

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique
MEMOIRE DE MASTER

Réalisé par :

-Mr. MERADJI Hocine

Thème :

**Caractérisation des eaux de mer et des eaux
de rejets par l'ACP**

Encadreur :

Mr.A.LEFKIR

Docteur (ENTP)

Président de jury :

Mr. A.BERMAD

Professeur (ENP)

Examineurs:

Mr. A.ALOUACHE

M.A.A (ENS Kouba)

Mr. A.BENMOKHTAR

M.A.A (ENP)

Promotion 2015

Remerciement

En premier et en dernier, Avant tout et après tout, Dans le bonheur et dans le malheur, Merci à Allah le tout puissant pour toutes ses grâces et ses faveurs, pour nous avoir accordé la chance d'étudier à l'Ecole Nationale Polytechnique et de nous avoir donné le courage et la force d'accomplir ce modeste travail.

*Nous remercions vivement **Mr. LEFKIR Abdelwahab et Mr. M.AMITOUCHE***

mes encadreur, pour le sujet qu'ils m'ont proposé qui m'a passionné, mais également pour leurs précieuse aide et leurs conseils. Ils ont su me laissé la liberté nécessaire à l'accomplissement de ma tâche, tout en y gardant un œil critique et avisé malgré leurs emploi du temps chargé pendant toute l'année.

*Un grand merci à **Mr. BERMAD Abdelmalek** pour son soutien, je le remercie vivement pour l'intérêt qu'il a porté pour ce travail.*

Nous exprimons mes vifs remerciements aux membres de Jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce mémoire de fin d'étude.

Et enfin, un grand remerciement destiné à mes chère(s) enseignants et enseignantes, eux qui ont contribué à notre formation, depuis le cycle primaire jusqu'au cursus universitaire.

Dédicaces

Grâce à Allah le tout puissant nous avons réalisé ce modeste travail

que je dédie

À celle qui m'a mise au monde, pour son aide appréciable, sa disponibilité, et

ses conseils fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail.

À mon père pour son soutien moral et matériel.

À toute ma famille

A mon cher ami Oussama MOKHTARI et à toute sa famille

À tous mes ami(e)s de la promotion Hydraulique 2015.

ملخص

رغم أن الموارد المائية معتبرة، لكنها مع ذلك محدودة، وحتّى في الجزائر، البلد الغني بالمياه، توجب عليها أن تحتاط لمشكل نقص المياه. واحدة من حلول التّغلب على نقص المياه الصالحة للشرب يتمثل في محطّات التّحلية. هذه المحطّات التي تسمح بإنتاج الماء الصالح للشرب عن طريق ماء البحر أو الماء المالح و ذلك باستخدام تقنيات معينة ولكن تركيب محطة تحلية ينطوي على سلسلة من التفاعلات التي تؤدي إلى تغيير في خصائص البيئة الطبيعية المستقبلية (البحرية).

الهدف الرئيسي من هنا العمل هو التعرف على خصائص مياه البحر وتصريف المياه المالحة في الساحل الجزائري و نالك باستخدام تحليل المكون الرئيسي.

كلمات مفتاحية: تحلية الماء، ماء البحر، التناضح العكسي، تحليل المكون الرئيسي.

Résumé

Bien qu'elles soient considérables les ressources en eau ne sont pas infinies et même l'Algérie, qui fut longtemps un pays riche en eau, a dû prendre conscience du problème de l'eau. Une des solutions pour pallier le manque d'eau potable sont les stations de dessalement. Celles-ci permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou d'eaux saumâtres grâce à des techniques particulières. Mais l'implantation d'une usine de dessalement implique une série d'effets pouvant donner lieu à une modification des caractéristiques du milieu récepteur (milieu marin).

L'objectif principal de notre travail est d'identifier la caractérisation des eaux de mer et des rejets de saumure dans le littoral Algérien en utilisant l'analyse en composante principale.

Mots clés : Dessalement, Eau de mer, Osmose inverse, Analyse en Composantes Principales.

Abstract:

Though they are considerable, water resources are not infinite. Even Algeria is a rich country in water, but they had to be aware of the water problem. In order to eradicate this lack of drinking water, the government opts for the desalination stations. These can produce drinking water from seawater or brackish water through particular techniques. But the installation of a desalination plant involves a series of reactions which lead to a change in the characteristics of the receiving environment (marine).

The main purpose of our work is to identify the characterization of sea water and brine discharges in the coastal Algerian using principal component analysis.

Keywords: Desalination, Seawater, Reverse Osmosis, Principal Component Analysis.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : Le dessalement de l'eau de mer

I.1. Eau de mer et eau potable.....3

I.1.1. Qualité de l'eau de mer3

I.1.2. Qualité de l'eau potable.....4

I.2. Histoire du dessalement.....5

I.3. Situation du dessalement dans le monde.....6

I.4. Situation de dessalement en Algérie9

I.5. Définition du dessalement de l'eau de mer.....9

I.6. Etapes de dessalement de l'eau de mer.....9

I.6.1. Captage d'eau de mer..... 10

I.6.2. Le prétraitement..... 10

I.6.3. Les différents procédés de dessalement..... 11

I.6.3.1. Procédés de distillation..... 12

I.6.3.2. Procédés membranaires..... 13

CHAPITRE II : Dessalement par osmose inverse

II-1- Poste des prétraitements 15

II.1.1. Prétraitements physicochimiques..... 15

II.1.2. Prétraitements chimiques..... 17

II.2. Poste d'osmose inverse..... 17

II.2.1. Principe d'osmose inverse 17

II.2.2. Caractéristiques principales.....	19
II.2.3. Installation d'osmose inverse.....	21
II.2.4. Le post-traitement.....	26

CHAPITRE III : Théories de l'analyse en composantes principales

III.1. Introduction	27
III.2. Analyse de données	27
III.3. Analyse en composantes principales	28
III.3.1. Définitions	28
III.3.2. Objectifs	30
III.3.3. Domaine d'application	31
III.3.4. Cadre	31
III.3.5. Procédé d'application de l'ACP	31
III.3.6. Résultats d'application.....	32
III.3.7. Analyse des résultats.....	32
III.3.8. Représentation graphique.....	34
III.3.9. Influence des différentes transformations des variables.....	34

CHAPITRE IV : Applications

IV.1. Caractérisation des eaux de mer.....	38
IV.1. 1. ACP des eaux de mer.....	38
IV.2. Caractérisation des eaux de rejet	44
IV.2.1. ACP du ratio saumure sur l'eau de mer.....	44
IV.3. Eau de mer par rapport à la norme	49

Conclusion générale	51
----------------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

Figure n°	Les titres	Page
Figure I.1	La disponibilité en eau douce par état en 2007 en m ³ par habitant par an	7
Figure I.2	Capacités de dessalement dans le monde	8
Figure I.3	Les étapes de dessalement de l'eau de mer	10
Figure I.4	Les différents procédés de dessalement	12
Figure I.5	Capacités de dessalement dans le monde par an	14
Figure II.1	Coagulation floculation.	16
Figure II.2	Principe d'osmose inverse	18
Figure II.3	Unité élémentaire d'osmose inverse	20
Figure II.4	La pompe haute pression (PHP)	22
Figure II.5	Récupération d'énergie en osmose inverse par turbopompe TPMDX Gui-nard	23
Figure II.6	La circulation typique d'une turbine de récupération d'énergie	24
Figure II.7	Récupération d'énergie par système à pistons «échangeurs de pression»	25
Figure II.8	Le système de récupération d'énergie (ERI)	36
Figure IV.1	Variation des valeurs propres par axe principale pour l'ACP des eaux de mer	38
Figure IV.2	Cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de mer	41
Figure IV.3	Projection des stations sur les composantes principales de l'ACP des eaux de mer	41
Figure IV.4	Cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de mer après rotation	43
Figure IV.5	Projection des stations sur les composantes principales de l'ACP des eaux de mer après rotation	44
Figure IV.6	Variation des valeurs propres par axe principale pour l'ACP des ratios entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer	44
Figure IV.7	Cercle de corrélation du rapport entre les paramètres physico-chimiques des eaux de rejet sur les eaux de mer naturelle.	48
Figure IV.8	Projection des stations sur les composantes principales de l'ACP des ratios.	49

Tableau n°	Les titres	Page
Tableau I.1	Concentration des principaux éléments en eau de mer Méditerranée	03
Tableau IV.1	Les ratios entre les eaux de mer naturelles et la norme des rejets.	38
Tableau IV.2	Contribution des axes principaux pour l'ACP des eaux de mer	39
Tableau IV.3	Caractéristiques physico-chimiques des eaux de mer	39
Tableau IV.4	Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de mer	40
Tableau IV.5	Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux de mer dans les composantes principales	42
Tableau IV.6	Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux de mer dans les composantes principales après rotation	45
Tableau IV.7	Contribution des axes principaux pour l'ACP des ratios entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer	46
Tableau IV.8	Caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet	46
Tableau IV.9	Les ratios entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle	46
Tableau IV.10	Matrice de corrélation du rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle.	47
Tableau IV.11	Contribution du rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle dans les composantes principales.	38



Introduction Générale



Introduction générale

L'eau est indispensable pour la vie mais sa disponibilité n'est pas assurée partout. La pénurie d'eau se pose et se posera dans de nombreux pays. Pourtant les réserves d'eau sur le globe terrestre sont immenses. La majeure partie de ces réserves (97,5 %) est sous forme d'eaux salines ou saumâtres et sur les 2,5 % disponibles, la plus grande partie (70 %) est sous forme de glace. Seul 0,03% de l'eau totale mondiale est de l'eau douce disponible. Le reste est souvent inaccessible : humidité du sol ou nappe profonde. Actuellement, selon les Nations Unies, un milliard de personnes vivent dans des zones où l'eau est rare selon Global Water intelligence (2013).

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres.

Face à ces défis vitaux, l'Algérie s'est lancée depuis peu, mais de façon intense, dans le dessalement de l'eau de mer. Cette solution s'est imposée afin de faire face à ces besoins grandissants, mais aussi pour atténuer la pression sur les ressources locales. Par conséquent, l'Algérie s'est fixée un objectif de réaliser 13 stations de dessalement de l'eau de mer, d'une capacité de 2.260.000 m³/jour, selon l'ADE.

Le dessalement de l'eau de mer constitue une alternative pour remédier au déficit en eau et pour faire face aux demandes croissantes en eau potable. Mais l'implantation d'une usine de dessalement implique une série d'effets sur le milieu pouvant introduire dans celui-ci une série d'éléments potentiellement générateurs de diverses affections sur l'environnement marin, tant dans la phase de travaux que dans la phase opérationnelle (**résidus de saumures...**). Pouvant donner lieu à une modification des caractéristiques du milieu récepteur.

Ces rejets proviennent principalement de la saumure qui est très concentré en sels et qui contient des produits chimiques utilisés dans les différentes opérations de dessalement. Ces derniers peuvent provoquer des dommages potentiels sur le milieu marin.

Pour cela, une connaissance appropriée du milieu naturel dans lequel seront réalisées les différentes actions est nécessaire et sera décrite dans la partie concernant l'inventaire environnemental de la zone d'étude à partir de l'information documentaire compilée et des travaux d'échantillonnage et de reconnaissance réalisés pendant la campagne océanographique effectuée sur l'ensemble de la zone d'influence du projet.

Dans ce travail, on s'intéresse particulièrement à identifier la caractérisation des eaux de rejet (la saumure) par une approche mathématique appelée «Analyse en Composantes Principales » pour étudier l'impact de la saumure sur le milieu récepteur.

Notre travail débute par une introduction générale où on a mis l'accent sur l'importance du dessalement des eaux de mer.

Le premier et le deuxième chapitres consistent à expliquer la nécessité du dessalement et ses différentes procédures.

Le troisième chapitre consiste à expliquer l'analyse en composantes principales et ses différentes applications.

La partie pratique a été consacrée à l'application de l'ACP sur les données des méga stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie et de présenter l'essentiel des résultats avec leur interprétation.

Enfin, une conclusion générale mettra l'accent sur l'importance des résultats obtenus.



CHAPITRE I :

***Le dessalement de l'eau de
mer***



I.1. Eau de mer et eau potable

I.1.1. Qualité de l'eau de mer

L'eau de mer est la matière première de l'usine de dessalement. Chacun peut observer ses changements de température, de limpidité d'un lieu ou d'un jour à l'autre ; les écarts de salinité sont moins connus. Salinité, température et matières en suspension sont les paramètres majeurs du fonctionnement d'une unité de dessalement.

I.1.1.1. Salinité

La salinité mesure la concentration en sels dissous ; elle s'exprime en g/L. Du fait que les quantités de sels dissous sont souvent très inférieures au gramme, l'unité communément utilisée est le mg/L ou encore le p.p.m. chez les Anglo-Saxons. On notera que cette dernière unité n'est pas strictement équivalente puisqu'elle exprime des mg/kg.

Les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles. La quantité de sels dissous augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. Elle peut dépasser 50 g/L dans certaines zones, telles que la côte Est de l'Arabie Saoudite où la chaleur et les hauts-fonds favorisent l'évaporation.

Quelques valeurs moyennes de la salinité de l'eau de mer :

- Océan Atlantique : 35 g/L ;
- Mer Méditerranée : 38 g/L ;
- Mer Rouge : 40 g/L et plus ;
- Golfe Persique : 50 g/L et plus.

L'eau de mer est principalement constituée de sodium, magnésium, potassium, chlorure et sulfates. Les proportions moyennes mesurées en mer Méditerranée sont données dans le **tableau I.1**. Elles correspondent à des mesures en surfaces. Cependant, la profondeur influe très peu sur leur concentration. Ces valeurs peuvent donc être considérées comme de bonnes estimations.

Tableau I.1 : Concentration des principaux éléments en eau de mer Méditerranée (Klein et al, 1999)

Constituant	Symbole	Concentration (g/L)
Chlorure	Cl ⁻	21,40
Sodium	Na ⁺	11,60
Sulfate	SO ₄ ²⁻	3,06
Magnésium	Mg ²⁺	1,295
Calcium	Ca ²⁺	0,416
Potassium	K ⁺	0,390
Bicarbonates	HCO ₃ ⁻	0,145
Brome	Br ⁻	0,066
Strontium	Sr ²⁺	0,027
Bore	B ³⁺	0,013
Fluor	F ⁻	0,001
Total		38,772

I.1.1.2. La température

La température de l'eau de mer peut varier de quelques degrés sur les côtes sous influence des courants polaires jusqu'à 35 °C autour de la péninsule arabique.

Une température élevée avantage la distillation, tout en observant que cet avantage est minime du fait que la capacité thermique massique de l'eau est très faible comparée à son enthalpie (sa chaleur latente) de vaporisation.

Pour l'osmose inverse le bénéfice est contrasté : la production des membranes d'osmose augmente de 3 % par degré Celsius. C'est un facteur important puisqu'une augmentation de 5 °C augmente la production par un facteur égal à $1,03^5 = 1,159$. En contrepartie la qualité de l'eau produite diminue et, surtout, le vieillissement de la membrane s'accélère. L'expérience montre que l'optimum se situe autour de 25 °C.

On retiendra aussi que la capacité d'une unité d'osmose inverse n'a de sens que si les valeurs minimale et maximale de la température de l'eau sont définies.

I.1.1.3. Teneur en matières en suspension

L'eau de mer est un milieu vivant, qui véhicule d'une part des matières minérales et d'autre part des organismes vivants souvent microscopiques. En pleine mer, le plancton prédomine. Près des côtes, la teneur en sable augmente. Elle varie selon les courants et la profondeur des fonds. La pollution par des rejets urbains ou industriels peut devenir prépondérante. Le site de la prise d'eau et sa conception seront choisis pour éviter toute pollution et limiter au mieux l'apport des matières en suspension.

