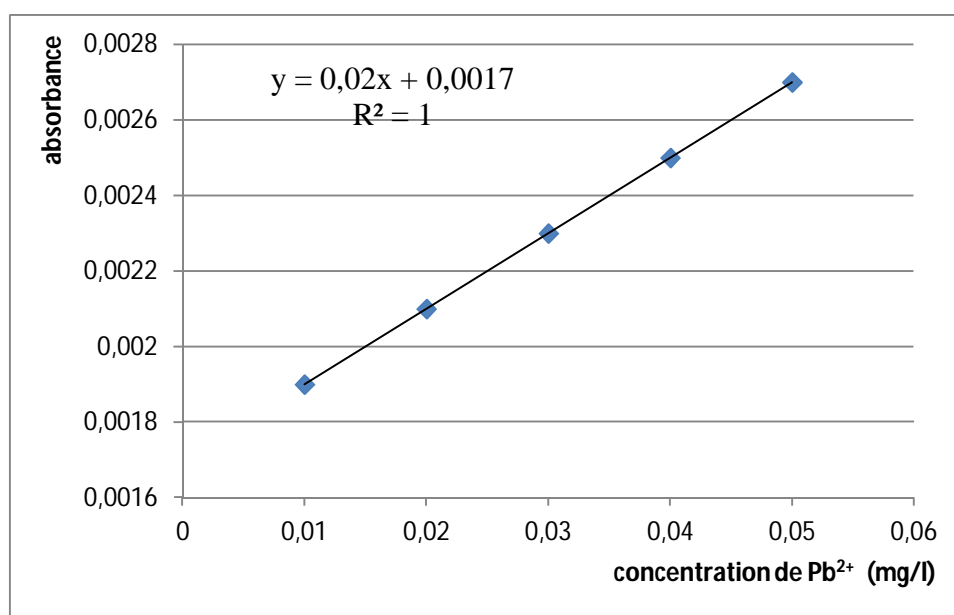


**Figure (annexe 2.1) :** Courbe d'étalonnage de zinc par SAA

- Dosage de plomb

**Tableau (annexe 2.2) :** Valeur d'absorbance  $Pb^{2+}$  des différentes concentrations pour chaque étalon

N <sup>bre</sup> d'étalons	1	2	3	4	5
[ $Pb^{2+}$ ] (mg /L)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Absorbance à $\lambda_{max}=283,3$ nm	0,0019	0,0021	0,0023	0,0025	0,0027



**Figure (annexe 2.2) :** Courbe d'étalonnage de plomb par SAA

## Résumé

La production d'eau pure est importante pour les industries qui nécessitent une eau de process de première qualité répondant à celles d'une eau ultrapure. Ce type d'eau est généralement utilisé dans les industries pharmaceutiques, le domaine de la santé, pour les semi-conducteurs et pour l'agroalimentaire. Elle peut être également exploitée dans le domaine de l'analyse.

Notre travail a porté sur le contrôle de la qualité de l'eau produite à partir d'un procédé combiné osmose inverse –électrodéionisation, par des analyses physicochimiques des échantillons d'eaux de process de cevital et des eaux brutes de l'alimentation. Nous avons pu confirmer que la nature et la conformité des eaux de l'alimentation influent considérablement sur celle de l'eau ultrapure produite.

**Mots clés :** l'eau ultrapure- osmose inverse- électrodéionisation- cogénération-procédés membranaires.

## Abstract

The production of pur water is very important for many industries that require the best quality process water corresponding to those of a ultrapure water. This type of water is generally used in the pharmaceutical industry, health care domain, for semiconductors and for agribusiness. It can also be exploited in the field of analysis.

Our work has focused on monitoring the quality of water produced from a reverse osmosis process combination with électrodéionisation, by physicochemical analyzes of samples water of Cevital process and raw water feeding. We confirmed that the nature and the compliance of water feeding influence the ultrapure water produced

**Keywords:** Ultrapure water- Reverse Osmosis - électrodéionisation- - cogeneration- membranaires processes.