Les membranes d'osmose arrêtent toutes les matières en suspension. Il en résulte un colmatage rapide de la membrane, qui la rend impropre à son usage. Pour conserver leur efficacité, il est indispensable de rendre l'eau de mer aussi limpide que possible. C'est l'objectif du prétraitement dont les phases successives sont décrites au paragraphe 8.3.

La distillation, procédé beaucoup moins sensible aux matières en suspension, ne requiert qu'une filtration grossière pour la protection des pompes et des échangeurs.

I.1.2. Qualité de l'eau potable

I.1.2.1. Critères de potabilité

Dans la grande majorité des cas, l'eau est exclusivement destinée à la consommation humaine et doit donc être conforme à la réglementation des eaux potables.

Cependant, une partie de la production peut être directement livrée à une usine à proximité. L'exemple le plus fréquent est celui de la centrale thermique, qui requiert une eau d'appoint complètement déminéralisée. La distillation, pouvant produire une eau contenant moins de 5

mg/L de sels dissous, aura donc un avantage certain face aux techniques membranaires qui ne peuvent égaler ce résultat en une seule étape.

Il arrive que certains pays n'aient pas de réglementation concernant la qualité des eaux potables. On se conformera alors aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), qui font référence au sein de la Communauté internationale.

L'OMS classe les critères de potabilité d'une eau en cinq groupes.

Ceux qui intéressent le producteur d'eau dessalée concernent :

- ✓ L'aspect physique : température, limpidité, odeur, teneur en matières en suspension (MES) ;
- ✓ Les caractéristiques chimiques : salinité, chlorures, pH, etc.

Pour chaque critère, l'OMS précise une valeur guide, par exemple :

- ✓ Salinité inférieure ou égale à 1 000 mg/L ;
- ✓ Chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/L.

Le facteur clé du dessalement est évidemment la salinité. Au vu des recommandations de l'OMS, on pourrait l'estimer suffisant.

Or, les chlorures représentent environ 45 % de la fuite de salinité d'une eau de mer osmosée. On devra donc fixer un objectif de 500 mg/L pour la salinité totale, de façon à respecter l'objectif de 250 mg/L pour les chlorures.

I.1.2.2. Contraintes du réseau de distribution de l'eau

Les critères de potabilité ne suffisent pas complètement à la détermination de la qualité de l'eau potable. Il faut aussi vérifier qu'elle ne soit ni agressive, ni entartrante vis-à-vis du réseau de distribution aux usagers. Or, quel que soit le procédé de dessalement retenu, l'eau produite est pratiquement dépourvue de bicarbonate de calcium et montre donc un caractère agressif marqué. Cette agressivité doit être neutralisée par un post-traitement à déterminer en fonction de la nature des matériaux du réseau et de sa longueur. Il peut prendre des formes plus ou moins complexes depuis une simple correction de pH jusqu'à une reminéralisation partielle par introduction simultanée de chaux et de dioxyde de carbone.

I.2. Histoire du dessalement

L'idée de fabriquer de l'eau pure à partir de l'eau de mer tourmente les populations assoiffées depuis des centaines, pour ne pas dire des milliers d'années. La prémisse originale reposait sur l'idée que, par ébullition ou évaporation, l'eau pouvait être séparée du sel.

Cette théorie – évaporation ou distillation – constituait le fondement de la technologie des premières installations de dessalement à grande échelle qui apparurent dans les années 50 et 60, principalement au Moyen- Orient. Ces régions, pauvres en eau mais riches en combustible, convertissaient leurs ressources énergétiques en ce qui leur manquait le plus : de l'eau.

Cependant, les technologies qui emploient la chaleur requièrent de grandes quantités d'énergie.

I.3. Situation du dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau est en très forte croissance dans le monde. L'approvisionnement en eau potable sur le plan quantitatif et qualitatif s'impose de plus en plus, parallèlement aux risques de pollutions (vecteurs de maladies, toxines ou matières en suspension ou agents pathogènes) qui perdurent à chaque étape du parcours de l'eau. La disponibilité géographique en eau douce est inégalement répartie dans le monde (Figure I.1). Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est venu s'imposer pour pallier à ce déséquilibre. La capacité installée de dessalement augmente chaque année en moyenne de plus de 10%. Aujourd'hui, plus de 15 000 unités de dessalement dans 120 pays produisent environ 40 millions de m³/j, dont les trois quarts issus de l'eau de mer et un quart des eaux saumâtres. Sur ces 40 millions, 75% sont destinés à la consommation humaine, 25% à un usage industriel ou agricole. Rappelons que la capacité mondiale de production en eau potable est de l'ordre de 500 millions de m³/j (Figure I.2)

La Chine a annoncé 1 million de m³/j d'eau de mer traitée en 2010 et jusqu'à 3 millions de m³/j en 2020. 60% des besoins en eau douce des pays du Golfe Persique sont satisfaits par le dessalement d'eau de mer. En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a débuté d'abord dans des situations d'isolement insulaire (Malte, Baléares, Dalmatie, Chypre, Cyclades...), littorales (Libye) et désertiques (Algérie), et essaime aujourd'hui très rapidement tout autour de la Méditerranée. L'Algérie et l'Espagne ont clairement opté pour cette option pour résoudre leur problème de pénurie. A ce jour, la Méditerranée représente environ un quart du dessalement mondial. Vers 2030, la région pourrait approcher le chiffre du dessalement mondial actuel (soit environ de 30 à 40 millions de m³/j). (BOYE, 2008).

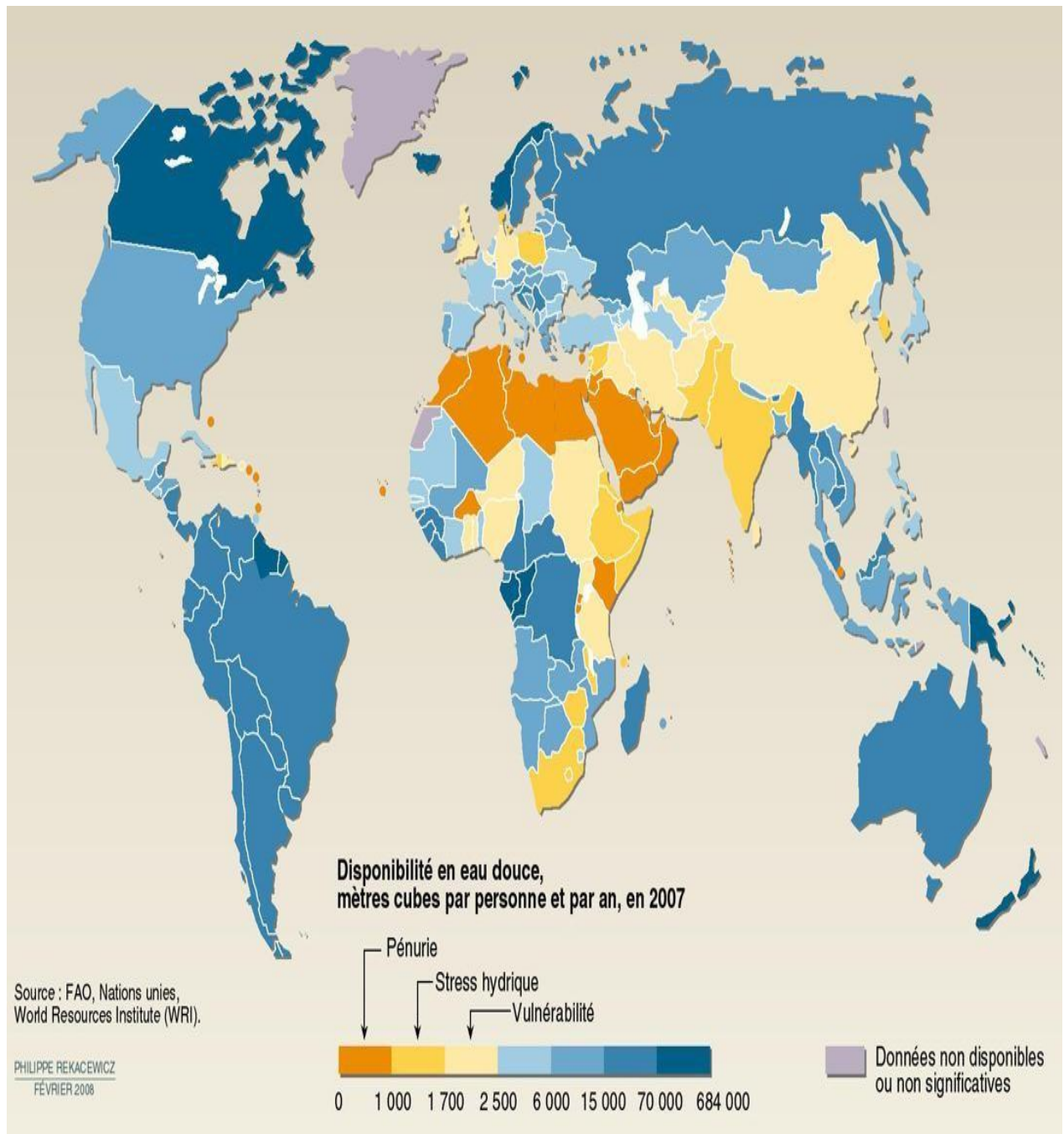


Figure I.1: La disponibilité en eau douce par état en 2007 en m³ par habitant par an (FAO, 2008).

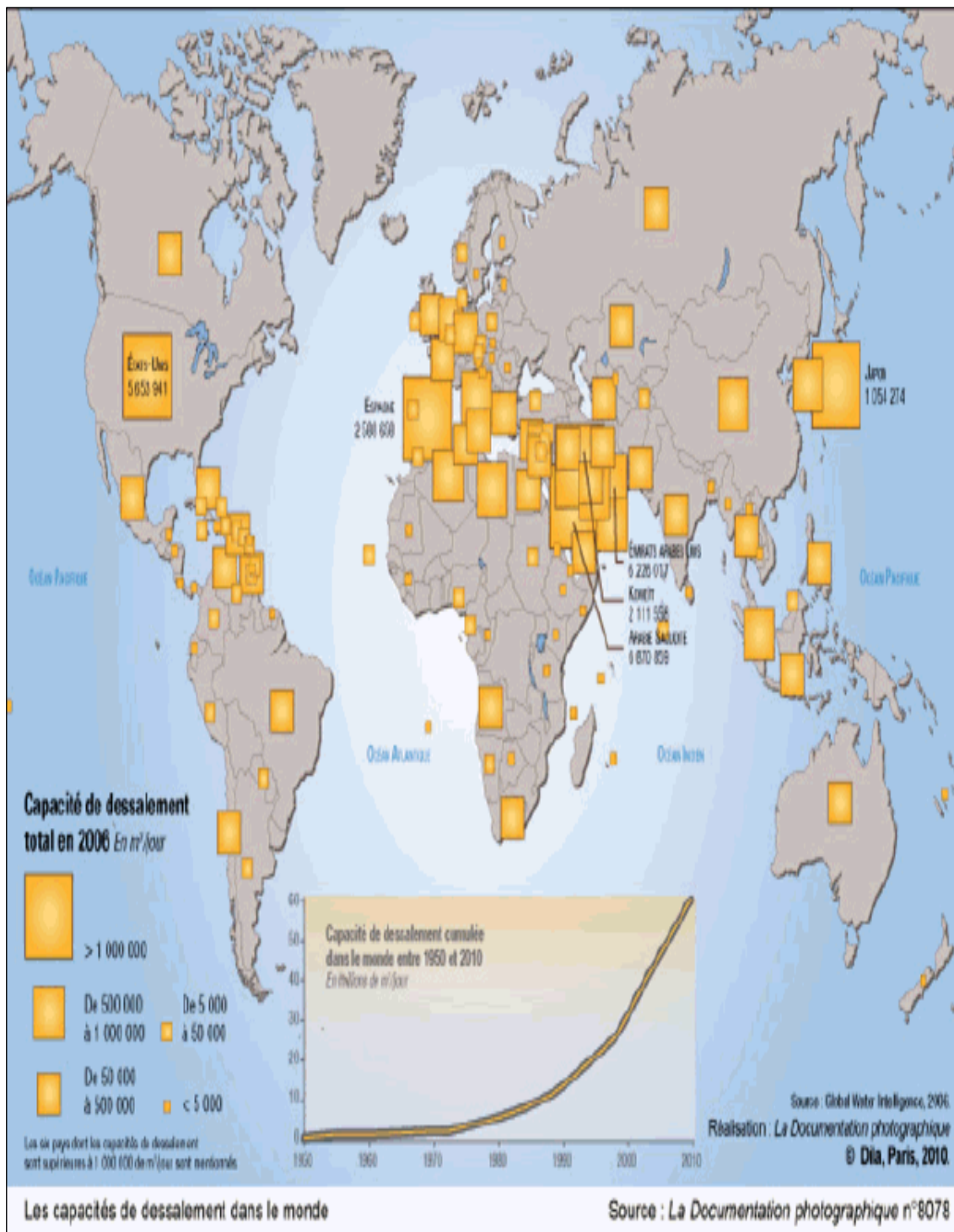


Figure I.2 : Capacités de dessalement dans le monde (PATIER & BLANCHON, 2010)

I.4. Situation de dessalement en Algérie

L'Algérie est un pays qui possède des ressources hydriques limitées pour des raisons climatiques capricieuses, caractérisé par une pluviométrie irrégulière oscillant entre 100 et 1200 mm/an et enregistrant un déficit hydrique estimé à 20% durant les cinq dernières années.

Ces faits sont aggravés par une période exceptionnelle de sécheresse qui dure depuis une vingtaine d'années. La mobilisation des ressources en eau depuis l'indépendance a été axée en premier lieu sur les ressources souterraines. L'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'irrigation, de l'industrie ainsi que besoins incompressibles de la population ont amené les pouvoirs publics à mobiliser de en plus de ressources superficielles. (Khirani S, 2007).

Mais la mobilisation des eaux souterraines au nord du pays a atteint son seuil maximal, d'où une surexploitation des nappes superficielles et la détérioration de la qualité de l'eau notamment dans l'ouest du pays. Le recours au dessalement d'eau de mer devient alors indispensable pour sécuriser l'alimentation en eau potable dans cette région.

Pour assurer une alimentation pérenne en eau potable, l'Algérie a choisi de se tourner résolument vers la mer. Ce faisant, notre pays entend profiter au maximum de l'expérience déjà acquise dans d'autres pays. Dans le cas algérien, le dessalement réduit de manière durable les pénuries d'eau car plus de la moitié de la population réside sur la longue bande littorale de 1400 km, théâtre, d'un déficit chronique en eau potable.

I.5. Définition du dessalement de l'eau de mer

Le dessalement s'appelle dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale (DUNGLAS, 2014).

I.6. Etapes de dessalement de l'eau de mer

Le processus de dessalement d'eau de mer se fait en quatre étapes (Figure II.3) :

- ✓ Le captage de l'eau de mer
- ✓ Le prétraitement
- ✓ Les différents procédés de dessalement
- ✓ Le post traitement ou reminéralisation

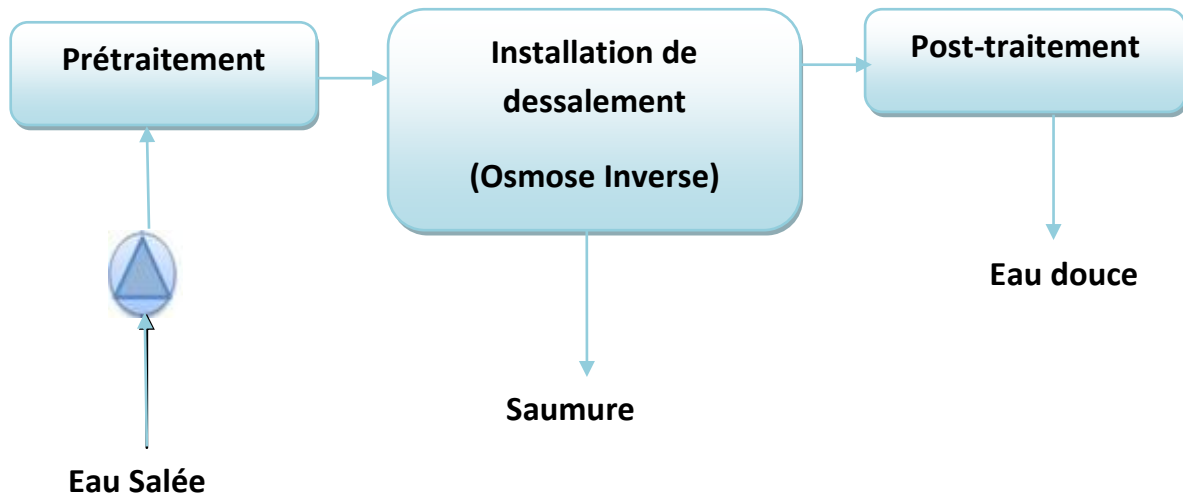


Figure I.3 : Les étapes de dessalement de l'eau de mer

I.6.1. Captage d'eau de mer

Consiste à pomper l'eau de mer vers la station de dessalement, cette eau doit être bonne du point de vue matières en suspension. Sont utilisés dans cette étape deux types de technologies :

- **Les prises d'eau par des puits de captage côtiers** : Les puits de captage côtiers sont semblables aux puits de captage terrestres dans les nappes phréatiques, mais sont forés sur la frange littorale à des profondeurs suffisantes pour permettre une venue d'eau de mer ou saumâtre par infiltrations à travers le sol,
- **Les prises d'eau par infiltration sous les plages ou sous le fond marin** : L'eau de mer peut être captée sous une plage ou une avant plage par des puits maritimes, des tranchées drainantes, des drains foncés ou forés ou des champs drainants. (MAUREL, 2006).
- **Les prises d'eau directes en mer ouverte, en surface ou au fond** : peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants (MAUREL, 2006).

I.6.2. Le prétraitement

Le prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse est absolument nécessaire car les membranes d'osmose inverse sont très sensibles au colmatage et une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'osmose inverse est indispensable pour assurer des performances stables de l'osmose inverse sur le long terme. Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques.

- ✓ Les prétraitements physiques incluent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire.

✓ Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de polyélectrolytes (TANSAKUL, 2009).

a- Coagulation-floculation

La coagulation permet de favoriser l'agglomération des colloïdes en diminuant les forces de répulsion électrostatique (liées aux charges superficielles). La floculation consiste à agglomérer ces particules en microflocs puis en flocs plus volumineux décantables. Les substances les plus couramment utilisées sont :

- Pour la coagulation : la chaux, l'alun, le sulfate ferrique et le chlorure ferrique,
- Pour la floculation : les polymères organiques à longues chaînes de masse molaire élevée (BRGM, 2010).

b- La filtration

Dans le cas de la filtration sur sable, la séparation s'effectue le long d'un milieu poreux (le sable), plus ou moins tortueux, qui se colmatara en profondeur au fur et à mesure de l'accumulation des particules en suspension lors du passage du fluide. Plusieurs autres types de filtres reposent sur ce principe (filtre à cartouche, filtre à disque,...). Un milieu poreux représente un ensemble de grains ou d'agrégats autour desquels des espaces vides, appelés pores, sont interconnectés ou non. Le matériau doit être perméable à un écoulement de fluide (CASTAING, 2011).

c- Le Traitement chimique

Après filtration à sable, des équipements de dosage font partie de prétraitement chimique appliqué à l'eau de mer avant l'entrée dans les membranes (acidification, addition de bisulfite de sodium et dosage d'anti-incrustant (CHENAOUÏ, 2010).

d- La filtration de sécurité ou microfiltration:

La microfiltration est assurée par l'utilisation d'un filtre à cartouche type bobiné. Entre le collecteur d'entrée et de sortie, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de remplacer les cartouches filtrantes (CHENAOUÏ, 2010).

I.6.3. Les différents procédés de dessalement

Plusieurs méthodes permettent la séparation de l'eau de mer en une eau douce contenant une faible concentration des sels dissouts, et une solution concentrée en sels. On citera notamment la distillation, l'osmose inverse et l'électrodialyse (Figure II.4). Cependant, les deux technologies utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont celles basées sur la distillation et l'osmose inverse (MANDRI, 2011).

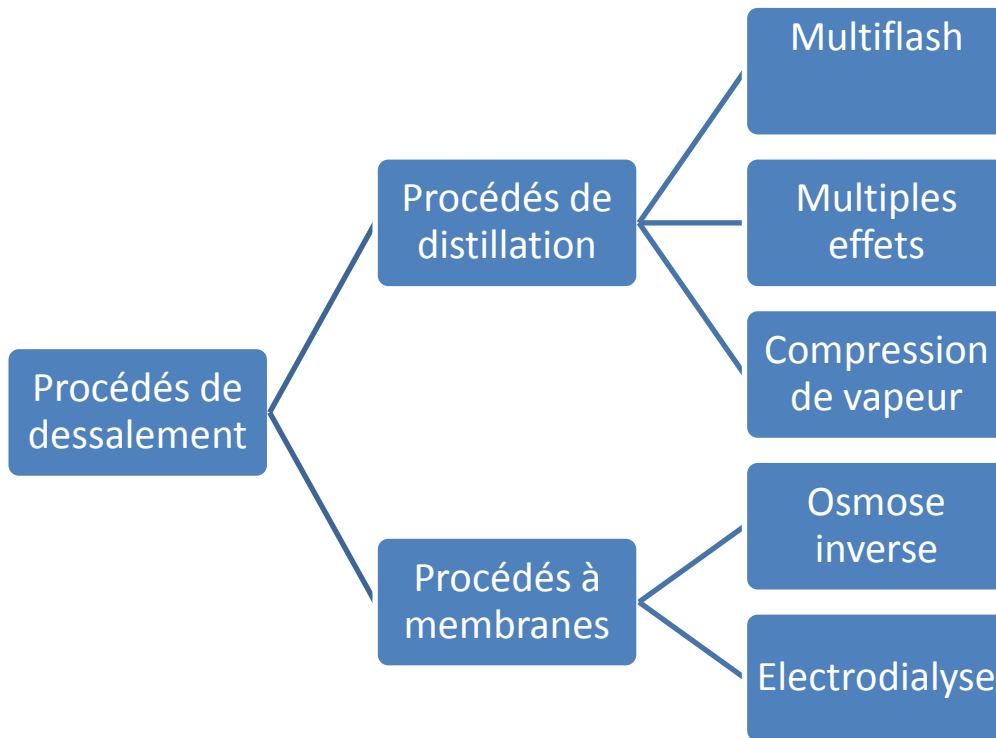


Figure I.4 : Les différents procédés de dessalement

I.6.3.1. Procédés de distillation

L'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau pure.

a. Distillation à simple effet

Permet de reproduire le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par de l'eau de mer froide. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième, l'eau de mer concentrée.

b. Distillation à multiples effets

Son objectif est d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur, simple effet. On sait que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression. On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faible et ainsi de suite (MAUREL, 2006).

c. Distillation avec compresseur de vapeur

Consiste à une revalorisation de la vapeur d'eau du dernier effet par compression grâce à un compresseur mécanique ou via un éjecteur, on parle alors de thermocompression. La compression par éjecteur nécessite par ailleurs une vapeur motrice .

I.6.3.2. Procédés membranaires

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau de mer, on peut envisager une séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives. Deux procédés utilisant de telles membranes sont actuellement commercialisés. Ce sont l'électrodialyse et l'osmose inverse.

I.6.3.2.1. L'électrodialyse

L'électrodialyse fonctionne sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques de l'électrodialyse sont : la dialyse et l'électro-désionisation.

On distingue trois types d'électrodialyse :

- L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)
- L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)
- L'électrolyse à membranes (EM)

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

I.6.3.2.2. L'osmose inverse

Il existe différentes techniques de filtration de l'eau (filtration conventionnelle, microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) selon le domaine d'utilisation. Ces techniques se différencient principalement par la taille des particules qu'elles arrêtent. Le cas extrême est l'osmose inverse qui arrête tous les solutés contenus dans l'eau mais laisse passer le solvant.

L'osmose est un phénomène naturel. Si l'on considère 2 solutions de concentrations salines différentes séparées par une membrane. L'eau migre spontanément de la solution diluée à la solution la plus concentrée c'est l'osmose. Si l'on applique une pression supérieure à la pression osmotique (pression d'équilibre) le solvant va migrer de la solution concentrée à la solution diluée c'est l'osmose inverse.

Parmi les procédés de dessalement illustrés précédemment, il a été constaté que l'osmose inverse est, de nos jours, le procédé le plus utilisé (Figure I.5) et ce pour les raisons suivantes :

- ✓ Maitrisable techniquement
- ✓ Réduction du cout des membranes utilisées de presque la moitié au cours des 6 dernières années.
- ✓ Amélioration indéniable du rendement des machines tournantes à savoir pompes moteur et turbines.
- ✓ Progrès substantiels en termes de récupération d'énergie (Les systèmes ERI).

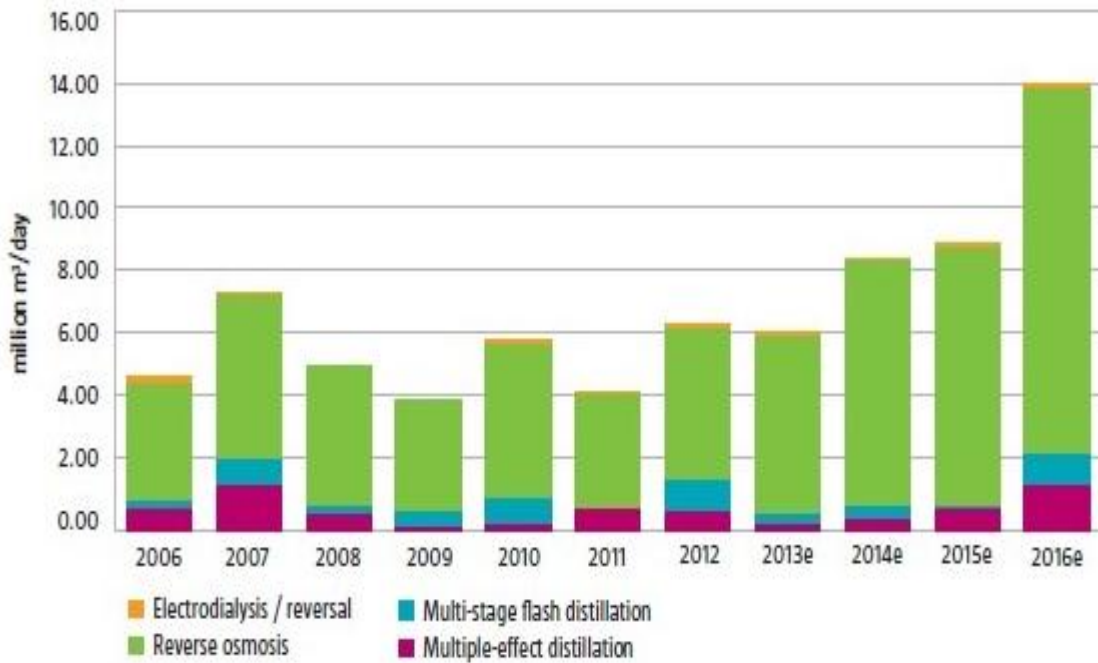


Figure I.5 : Capacités de dessalement dans le monde par an (Global Water Intelligence, 2013)

C'est pourquoi nous nous intéressons spécifiquement dans notre étude à l'osmose inverse comme procédé de dessalement le plus couramment utilisé ces dernières années.



CHAPITRE II :

Dessalement par osmose inverse



II.1. Poste des prétraitements

Il est rappelé que les étapes de prétraitements de l'eau de mer ont pour rôle d'améliorer la qualité de l'eau d'alimentation du système d'osmose inverse (OI) afin de protéger les membranes contre leur.

- ✓ Entartrage par précipitation de certains sels des zones « concentrât »
- ✓ Colmatage par les matières en suspension (MES)
- ✓ Encrassement (biofouling) par des matières biologiques (zooplancton, bactéries...etc.);

Et ceci de façon à limiter la fréquence des nettoyages chimiques et à assurer leur pérennité car des nettoyages fréquentes ont tendance à détériorer leur performances.

II.1.1. Prétraitements physicochimiques

Les prétraitements physicochimiques ont pour rôle essentiel de fournir une eau d'alimentation présentant la turbidité la plus faible possible. Il est rappelé que la valeur à atteindre doit être inférieure ou égale à 0,5 NTU. Les prétraitements physicochimiques ont un second rôle à savoir leur participation à la réduction du pouvoir colmatant de l'eau, afin d'atteindre un indice de colmatage (Silt Density Index ou Fouling Index) de l'ordre de 3,00. (Akretche J, 2004).

a) La filtration mécanique

Pour une alimentation par prise directe en mer, il convient d'éliminer toutes les matières grossières avant qu'elles ne pénètrent dans le système. Pour ce faire, la conduite de prise en mer doit être équipée d'une crépine.

Plus la largeur des grilles de la crépine sera petite, meilleur sera l'efficacité, mais plus la perte de charge sera importante, et plus importants seront les risques de colmatage. Pour soulager les prétraitements, l'apport en matières en suspensions peut être réduit en installant des filtres mécaniques fonctionnant sous-pression et à lavage automatique.

b) Clarification

L'un des objectifs majeurs du prétraitement de l'eau de mer, c'est la clarification, c'est à dire éliminer les matières en suspension (MES) qui la troublent. Pour éliminer ces particules, nous avons recours aux procédés de coagulation/floculation. (Degrement, 2005).

➤ Coagulation et floculation

L'opérateur de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement de flocc colloïdaux) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de flocc par agrégation. (Valliron F, 1989).

Les flocc ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite.

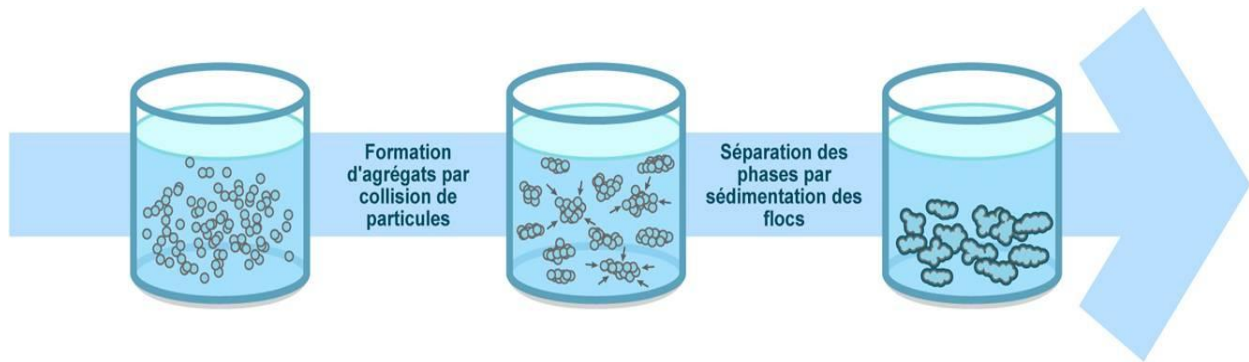


Figure II.1: Coagulation floculation (Valliron F, 1989).

Coagulation

La coagulation a pour objectif de neutraliser les colloïdes, chargés négativement le plus souvent, par des composés de deux métaux lourds Al^{3+} et Fe^{3+} (Desjardins R, 1997) :

- ✓ Chlorure ferrique $FeCl_3 \cdot 6H_2O$;
- ✓ Sulfate ferrique $Fe_2 (SO_4)_3$;
- ✓ Sulfate d'aluminium $Al_2 (SO_4)_3 \cdot 8H_2O$.

Floculation

La floculation consiste à agglomérer sous forme de floes les particules colloïdales neutralisées auparavant par la coagulation. Les membranes d'osmose inverse étant chargées négativement, il est recommandé d'utiliser des floculants anioniques ou non ioniques

(Desjardins R, 1997):

- ✓ Polymères minéraux (La silice activé SiO_2);
- ✓ Polymères naturels (amidons, alginates) ;
- ✓ Polymères de synthèse

c) Filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des MES en les faisant passer à travers un milieu poreux. Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'accumulent, il faut donc nettoyer le milieu de façon continue ou de façon intermittente. La filtration, habituellement procédé suivant les traitements de coagulation-floculation et décantation, permet d'obtenir une bonne élimination des bactéries, de la turbidité et de certains goûts et odeurs.

d) Microfiltration

La microfiltration consiste à éliminer d'un fluide les espèces dont les dimensions sont comprises entre 0,05 à 10 μ m. Les espèces sous la forme de solutés ou de particules sont retenus à la surface de la membrane par effet d'exclusion.

Les membranes les plus utilisées sont poreuses en polyamides ou polypropylène, ou encore inorganiques (en oxyde métallique ou céramique). La pression transmembranaire varie environ de 0,05 à 3 bars. La microfiltration se prête non seulement à la séparation solide-liquide mais aussi liquide- liquide des émulsions d'huile dans l'eau.

II.1.2. Prétraitements chimiques

Les prétraitements chimiques de l'eau d'alimentation du système d'OI ont pour but essentiel de protéger efficacement les membranes contre :

- Le colmatage par les matières biologiques ;
- L'entartage par précipitation et dépôts de sels ;
- Leur dégradation.

a) Acidification et injection de séquestrant

L'acidification et l'injection de séquestrant (c'est un produit qui retient dans un milieu une substance fermée) ont pour but d'éviter la précipitation des sels normalement dissous dans la zone alimentaire/concentration des éléments d'OI, Si leur concentration dépasse leur produit de solubilité. (Maurel A, Jean Michelle, 2004).

Pour conditionner chimiquement l'eau afin d'éviter les phénomènes d'entartage, il est utilisé :

- ✓ Soit un acide (acide sulfurique, acide chlorhydrique) qui empêchera la précipitation du carbonate de calcium,
- ✓ Soit un séquestrant, pour les autres sels (sulfate de calcium, sulfate de strontium...etc.),
- ✓ Soit une combinaison de deux produits.

b) Désinfection

Le but de la désinfection est d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes présents dans l'eau, afin d'empêcher le développement de maladies à transmission hydrique. Le principe de la désinfection est de mettre en contact un désinfectant à une certaine concentration pendant un certain temps avec une eau supposée contaminée. Cette définition fait apparaître trois notions importantes : les désinfectants, le temps de contact et la concentration en désinfectant. Les trois principaux désinfectants utilisés en eau potable sont les suivants : le chlore, l'ozone et le rayonnement par l'ultra violet (UV).

II.2. Poste d'osmose inverse

II.2.1. Principe d'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différents, l'osmose inverse se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution la plus concentrée lorsqu'

on inverse le flux, l'eau brute passe alors à travers les membranes qui retiennent les sels et les contaminants (Figure II.2) : c'est le principe de base de l'osmose inverse.

(voileau V-J,1999).

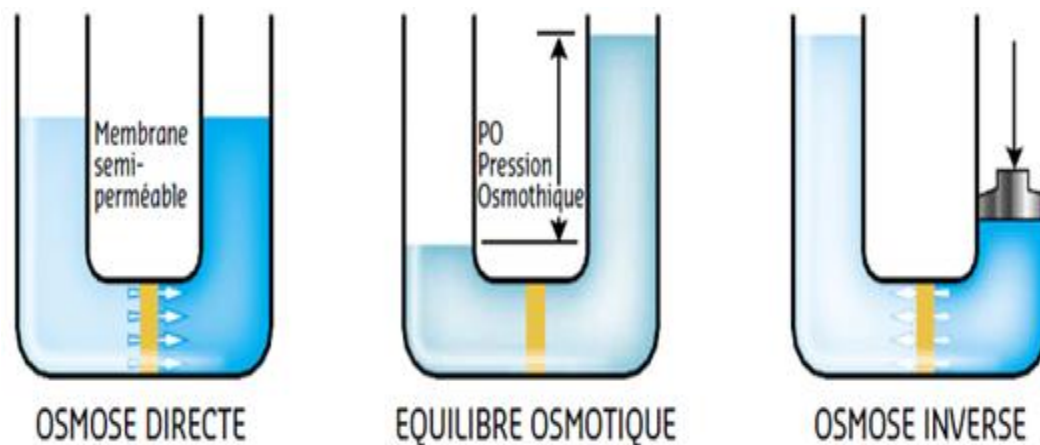


Figure II.2 : Principe d'osmose inverse.

❖ **La pression osmotique. (Maurel A, 2006).**

En première approximation, la pression osmotique peut être calculée en assimilant le comportement des molécules du soluté à celles de molécules gazeuses.

Dans le cas d'une solution diluée, on peut appliquer la loi des gaz parfaits : $\Pi V = nRT$

Π : pression osmotique ;

V : volume de la solution ;

n : nombre de moles de soluté ;

R : constante des gaz parfaits

T : température absolue.

La pression osmotique peut être calculée par la loi de **Van't Hoff** qui exprime que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en i ions, la pression osmotique sera i fois supérieure.

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés:

$$\Pi = i.C.R.T$$

Avec :

Π Pression osmotique (bar) ou (pa)

- i Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte
- C Concentration molaire en sels (mol.L⁻¹) ou (mol.m⁻³)
- R Constante des gaz parfaits (0,082 L.bar.mol⁻¹K⁻¹) ou (8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹)
- T Température absolue (K)

Dans le cas de solutions concentrées, la pression osmotique peut être calculée à partir des pressions partielles. Mais l'expérience montre que le domaine de validité de loi de **Van't Hoff** recouvre assez bien celui du dessalement des eaux.

Application numérique :

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

$$\Pi = 2 * (35 * 10^3 / 58,5) * 8,314 * 293 = 29,14 * 10^5 \text{ Pa} = \mathbf{29,14 \text{ bar.}}$$

Pour que le phénomène d'osmose inverse se produise dans de bonnes conditions économiques, il faut que la pression appliquée soit deux fois celle de la pression osmotique. On en déduit que la pression de fonctionnement d'une osmose d'eau de mer sera de l'ordre de

$$29 * 2 = 58 \text{ bar}$$

II.2.2. Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse sont :

a) La pression motrice ΔP

Est égale à la pression de refoulement de la pompe diminuée de la pression statique à la sortie du module d'osmose (côté production) et de la perte de charge due à l'écoulement de l'eau.

b) La conversion Y

Rapport entre le débit produit et le débit d'alimentation se définit par (Figure III.3) :

$$Y(\text{en \%}) = 100 \times Q_P / Q_A$$

Q_P : débit de la solution à traiter (débit à l'entrée)

Q_A : débit de la partie qui passe a travers la membrane ou perméat (débit à la sortie).

Ce paramètre s'exprime aussi sous la forme du **facteur de conversion FC** :

$$FC = 100 / (100 - Y)$$

Si $Y = 66 \%$, $FC = 3$, les sels seront donc concentrés 3 fois en admettant qu'ils sont entièrement retenus par la membrane.

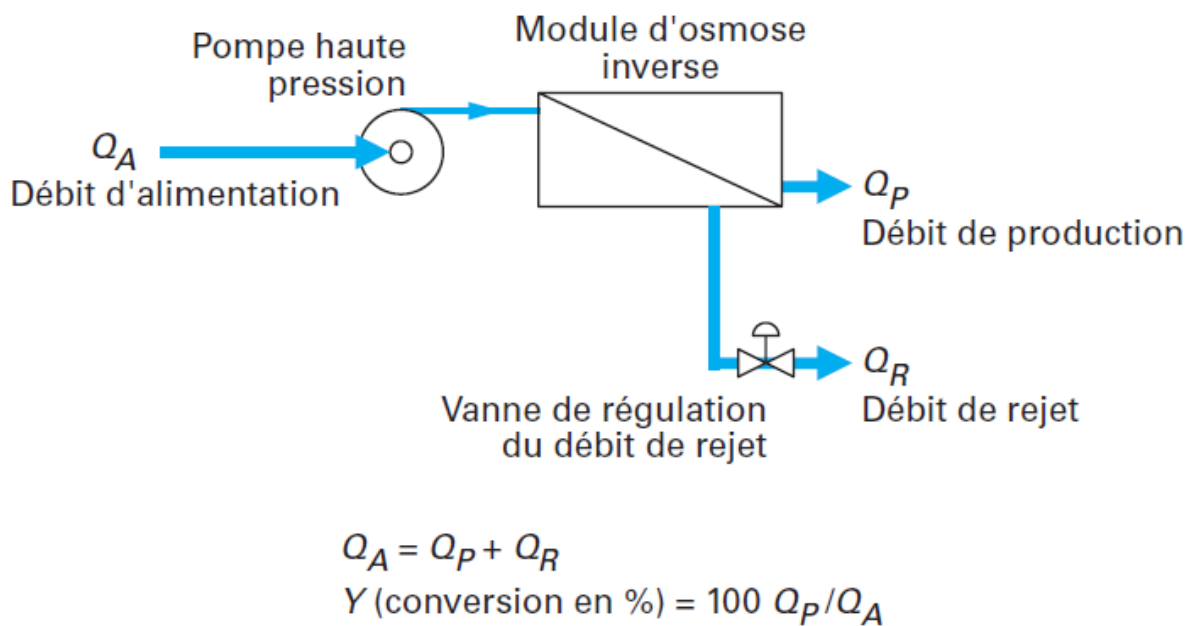


Figure II.3 : Unité élémentaire d'osmose inverse

c) **Le passage de sels PS**

Se caractérise par le rapport entre la concentration côté production et la concentration côté alimentation :

$$P_S = 100 \times C_P / C_A$$

On le note aussi par son complément : le rejet de sels, qui est le rapport entre la concentration côté rejet et la concentration côté alimentation :

$$RS = 100 \times C_R / C_A = 100 - P_S$$

Le soluté de référence est souvent le chlorure de sodium ($NaCl$), compte tenu du fait que la déminéralisation des eaux est l'application la plus importante de l'osmose inverse. On trouve ainsi couramment des membranes qui ont été développées soit pour le dessalement de l'eau de mer et qui ont un taux de rejet au ($NaCl$) de 99% environ, soit pour le dessalement des eaux saumâtres et qui ont un taux de rejet au ($NaCl$) de 96% et ceci pour des conditions opératoires déterminées (pression, température, taux de conversion...). (Maurel A, 2006).

d) **Débit spécifique ou densité du flux volumique**

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité de flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre d'où la réduction de l'investissement.

II.2.3. Installation d'osmose inverse

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

- La membrane proprement dite
- Le module
- La pompe haute pression (HP)
- Le système de récupération d'énergie

II.2.3.1. La membrane

II.2.3.1.1. Généralités sur les membranes

Une membrane peut être définie comme tant une couche mince de polyéthylène, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert. Les critères de séparation des particules, des molécules et /ou des ions peuvent être : la dimension et la forme, la nature chimique, l'état physique, la charge électrique....etc.

II.2.3.1.2. Les différents types de membranes

➤ *membranes organiques*

La plupart d'entre elles sont actuellement fabriquées à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, polysulfones, polyamides, etc.). Elles sont souvent utilisées en ultrafiltration et microfiltration.

➤ *membranes minérales ou inorganiques*

Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux, principalement les matières céramiques, le métal fritté et le verre. Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique.

➤ *membranes composites*

Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques, organo-minérales ou minérales;

➤ *membranes échangeuses d'ions*

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le Dessalement de l'eau et le traitement des effluents.

III.2.3.1.3. Modules d'osmose inverse

Pour être mise en œuvre, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Une enceinte résistant à la pression est toujours nécessaire. Il existe quatre types de modules.

- **Modules plans**

Les *modules plans* sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides (BERLAND & JUERY, 2002).

- **Modules tubulaires**

Technologie simple, facile d'utilisation et de nettoyage, grands consommateurs d'énergie pour une très faible surface d'échange par unité de volume. (BERLAND & JUERY, 2002).

- **Modules à fibres creuses**

Faisceau de fibres creuses de diamètre inférieur au micromètre, forte densité d'écoulement par module. (ELKHABBAZE, 2008).

- **Modules spirales**

C'est un module particulier de membranes planes qui sont enroulées autour d'un axe creux collecteur de perméat. On obtient ainsi un cylindre multicouches où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux. (ELKHABBAZE, 2008).

II.2.3.2. La pompe haute pression (HP)

Les pompes haute-pression des membranes d'osmose doivent permettre d'assurer un débit d'eau à une pression donnée de 40 à 80 bars (Figure III.5), tout en absorbant le minimum d'énergie (CORSIN & CEDRIC, 2003).



Figure II.4 : La pompe haute pression (PHP)

II.2.3.3. Le système de récupération d'énergie

Il est implicite que l'énergie utilisée pour augmenter la pression de l'alimentation des membranes en eau de mer se perd lorsque la saumure qui reste, qui est également à haute pression, doit être éliminée comme un déchet. Une manière devait être recherchée qui permettrait la réutilisation de la saumure sous pression pour récupérer de l'énergie.

On distingue trois types de récupération d'énergie :

1. Les turbopompes intégrées

Le principe de ces machines est de récupérer l'énergie de la saumure dans une turbine hydraulique montée sur le même arbre que la pompe haute pression.

Une telle turbopompe intégrée a été réalisée par la société française Guinard d'Annecy et a été mise en service dès 1981 sur une unité de Dessalement d'eau de mer de 20 000 m³/jour sur l'île de Malte.

Des systèmes analogues, mais plus performants, sont commercialisés :

- *Système HPB (hydraulic pressure booster).*
- *Système HTC (hydraulic turbo charger).*

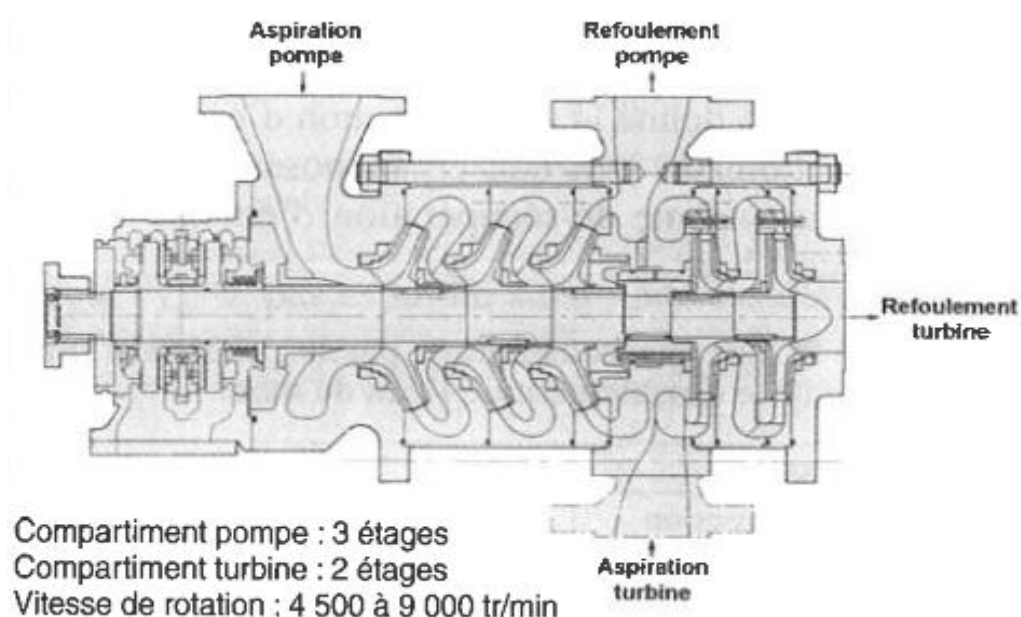


Figure II.5 : Récupération d'énergie en osmose inverse par turbopompe TPMDX Guinard (photo CEA).

2. Turbines de récupération d'énergie

Les turbines de récupération d'énergie (TRE) sont conçues et fabriquées spécialement pour la désalinisation par osmose inverse. Elles peuvent récupérer jusqu'à 90% de l'énergie hydraulique restante dans la vapeur de saumure et la convertir en puissance rotative pour les

pompes haute pression. Très efficaces et fiables, les TRE Calder ont été installées dans presque 1000 usines d’osmose inverse d’eau de mer et d’eau saumâtre, pour une capacité totale installée dépassant les 350 MW.

Le concentré (saumure) à haute pression entraîne le rotor de la TRE qui génère ensuite une puissance rotative utilisée pour aider le moteur électrique principal à entraîner la pompe haute pression. Le rotor et la tuyère de la TRE Calder sont optimisés pour convertir l’énergie cinétique du jet en énergie mécanique rotative, permettant à la turbine de fonctionner à rendement maximum. Ainsi, des moteurs plus petits et moins chers peuvent être utilisés pour entraîner la pompe d’alimentation haute pression. (Flowserve, 2015)

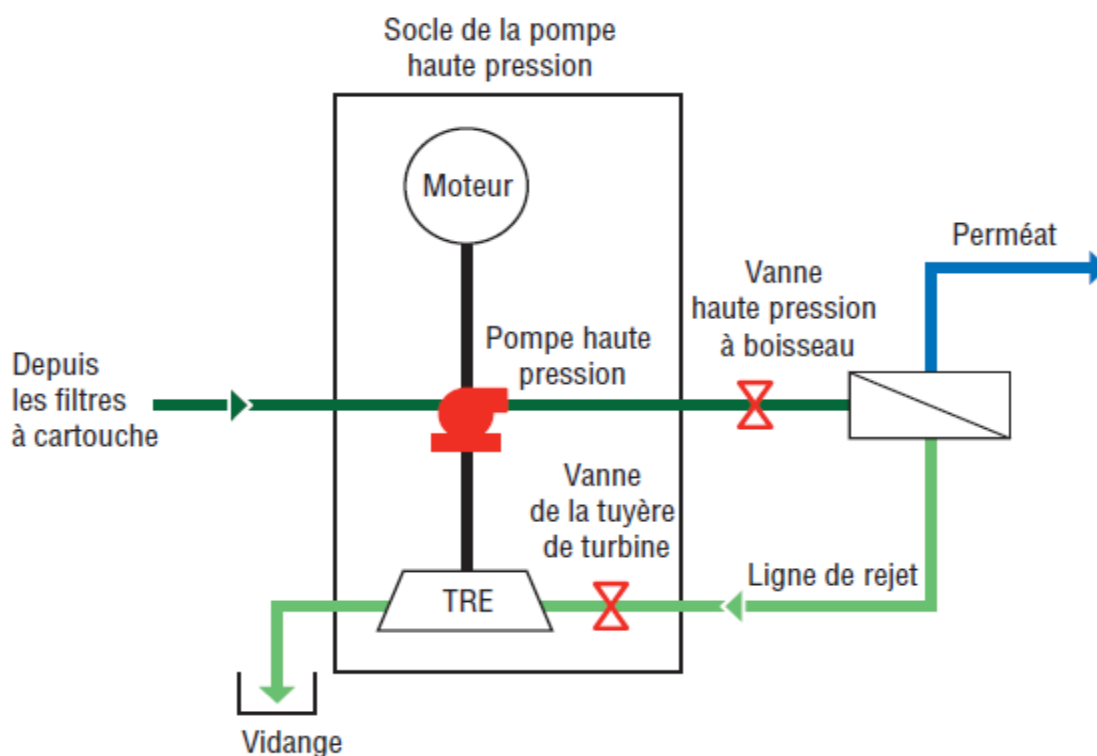


Figure II.6 : La circulation typique d’une turbine de récupération d’énergie (Flowserve, 2015)

3. Les systèmes dits « échangeurs de pression »

De façon schématique, ces systèmes peuvent être considérés comme une pompe à piston qui utilise le rejet de saumure (qui est aux environs de 60-70 bar dans le cas de l’eau de mer) pour aider le déplacement du piston (Figure II.7). Cette technologie, que l’on peut appeler de 3^{ème} génération, présente l’avantage d’avoir un rendement plus élevé (95 %) et indépendant des variations de débits.

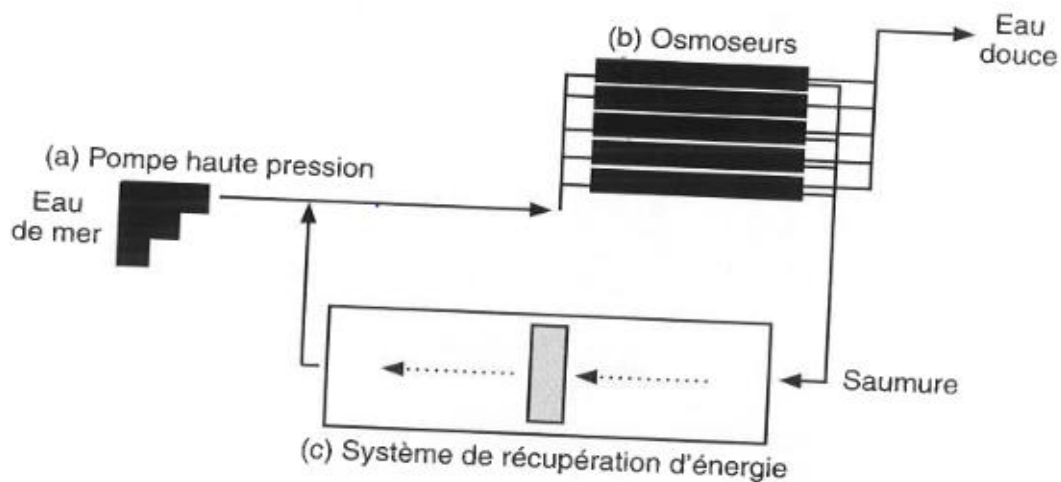


Figure II.7 : Récupération d'énergie par système à pistons «échangeurs de pression»

Plusieurs systèmes sont actuellement commercialisés :

➤ **System Energy recovery Inc. (ERI)**

Cet échangeur de pression qui est constitué d'un cylindre tournant en céramique percé de trous, fonctionne suivant le principe d'un pistolet à barillet. Un tel système a été adapté sur l'installation de dessalement d'eau de mer de 120 000 m³/jour de Fouka (Algérie) et permet d'obtenir une consommation d'énergie de 3.5 Kwh/m³ (procédé d'osmose inverse proprement dit).(Figure II.8)



Figure II.8 : Le système de récupération d'énergie (ERI) (Fouka, 2015)

➤ **The Dual Work Exchange Energy Recovery (DWEER)**

Le DWEER Calder est le dispositif de récupération d'énergie le plus efficace mis au point à ce jour. Il peut récupérer jusqu'à 98% de l'énergie du flux de la saumure de rejet, laquelle est

ensuite utilisée pour pressuriser l'eau brute et permettre une réduction allant jusqu'à 60 % de la consommation d'énergie des pompes d'alimentation haute pression.

Dans un DWEER, le débit de la pompe haute pression est égal au débit du produit plus les pertes du système. La saumure sous haute pression provenant des membranes est dirigée vers un vaisseau échangeur de travail DWEER rempli d'eau de mer qui pressurise l'eau de mer à la même pression que la saumure. (Figure II.9)

Une petite pompe de recirculation est utilisée pour égaliser la pression de l'eau de mer sortant de l'échangeur de travail avec celle de la pompe haute pression, ce qui permet de récupérer les pertes de la membrane et du système. L'eau de mer rejoint ensuite le débit de la pompe haute pression pour former le débit d'alimentation de la membrane.

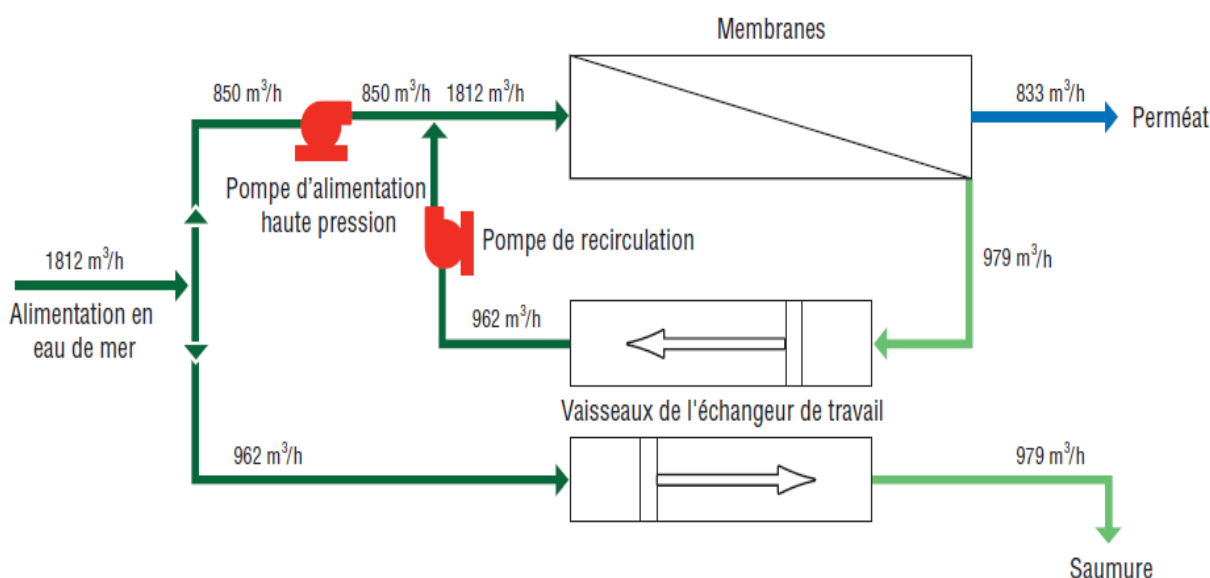


Figure II.9 : La circulation typique d'un DWEER (Flowserve, 2015)

II.2.4. Le post-traitement

Permet de rendre l'eau potable en 2 étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée).

- 1) Correction de la corrosivité : le traitement consiste à ajouter du Ca(OH)₂ ou du CaCO₃.
- 2) Désinfection finale : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine.



CHAPITRE III :

***Théories de l'analyse en
composantes principales***



III.1. Introduction

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique mathématique de l'analyse de données. Elle cherche à synthétiser l'information contenue dans un tableau croisant des individus et des variables quantitatives.

Produire un résumé d'information au sens de l'ACP c'est établir une similarité entre les individus, chercher des groupes d'individus homogènes, mettre en évidence une typologie d'individus. Quant aux variables c'est mettre en évidence des liens de liaisons entre elles, moyennant des variables synthétiques et mettre en évidence une typologie de variables. L'ACP cherche d'une façon générale à établir des liaisons entre ces deux typologies. (Kouani, 2006)

III.2. Analyse de données

Les statistiques peuvent être vues en fonction de l'objectif fixé ; classiquement les méthodes statistiques sont employées soit pour explorer les données (nommée statistique exploratoire) soit pour prédire un comportement (nommée statistique prédictive ou décisionnelle).

La statistique exploratoire s'appuie sur des techniques descriptives et graphiques. Elle est généralement décrite par la statistique descriptive qui regroupe des méthodes exploratoires simples, uni- ou bidimensionnelles (moyenne, moments, quantiles, variance, corrélation, ...) et la statistique exploratoire multidimensionnelle.

L'analyse de données s'inscrit dans ce cadre de la statistique exploratoire multidimensionnelle.

Les objectifs en analyse de données sont de répondre aux problèmes posés par des tableaux de grandes dimensions. Les objectifs sont souvent présentés en fonction du type de méthodes, ainsi deux objectifs ressortent : la visualisation des données dans le meilleur espace réduit et le regroupement dans tout l'espace.

Les méthodes de l'analyse de données doivent donc permettre de représenter synthétiquement de vastes ensembles numériques pour aider l'opérateur dans ses décisions. En fait d'ensembles numériques, les méthodes d'analyse de données se proposent également de traiter des données qualitatives, ce qui en fait des méthodes capables de considérer un grand nombre de problèmes. Les représentations recherchées sont bien souvent des représentations graphiques, comme il est difficile de visualiser des points dans des espaces de dimensions supérieures à deux, nous chercherons à représenter ces points dans des plans.

Ces méthodes ne se limitent pas à une représentation des données, ou du moins pour la rendre plus aisée, elles cherchent les ressemblances entre les individus et les liaisons entre les variables. Ces proximités entre individus et variables vont permettre à l'opérateur de déterminer une typologie des individus et des variables, et ainsi il pourra interpréter ses données et fournir une synthèse des résultats des analyses. Nous voyons donc que les deux objectifs précédemment cités sont très liés voir indissociables, ce qui entraîne souvent l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes d'analyse de données. (MARTIN, 2004)

III.3. Analyse en composantes principales

III.3.1. Définitions

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) fait partie du groupe de méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles.

Elle propose à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de m variables quantitatives pour p unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou bien de l'observation d'une population entière. Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une structure non connue à priori, sur cet ensemble d'unités de façon analogue, les représentations des variables permettent d'étudier les structures de liaisons linéaires sur l'ensemble des variables considérées. Ainsi on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent, celles qui se distinguent des autres. Pour les variables, on cherchera quelles sont celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui au contraire ne sont pas corrélées aux autres. (C. Duby, S. Robin)

i. Notion d'individu et de caractère

Individu

L'individu peut désigner selon les cas : une année d'observations ou une autre unité de temps. Il peut être défini comme étant tout élément de la population étudiée.

Un individu « i » est décrit dans un espace R^P quelconque, par le vecteur :

$$X_i = \{X_{ij} / j = 1 \text{ à } P\}$$

Le terme X_{ij} est un nombre réel qui représente la mesure de la variable X_j relevée sur l'individu i . (HAMRICHE, 1993)

Caractère

Sur un individu, on relève un certain nombre de caractères, dits aussi variables, désignant en général un paramètre intervenant dans un phénomène complexe à étudier. (HAMRICHE, 1993)

Le caractère (ou variable) " j " est décrit par le vecteur appartenant à R^N :

$$X_j = \{X_{ij} / i = 1 \text{ à } N\}$$

ii. Définition algébrique

L'analyse en composantes principales considère P variables pour lesquelles on dispose de N individus, on aura ainsi une matrice dite de données, qui résulte du croisement « $N \times P$ », on la note $[X]$ et elle décrite comme suit :

$$[X] = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{Np} \end{pmatrix}$$

Nous pouvons ensuite définir les paramètres statistiques pour chaque variable de la matrice [X] :

- **La moyenne**

$$\bar{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij}$$

\bar{X}_j : Moyenne de la j^{ième} variable

- **Variance**

$$\sigma_{X_j}^2 = \text{Var}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

Var j : variance de la j^{ième} variable.

σ_{X_j} : Écart type de la j^{ième} variable.

N : Nombre d'individus.

- **Covariance**

Le coefficient de covariance entre les variables X_j et X_k est défini par :

$$\text{Cov}(X_j, X_k) = \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)$$

- **Corrélation**

$$\text{Cor}(X_j, X_k) = \frac{\text{Cov}(X_j, X_k)}{S_j * S_k} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)}{[\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 * \sum_{i=1}^N (X_{ik} - \bar{X}_k)^2]^{1/2}}$$

Après avoir définis ces paramètres, il s'agit de remplacer la matrice de données [X] par une nouvelle matrice constituée par le croisement (individu x nouvelles variables), ces nouvelles variables sont « **les composantes principales (CP)** »,

Celles-ci (notées ici C_j) sont calculées par détermination de P relations linéaires entre les variable X_j , tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = a_{10} + a_{11}X_1 + \dots + a_{1j}X_j + \dots + a_{1N}X_N \\ C_2 = a_{20} + a_{21}X_1 + \dots + a_{2j}X_j + \dots + a_{2N}X_N \\ \dots\dots\dots \\ C_j = a_{j0} + a_{j1}X_1 + \dots + a_{jj}X_j + \dots + a_{jN}X_N \\ \dots\dots\dots \\ C_N = a_{N0} + a_{N1}X_1 + \dots + a_{Nj}X_j + \dots + a_{NN}X_N \end{array} \right.$$

C_j : $j^{\text{ème}}$ Composante Principale

X_j : Vecteur variable initiale

a_{jk} : Coefficient du système.

Notons au passage que les termes a_{j0} désignent le vecteur permettant la translation de l'origine de l'ancien repère vers le centre de gravité du nuage de points. Un centrage des données initiales annule les coefficients a_{j0} . (HAMRICHE, 1993)

Définition géométrique

L'Analyse en Composantes Principales est puissante par son support géométrique :

La méthode consiste à rechercher un premier axe qui soit le plus près possible de tous les points au sens des moindres carrés : tel que la somme des moindres carrés des distances des N points à cet axe soit minimale, ou encore la projection de ces derniers sur cet axe ait une dispersion maximale. Cet axe est appelé « axe factoriel ».

Un second axe est obtenu après projection des N points sur un hyperplan orthogonal au premier axe, tel que la dispersion des projections des N points sur celui-ci soit toujours maximale, et le processus se réitère P fois. (HAMRICHE, 1993)

III.3.2. Objectifs

L'ACP à comme objectifs finaux de :

- ✓ Fournir des outils simples et lisibles de représentation des informations traitées, permettant de faire ressortir des données brutes les éventuels liens existant entre les variables (en terme de corrélation),
- ✓ Donner des indications sur la nature, la force et la pertinence de ces liens, afin de faciliter leur interprétation et découvrir quelles sont les tendances dominantes de l'ensemble de données, entre les variables.

III.3.3. Domaine d'application

Les applications sont très nombreuses. Il y a en fait deux façons d'utiliser l'ACP :

- Soit pour l'étude d'une population donnée en cherchant à déterminer la typologie des individus et des variables. Par exemple, en hydrologie, l'ACP est utilisé dans la critique, la reconstitution et/ou la cartographie de données hydrologique, et aussi en analyses de séries chronologiques provenant de réseaux de mesures hydrométéorologiques et hydrogéologiques, et enfin l'élaboration de méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales. (BERMAD, 2004).
- Soit pour réduire les dimensions des données sans perte importante d'information, par exemple en hydrologie l'ACP intervient dans l'élaboration des bilans énergétiques en expliquant un phénomène précis, en réduisant la quantité de variables qui peuvent l'expliquer et en évitant la redondance (telle que le phénomène de l'évapotranspiration qui peut être influencé par de nombreuses variables telles que la température, l'insolation, la vitesse du vent, l'humidité...ect, l'ACP intervient ici et nous aide en prenant l'évapotranspiration comme variable à expliquer de trouver les variable explicatifs de celle-ci et d'éliminer celles qui n'interviennent pas dans le phénomène).

III.3.4. Cadre

L'analyse en composantes principales s'applique à tout tableau quantitatif où la population est constituée de « N » individus numérotés de 1 à n, ainsi que de « P » caractères quantitatifs $X_1.....X_n$, les 'individus' doivent être de même nature. Néanmoins, les caractères peuvent ne pas être homogènes, c'est-à-dire les unités de mesure peuvent être différentes.

III.3.5. Procédé d'application de l'ACP

- 1- Formation de la matrice des données brutes [X] (composée par le croisement de N individus x P variables)
- 2- Calcul des paramètres statistiques :(moyenne, écart type)
- 3- Calcul des variables centrées réduites :

$$X_{CR} = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$
- 4- Calcul des coefficients de corrélation :

$$Cor(X, X_k) = \frac{Cov(X_j, X_k)}{S_j * S_k} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - X_j) * (X_{ik} - X_k)}{[\sum_{i=1}^N (X_{ij} - X_j)^2 * \sum_{i=1}^N (X_{ik} - X_k)^2]^{1/2}}$$

- 5- Calcul des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de corrélation obtenue.
- 6- Calcul des composantes principales, avec :

CP = matrice des variables centrées réduites (NxP) x matrice des vecteurs propres (NxN).

7- Calcul des composantes principales centrées réduites

$$CP' (i,j) = \frac{CP(i,j)}{\sqrt{Vp(j)}}$$

Avec $Vp(j)$: la valeur propre correspondant à l'individu j.

8- Calcul de la matrice de corrélation entre CP' et X_{CR} ($Cor(CP', X_{CR})$)

9- Tracé des cercles de corrélation.

III.3.6. Résultats d'application

Une analyse en composantes principales fournit trois sources de renseignements, toutes nécessaires à l'interprétation : (BERMAD, 2004)

- ✓ Un tableau de vecteurs et valeurs propres.
- ✓ Un tableau de corrélation des individus avec les axes factoriels.
- ✓ Un tableau de corrélation des variables avec les axes principaux.

III.3.7. Analyse des résultats

Analyser les résultats d'une ACP, c'est répondre à trois questions :

a) Les données sont-elles en factorisation ?

Dans un premier temps, il convient d'observer la matrice de corrélation. Si plusieurs variables sont corrélées (> 0.5), la factorisation est possible. Sinon, la factorisation n'a pas de sens et n'est donc pas conseillée.

Pour tester la corrélation parfaite, il faut calculer le déterminant de la matrice. Notons que nous recherchons un déterminant petit, ce qui constitue un bon indice de l'existence de patrons de corrélations entre les variables, mais non égal à zéro.

Dans un deuxième temps, il faut observer l'indice de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) qui doit tendre vers 1. Il indique jusqu'à quel point l'ensemble de variables retenu est un ensemble cohérent et permet de constituer une ou des mesures adéquates de concepts.

Pour juger de l'indice de KMO, on peut utiliser l'échelle suivante :

- ✓ Misérable en dessous de 0,5
- ✓ Médiocre entre 0,5 et 0,6
- ✓ Moyen entre 0,6 et 0,7
- ✓ Bien entre 0,7 et 0,8
- ✓ Très bien entre 0,8 et 0,9
- ✓ Et excellent au-delà de 0.9

Enfin, on utilise le test de sphéricité de Bartlett, dont l'échelle qui peut être utilisée est :

- Si la signification (Sig.) tend vers 0.000 c'est très significatif,
- Inférieur à 0.05, significatif,
- Entre 0.05 et 0.10, acceptable
- Au-dessus de 0.10, on rejette.

Toutefois le test est très sensible au nombre de cas, il est presque toujours significatif lorsque le nombre de cas est grand. (Durand, 2005)

Combien de facteurs retenir ?

Trois règles sont applicables :

- **1ère règle :**

La règle de Kaiser qui veut qu'on ne retienne que les facteurs aux valeurs propres supérieures à 1.

- **2ème règle :**

On choisit le nombre d'axes en fonction de la restitution minimale d'informations que l'on souhaite.

- **3ème règle :**

Le « Scree-test » ou test du coude. On observe le graphique des valeurs propres et on ne retient que les valeurs qui se trouvent à gauche du point d'inflexion. Graphiquement, on part des composants qui apportent le moins d'information (qui se trouvent à droite), on relie par une droite les points presque alignés et on ne retient que les axes qui sont au-dessus de cette ligne.

b) Comment interpréter les résultats ?

C'est la phase la plus délicate de l'analyse. On donne un sens à un axe grâce à une recherche lexicale à partir des coordonnées des variables et des individus. Ce sont les éléments extrêmes qui concourent à l'élaboration des axes.

Si la variance expliquée est trop faible, on peut choisir d'exclure certaines variables. Pour choisir les variables à éliminer, on observe leur qualité de représentation : plus la valeur associée à la ligne «Extraction » est faible, moins la variable explique la variance.

Il faut également tenir compte du positionnement de chaque variable sur chaque axe. (Ludovic, 2002)

III.3.8. Représentation graphique

Une fois les résultats numériques obtenus nous passons à la représentation graphique.

a) La carte des variables

Nous pouvons représenter chaque variable par un point dont les coordonnées sont les covariances avec les CP réduites (car dans les représentations graphiques les axes sont orthonormés).

$$\text{Cov}(X_j, C_k) = (\lambda)^{1/2} * V_{k(j)}$$

Dans l'hypothèse où les variables sont bien représentées dans un plan formé par deux CP :

- La distance d'une variable à l'origine des axes est égale à sa norme (écart type).
- Le cosinus de l'angle formé par deux variables est égal à leur coefficient de corrélation.
- Deux variables fortement corrélées et éloignées l'une de l'autre possèdent une covariance élevée négative.

Si nous considérons une variable centrée réduite Y_j au lieu de la variable initiale X_j , les coordonnées de cette nouvelle variable dans le plan factoriel sont calculées par :

$$\text{Cov}(Y_j, C_i) = \text{Cov}\left(\frac{X_j}{S_j}, C_i\right) = \text{Cor}(X_j, C_i)$$

C_i : Composante principale normée ;

S_j : Ecart type de la $j^{\text{ème}}$ variable.

Comme la variance de Y_j est égale à 1, cela signifie que son point représentatif se trouve sur une sphère de rayon égal à 1. C'est pourquoi le cercle unité tracé sur chacun des plans étudiés s'appelle cercle de corrélation. La variable sera d'autant mieux expliquée, que son point représentatif se rapproche du cercle et inversement. (HAMRICHE, 1993)

La carte des individus

Nous pouvons aussi observer la répartition des individus selon les principaux axes choisis. Ainsi deux individus seront proches dans l'espace R^P , s'ils sont proches dans le plan factoriel. Dans le graphique des individus on s'intéresse aux distances inter-individus qu'on peut interpréter comme étant des ressemblances.

III.3.9. Influence des différentes transformations des variables

La matrice de corrélation (variable centrée réduite) ou de covariance (variable brute) constitue le point de départ de toute analyse en composantes principales, c'est l'une ou l'autre en effet

qui permet après diagonalisation de calculer les valeurs et les vecteurs propres, et par conséquent les composantes principales (CP).

Or la valeur du coefficient de corrélation (ou de covariance) entre les variables X_j et X_k dépend essentiellement des couples d'observations X_{ij} et X_{ik} et par conséquent toute transformation appliquée aux p variables X_j modifiera les coefficients de corrélation (ou de covariance), et de ce fait la structure même des composantes principales. (BERMAD, 2004)

b) Variable centrée

$$Y_j = X_j - \bar{X}_j$$

Avec :

X_j : Variable initiale.

\bar{X}_j : Moyenne de la variable initiale.

Y_j : Variable transformée (centrée).

c) Variable réduite

$$Y_j = \frac{X_j}{\sigma_{xj}}$$

Avec :

Y_j : Variable transformée (réduite).

X_j : Variable initiale.

σ_{xj} : Ecart type de la variable initiale ;

d) Variable centrée réduite

$$Y_j = \frac{X_j - \bar{X}_j}{\sigma_{xj}}$$

Avec :

X_j : Variable initiale.

\bar{X}_j : Moyenne de la variable initiale ;

σ_{xj} : Ecart type de la variable initiale ;

Y_j : Variable transformée (centrée réduite).

L'analyse en composantes principales peut donc être effectuée sur quatre types de variables :

- ACP sur variables brutes (sans transformation) ;
- ACP sur variables centrées ;
- ACP sur variables réduites ;
- ACP sur variables centrées réduites.

Le traitement des variables brutes et des variables centrées donne lieu à la même matrice de covariance, et par conséquent, les résultats de la diagonalisation sont identiques.

En effet, considérons la variable brute X et la variable centrée Y , et montrons que la covariance des deux variables brutes (X_j, X_k) est équivalente à celle des deux variables centrées respectives (Y_j, Y_k).

$$Y_j = X_j - \bar{X}_j \Rightarrow \bar{Y}_j = 0$$

$$Y_k = X_k - \bar{X}_k \Rightarrow \bar{Y}_k = 0$$

Or:

$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_j) * (Y_{ik} - \bar{Y}_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{ij} * Y_{ik}$$

En remplaçant chaque variable par son expression nous obtenons :

$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{ij} * Y_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k) = \text{Cov}(X_j, X_k)$$

D'où :

$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \text{Cov}(X_j, X_k)$$

Le traitement des variables réduites et centrées réduites se fait de la manière :

Soient Y_j et Z_j les variables obtenues par les transformations précédentes, montrons que la covariance des deux variables réduites (Y_j, Y_k) est égale à celle des deux variables centrées réduites (Z_j, Z_k), qui n'est autre que la corrélation entre les deux variables brutes correspondantes.

$$Y_j = \frac{X_j}{\sigma_{xj}} \implies \bar{Y}_j = \frac{\bar{X}_j}{\sigma_{xj}}$$

$$Y_k = \frac{X_k}{\sigma_{xk}} \implies \bar{Y}_k = \frac{\bar{X}_k}{\sigma_{xk}}$$

$$Z_j = \frac{X_j - \bar{X}_j}{\sigma_{xj}} \implies \bar{Z}_j = 0$$

$$Z_k = \frac{X_k - \bar{X}_k}{\sigma_{xk}} \implies \bar{Z}_k = 0$$

Evaluons maintenant les covariances des variables (Y_j, Y_k) et (Z_j, Z_k) :

$$\begin{aligned} \text{Cov}(Y_j, Y_k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_j) * (Y_{ik} - \bar{Y}_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{ij}}{\sigma_{xj}} - \frac{\bar{X}_j}{\sigma_{xj}} \right) * \left(\frac{X_{ik}}{\sigma_{xk}} - \frac{\bar{X}_k}{\sigma_{xk}} \right) \\ &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sigma_{xj} * \sigma_{xk}} \\ &= \frac{\text{Cov}(X_j, X_k)}{\sigma_{xj} * \sigma_{xk}} \\ &= \text{Cor}(X_j, X_k) \end{aligned}$$

Donc :

$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \text{Cor}(X_j, X_k)$$

$$\begin{aligned} \text{Cor}(Z_j, Z_k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{ij} - \bar{Z}_j) * (Z_{ik} - \bar{Z}_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Z_{ij}}{\sigma_{xj}} - \frac{\bar{Z}_j}{\sigma_{xj}} \right) * \left(\frac{Z_{ik}}{\sigma_{xk}} - \frac{\bar{Z}_k}{\sigma_{xk}} \right) \\ &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sigma_{xj} * \sigma_{xk}} \\ &= \frac{\text{Cov}(X_j, X_k)}{\sigma_{xj} * \sigma_{xk}} \\ &= \text{Cor}(X_j, X_k) \end{aligned}$$

Donc :

$$\text{Cov}(Z_j, Z_k) = \text{Cor}(X_j, X_k)$$

D'où :

$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \text{Cov}(Z_j, Z_k) = \text{Cor}(X_j, X_k)$$

En conclusion nous aurons deux types de variantes à appliquer :

- ✓ **ACP brute = ACP centrée.**
- ✓ **ACP centrée réduite (ou normée) = ACP réduite.**

L'ACP brute peut être utilisée pour tous les types de variables homogènes c'est à dire possédant les mêmes unités de mesure alors que l'ACP normée peut être utilisée pour des variables homogènes et hétérogènes. En effet en centrant et en réduisant la variable, on élimine le problème de l'hétérogénéité de celle-ci. (BERMAD, 2004)



CHAPITRE IV :

Applications



IV.1. Caractérisation des eaux de mer

Pour la caractérisation des eaux de mer sur la cote Algérienne une campagne de mesure a été effectuée au niveau de la zone de captage des cinq stations de dessalement illustrées dans le tableau (IV.3).

Une comparaison des résultats de mesures observés avec les normes de rejets industriels exigées par la norme Algérienne (voir Annexe 3) a été effectuée. Les résultats sont illustrés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Les ratios entre les eaux de mer naturelles et la norme des rejets.

Station	Qbrut (m3/j)	Magnésium Mg ²⁺ (Mg/l)	Chlorures Cl ⁻ (Mg/l)	Fer Fe (Mg/l)	Sulfate SO ₄ ²⁻ (Mg/l)	TDS (Mg/l)
Normes (mg/l)		300	600	5	400	37500
Capdjenet	226845,45	2,41	10,79	0,02	2,56	0,95
Fouka	266665,45	2,69	10,89	0,02	2,75	0,96
Hamma	444443,64	2,60	11,36	0,02	3,15	0,94
Mostaghanem	444443,64	2,59	10,76	0,02	2,95	0,98
Moyenne	/	2,57	10,95	0,02	2,85	0,95

On constate que :

- ✓ Le taux de salinité est normal par rapport à la norme.
- ✓ La concentration du Magnésium est plus ou moins identique dans l’eau de mer et la saumure.
- ✓ La concentration des chlorures dans la nature est 10 fois plus grande que la norme de rejet industriel.
- ✓ Une faible présence du Fer dans les eaux de mer.
- ✓ La concentration des Sulfates et du Magnésium est 3 fois plus grande que celle de la norme.

Une analyse en composantes principales a été appliquée sur cet échantillon dans le but d’une description meilleur des paramètres prépondérants pour la description des eaux de mer et pour la détermination des éventuelles relations qui puissent exister entre ces paramètres.

IV.1. 1. ACP des eaux de mer

Les tableaux et figures illustrés dans ce qui suit sont le résultat d’une ACP appliquée sur les eaux de mer.

IV.1. 1. 1. Matrice de corrélation

Le tableau IV.3 décrit la matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux de mer. En effet, on remarque certains paramètres fortement corrélés tels que la conductivité et le taux de salinité (TDS), les matières en suspension (MES) et la turbidité et le Magnésium, le titre alcalimétrique complet (TAC) et HCO₃, le Calcium et le résidu sec et le Fer.

IV.1. 1. 2. Les valeurs propres

Le tableau suivant montre la contribution en (%) de chaque axe principale dans l'explication du phénomène en question. En effet, seul les deux premiers axes (F1) et (F2) peuvent expliquer 74 % contre 26 % qui seront expliqués par les deux derniers axes (F3) et (F4) voir tableau IV.2. Une description graphique est illustrée à la figure IV.1.

Tableau IV.2 : Contribution des axes principaux pour l'ACP des eaux de mer

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	9,707	5,066	3,055	2,171
Variabilité (%)	48,537	25,332	15,276	10,854
% cumulé	48,537	73,870	89,146	100,000

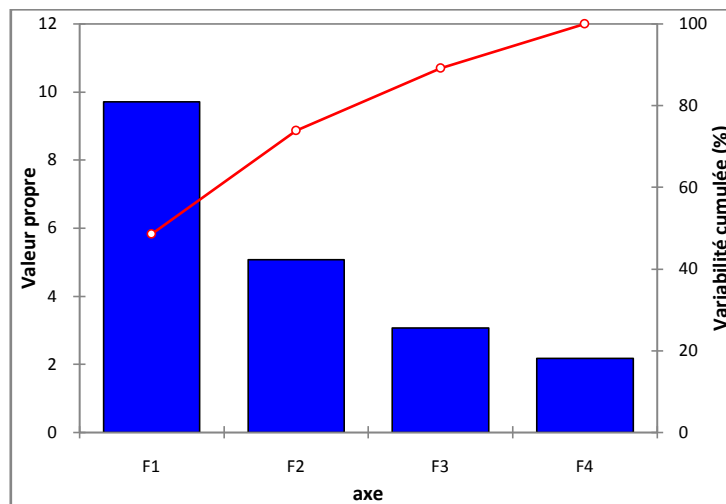


Figure IV.1 : Variation des valeurs propres par axe principale pour l'ACP des eaux de mer

Tableau IV.3 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux de mer

Station	pH	Conductivité (ms/cm)	turbidité (NTU)	TDS (g/l)	T (C°)	Nitrate NO3- (Mg/l)	TAC (°F)	Bicarbonates HCO3- (Mg/l)	TH (°F)	Calcium Ca2+ (Mg/l)	Magnésium Mg2+ (Mg/l)	Chlorures (Mg/l)	Potassium K+ (Mg/l)	Fe+++ (Mg/l)	Fe++ (Mg/l)	Sulfate SO42- (Mg/l)	Bore (Mg/l)	MES	Résidus sec (g/l)	O2 dissous (Mg/l)
Cap Djinet (Boumerdes)	8,22	56	0,32	35,7	15,7	6,33	13	130	441	381	724	6472,2	142,15	0,015	0,085	1023,4	3,81	3,3	32	0,16
Hamma (Alger)	7,8	55,4	1,08	35,2	17,8	5,9	13,5	135	560,6	200	780,9	6816	148,8	0,011	0,087	1260	3,72	4,6	30,2	0,18
Fouka (Tipaza)	7,7	56,2	1,05	36,1	15,6	5,8	13,4	134	450,3	220	807	6532	145,7	0,011	0,09	1100	3,46	4,6	30,5	0,2
Mostaghanem	7,6	56,8	0,66	36,6	18,1	5,1	13	131	442	237	776,87	6453,56	144,9	0,014	0,082	1180,1	3,51	4,08	31,1	0
Moyenne	7,83	56,1	0,7775	35,9	16,8	5,7825	13,225	132,5	473,475	259,5	772,1925	6568,44	145,3875	0,01275	0,086	1140,875	3,625	4,145	30,95	0,135

Tableau IV.4 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de mer

Variables	pH	conductivité	turbidité	TDS (g/l)	T (C°)	NO3 (Mg/l)	TAC (°F)	HCO3 (Mg/l)	TH	Ca2	Mg2	Chlorures	K	Fe3	Fe2	SO42	Bore	MES	Residus sec	O2 dissous
pH	1	-0,383	-0,636	-0,461	-0,550	0,761	-0,178	-0,304	-0,108	0,836	-0,839	-0,064	-0,568	0,457	0,017	-0,584	0,735	-0,771	0,676	0,307
conductivité	-0,383	1	-0,270	0,989	0,092	-0,431	-0,242	-0,221	-0,800	-0,009	0,008	-0,548	-0,446	0,317	-0,237	-0,353	-0,363	-0,218	0,271	-0,749
turbidité	-0,636	-0,270	1	-0,133	0,227	-0,067	0,769	0,839	0,581	-0,923	0,759	0,679	0,896	-0,968	0,638	0,471	-0,258	0,954	-0,989	0,134
TDS (g/l)	-0,461	0,989	-0,133	1	0,086	-0,413	-0,115	-0,089	-0,756	-0,131	0,104	-0,461	-0,345	0,174	-0,112	-0,337	-0,391	-0,097	0,142	-0,742
T (C°)	-0,550	0,092	0,227	0,086	1	-0,562	0,036	0,134	0,468	-0,518	0,169	0,325	0,544	-0,068	-0,446	0,745	-0,058	0,306	-0,366	-0,531
NO3(Mg/l)	0,761	-0,431	-0,067	-0,413	-0,562	1	0,489	0,366	0,098	0,331	-0,582	0,438	-0,138	-0,178	0,632	-0,618	0,813	-0,333	0,139	0,220
TAC (°F)	-0,178	-0,242	0,769	-0,115	0,036	0,489	1	0,990	0,451	-0,655	0,202	0,864	0,656	-0,889	0,872	-0,024	0,337	0,544	-0,739	-0,099
HCO3(Mg/l)	-0,304	-0,221	0,839	-0,089	0,134	0,366	0,990	1	0,495	-0,753	0,310	0,867	0,739	-0,926	0,827	0,094	0,237	0,642	-0,820	-0,118
TH	-0,108	-0,800	0,581	-0,756	0,468	0,098	0,451	0,495	1	-0,484	0,232	0,800	0,842	-0,547	0,171	0,720	0,245	0,546	-0,645	0,326
Ca2	0,836	-0,009	-0,923	-0,131	-0,518	0,331	-0,655	-0,753	-0,484	1	-0,755	-0,586	-0,878	0,834	-0,398	-0,572	0,347	-0,918	0,952	0,198
Mg2	-0,839	0,008	0,759	0,104	0,169	-0,582	0,202	0,310	0,232	-0,755	1	0,068	0,606	-0,609	0,204	0,570	-0,819	0,903	-0,746	0,244
Chlorures	-0,064	-0,548	0,679	-0,461	0,325	0,438	0,864	0,867	0,800	-0,586	0,068	1	0,795	-0,757	0,588	0,301	0,507	0,489	-0,708	-0,013
K	-0,568	-0,446	0,896	-0,345	0,544	-0,138	0,656	0,739	0,842	-0,878	0,606	0,795	1	-0,826	0,360	0,736	-0,090	0,874	-0,945	0,087
Fe3	0,457	0,317	-0,968	0,174	-0,068	-0,178	-0,889	-0,926	-0,547	0,834	-0,609	-0,757	-0,826	1	-0,803	-0,272	0,069	-0,853	0,935	-0,149
Fe2	0,017	-0,237	0,638	-0,112	-0,446	0,632	0,872	0,827	0,171	-0,398	0,204	0,588	0,360	-0,803	1	-0,335	0,223	0,419	-0,540	0,191
SO42	-0,584	-0,353	0,471	-0,337	0,745	-0,618	-0,024	0,094	0,720	-0,572	0,570	0,301	0,736	-0,272	-0,335	1	-0,371	0,636	-0,572	0,136
Bore	0,735	-0,363	-0,258	-0,391	-0,058	0,813	0,337	0,237	0,245	0,347	-0,819	0,507	-0,090	0,069	0,223	-0,371	1	-0,500	0,245	-0,138
MES	-0,771	-0,218	0,954	-0,097	0,306	-0,333	0,544	0,642	0,546	-0,918	0,903	0,489	0,874	-0,853	0,419	0,636	-0,500	1	-0,957	0,191
Residus sec	0,676	0,271	-0,989	0,142	-0,366	0,139	-0,739	-0,820	-0,645	0,952	-0,746	-0,708	-0,945	0,935	-0,540	-0,572	0,245	-0,957	1	-0,068
O2 dissous	0,307	-0,749	0,134	-0,742	-0,531	0,220	-0,099	-0,118	0,326	0,198	0,244	-0,013	0,087	-0,149	0,191	0,136	-0,138	0,191	-0,068	1

IV.1. 1. 3. Coordonnées des variables

Le tableau suivant représente la contribution de chaque paramètre physico-chimique des eaux de mer pour axe principale. On retrouve, pour l'axe (F1) qui représente 48,5% d'explication, les paramètres Calcium, Résidu sec et le Fer (Fe3) qui sont corrélés positivement par rapport à l'axe (F1) tandis que les paramètres Turbidité, MES, Potassium, TAC et HCO3 sont négativement corrélés. Pour l'axe (F2) qui représente 25,33 % de contribution, les paramètres pH, NO3, Bore sont positivement corrélés. Concernant la conductivité et le TDS se trouvent prépondérant sur l'axe (F3) qui représente 15,3 % d'explication. Le reste NO3 et O2 dissous se trouvent sur l'axe (F4) avec un (%) d'explication de 11%.

Le tableau IV.5 est représenté dans la figure IV.2 sous format graphique dans un cercle de corrélation.

Tableau IV.5 : Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux de mer dans les composantes principales

	F1	F2	F3	F4
pH	0,609	0,782	-0,136	-0,002
conductivité	0,355	-0,652	0,656	0,137
turbidité	-0,979	-0,031	0,121	-0,158
TDS	0,229	-0,643	0,724	0,097
T	-0,374	-0,458	-0,271	0,760
NO3	0,075	0,961	0,264	-0,030
TAC	-0,760	0,445	0,462	0,107
HCO3	-0,834	0,334	0,422	0,119
TH	-0,715	0,321	-0,566	0,256
Ca2	0,926	0,317	-0,179	-0,099
Mg2	-0,690	-0,548	-0,062	-0,469
Chlorures	-0,768	0,521	0,020	0,372
K	-0,966	-0,008	-0,199	0,165
Fe3	0,936	-0,186	-0,244	0,172
Fe2	-0,547	0,541	0,543	-0,336
SO42	-0,585	-0,407	-0,670	0,209
Bore	0,161	0,829	0,074	0,530
MES	-0,933	-0,268	-0,045	-0,234
Residus sec	0,995	0,082	-0,052	0,038
O2 dissous	-0,101	0,370	-0,568	-0,729

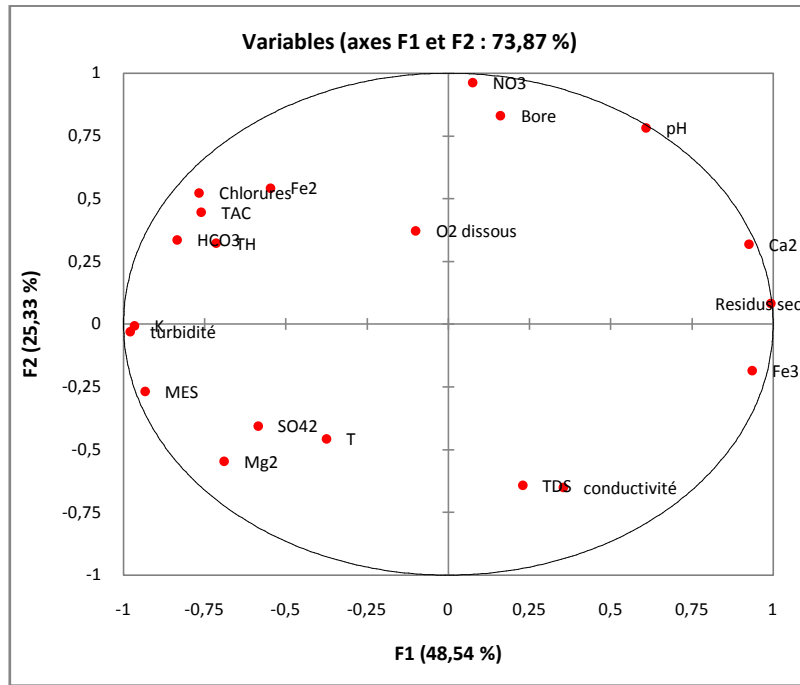


Figure IV.2 : Cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de mer.

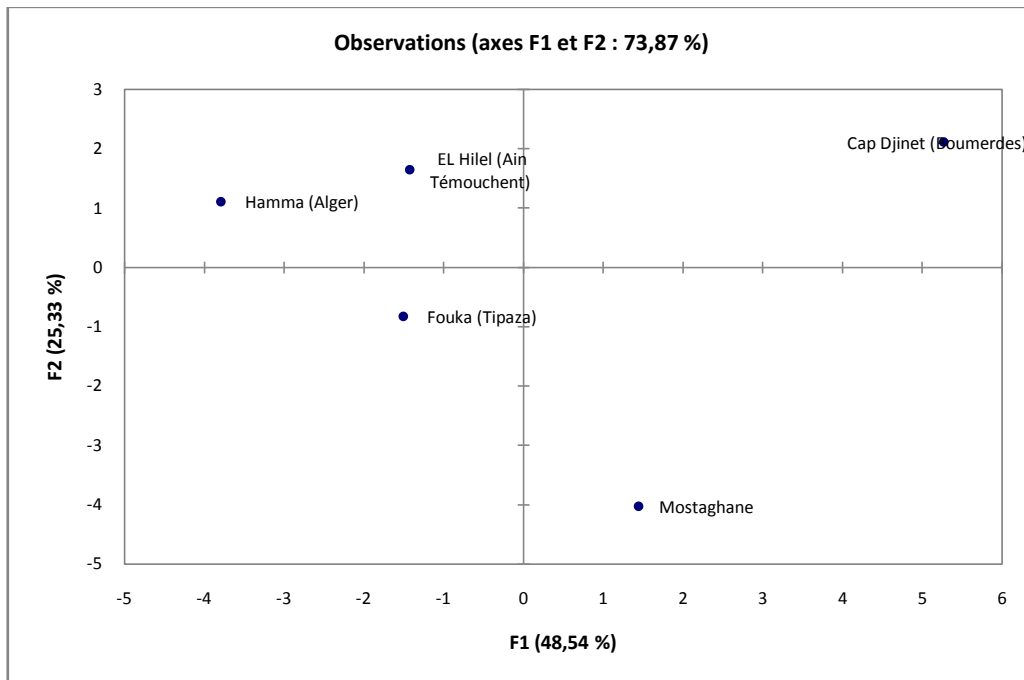


Figure IV.3 : Projection des stations sur les composantes principales de l'ACP des eaux de mer.

IV.1.1.4. Coordonnées des variables après rotation

Le tableau suivant représente la contribution de chaque paramètre physico-chimique des eaux de mer pour axe principale après rotation. On retrouve que pour l'axe (D1) qui représente 48 % d'explication, les paramètres Turbidité, Potassium, MES et le Chlorures qui sont corrélés positivement par rapport à l'axe (D1) tandis que les paramètres Fer (Fe3), Résidus sec et le Calcium sont négativement corrélés. Pour l'axe (D2) qui représente 25,8 % de contribution, les paramètres pH, NO3 et le Bore sont positivement corrélés. Par contre le Magnésium et le TDS sont négativement corrélés par rapport à l'axe principal (D2).

Tableau IV.6 : Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux de mer dans les composantes principales après rotation.

	D1	D2
pH	-0,492	0,860
conductivité	-0,444	-0,595
turbidité	0,965	-0,169
TDS	-0,318	-0,604
T	0,305	-0,506
NO3	0,061	0,962
TAC	0,815	0,333
HCO3	0,873	0,213
TH	0,753	0,217
Ca2	-0,872	0,445
Mg2	0,605	-0,640
Chlorures	0,834	0,407
K	0,955	-0,145
Fe3	-0,953	-0,052
Fe2	0,618	0,459
SO42	0,521	-0,486
Bore	-0,042	0,844
MES	0,886	-0,398
Résidus sec	-0,973	0,221
O2 dissous	0,152	0,352

IV.1.1.5. Cercle de corrélation

Nous constatons visuellement, à partir du cercle de corrélation représenté dans la figure IV.4, quatre regroupements principaux des ratios entre les caractéristiques physico-chimique de la saumure et celles du milieu marin. Le premier regroupement se positionne positivement sur l'axe (D1), avec un taux d'explication de 48%, il comporte le Fer (Fe2), Chlorures, Matières en suspension, Turbidité et le Potassium. Le deuxième groupe est positionné principalement sur l'axe (D1) de manière négative, il regroupe le Calcium, Résidus sec et le Fer (Fe3).

En ce qui concerne le troisième groupe les paramètres Sulfate, Magnésium, Conductivité et le taux de salinité sont positionnées négativement par rapport à l'axe principale (D2) avec un taux d'explication de 25,8%.

En fin, le quatrième groupe se positionne sur l'axe (D2), avec un taux d'explication de 25,8%, comporte uniquement le pH, Bore et NO₃.

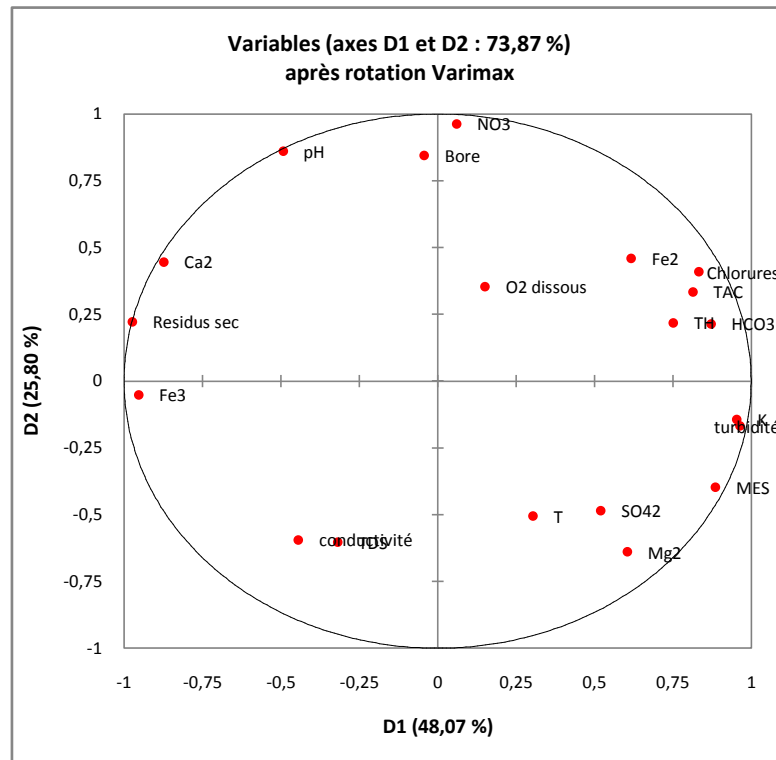


Figure IV.4 : Cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de mer après rotation.

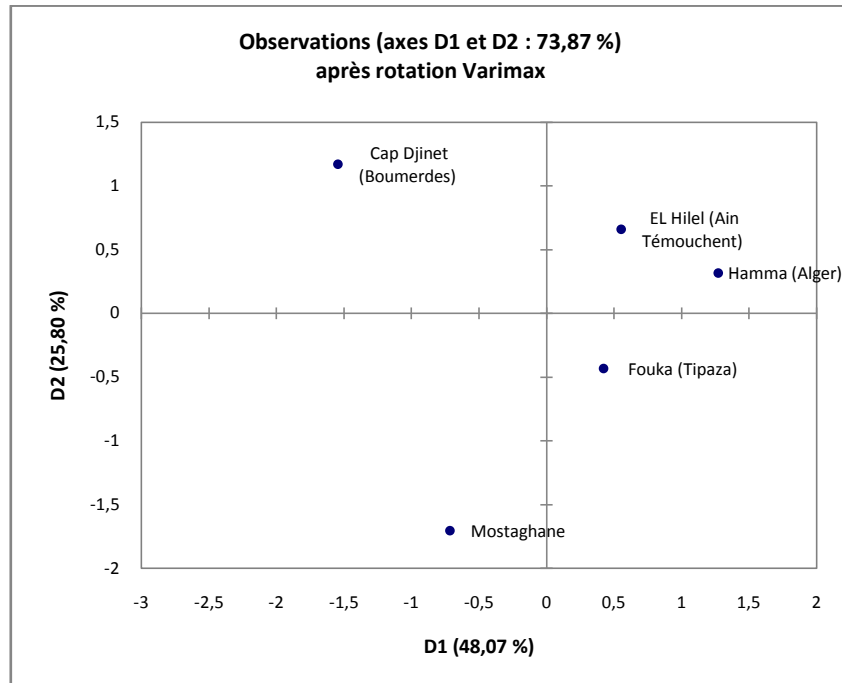


Figure IV.5 : Projection des stations sur les composantes principales de l’ACP des eaux de mer après rotation.

IV.2. Caractérisation des eaux de rejet

Pour la caractérisation des eaux de rejet (saumure) sur la cote Algérienne une campagne de mesure a été effectuée au niveau de la zone de rejet de la station de dessalement de Capdjinet Boumerdès, ou on a constaté que les concentrations des paramètres physico-chimiques de la saumure sont presque identiques pour les autres stations de dessalement avec un débit de rejet différent. Ces paramètres sont illustrés dans le tableau ci-dessous. (Voir tableau IV.8)

Pour cela, nous avons effectué le rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur les eaux de mer naturelle afin d’obtenir la variation entre ces différents paramètres.

Une analyse en composantes principales a été appliquée sur cet échantillon dans le but d’une description meilleur des paramètres prépondérants pour la description des eaux de rejet.

IV.2.1. ACP du ratio saumure sur l’eau de mer

Les tableaux et figures illustrés dans se qui suit sont le résultat d’une ACP appliquée sur le rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur les eaux de mer naturelle.

IV.2.1.1. Matrice de corrélation

Le tableau IV.10 décrit la matrice de corrélation entre le rapport entre les paramètres physico-chimiques des eaux de rejet sur l’eau de mer naturelle. En effet, on remarque certains paramètres fortement corrélés tel que le Chlorure et le Potassium.

IV.2.1.2. Valeurs propres

Le tableau suivant montre la contribution en (%) de chaque axe principale dans l'explication du phénomène en question. En effet, seuls les deux premiers axes (F1) et (F2) peuvent expliquer 84,2 % contre 15,8 % qui sera expliqué par le dernier axe (F3) voir tableau IV.7. Une description graphique est illustrée à la figure IV.6.

Tableau IV.7 : Contribution des axes principaux pour l'ACP des ratios entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer.

	F1	F2	F3
Valeur propre	4,825	1,916	1,259
Variabilité (%)	60,312	23,953	15,736
% cumulé	60,312	84,264	100,000

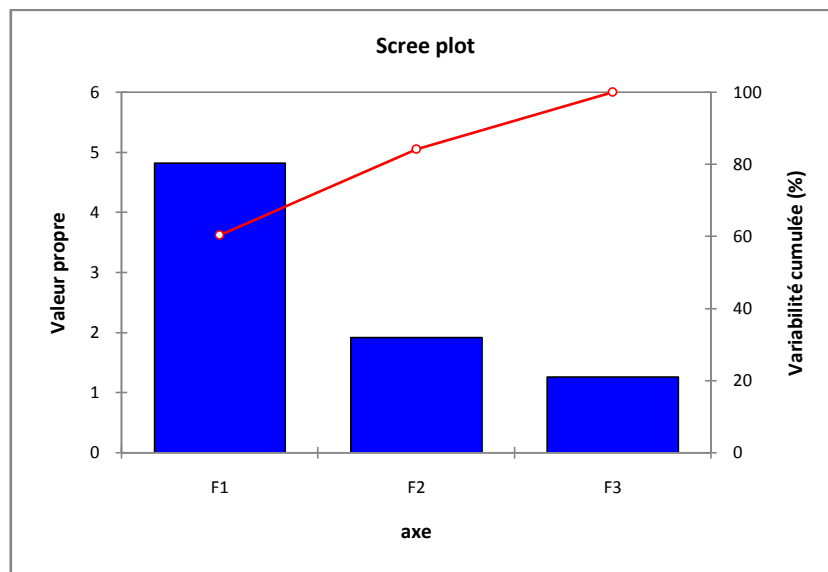


Figure IV.6 : Variation des valeurs propres par axe principale pour l'ACP des ratios entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer.

Tableau IV.8 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet

Station	Qs (m3/j)	Calcium Ca ²⁺ (Mg/l)	Magnésium Mg ²⁺ (Mg/l)	Chlorures Cl (Mg/l)	Cl_lib (Mg/l)	Cl_tot (Mg/l)	Potassium K ⁺ (Mg/l)	Fe ⁺⁺⁺ (Mg/l)	Fe ⁺⁺ (Mg/l)	Sulfate SO ₄ ²⁻ (Mg/l)	TDS (Mg/l)
Capdjenet	124765	336,66	856,11	20400	0,02	0,03	704,66	0,042	0,054	5 430	62760
Hamma	244444	336,66	856,11	20400	0,02	0,03	704,66	0,042	0,054	5 430	62760
Fouka	146666	336,66	856,11	20400	0,02	0,03	704,66	0,042	0,054	5 430	62760
Mostaghanem	244444	336,66	856,11	20400	0,02	0,03	704,66	0,042	0,054	5 430	62760

Tableau IV.9 : Les ratios entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle

Station	Qs (m3/j)	Calcium Ca ²⁺ (Mg/l)	Magnésium Mg ²⁺ (Mg/l)	Chlorures Cl (Mg/l)	Potassium K ⁺ (Mg/l)	Fe ⁺⁺⁺ (Mg/l)	Fe ⁺⁺ (Mg/l)	Sulfate SO ₄ ²⁻ (Mg/l)	TDS (Mg/l)	Cl_tot (Mg/l)
Capdjenet	124765	0,88	1,18	3,15	4,84	2,80	0,64	5,31	1,76	3,00
Fouka	146666	1,53	1,06	3,12	4,84	3,82	0,60	4,94	1,74	3,00
Hamma	244444	1,68	1,10	2,99	4,74	3,82	0,62	4,31	1,78	3,00
Mostaghanem	244444	1,42	1,10	3,16	4,86	3,00	0,66	4,60	1,71	3,00
Moyenne	/	1,42	1,1	3,16	4,86	3	0,66	4,6	1,71	3

Tableau IV.10 : Matrice de corrélation du rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle.

Variables	Ca2	Mg2	Cl_neg	K	Fe3	Fe2	SO4	TDS
Ca2	1	-0,893	-0,644	-0,540	0,842	-0,343	-0,864	0,095
Mg2	-0,893	1	0,299	0,177	-0,804	0,463	0,578	0,219
Cl_neg	-0,644	0,299	1	0,992	-0,714	0,410	0,698	-0,811
K	-0,540	0,177	0,992	1	-0,641	0,388	0,625	-0,875
Fe3	0,842	-0,804	-0,714	-0,641	1	-0,788	-0,541	0,387
Fe2	-0,343	0,463	0,410	0,388	-0,788	1	-0,081	-0,436
SO4	-0,864	0,578	0,698	0,625	-0,541	-0,081	1	-0,181
TDS	0,095	0,219	-0,811	-0,875	0,387	-0,436	-0,181	1

IV.2.1.3. Coordonnées des variables

Le tableau suivant représente la contribution de chaque paramètre physico-chimique du rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle pour axe principale.

On retrouve, pour l'axe (F1) qui représente 60,3 % d'explication, les paramètres Calcium et le Fer (Fe3) sont corrélés positivement par rapport à l'axe (F1) tandis que les paramètres Chlorures, Sulfate et le Potassium sont négativement corrélés. Pour l'axe (F2) qui représente 23,95 % de contribution, les paramètres Magnésium, TDS sont positivement corrélés. Concernant le Fer (Fe2) se trouve prépondérant sur l'axe (F3) qui représente 15,8 % d'explication.

Le tableau IV.11 est représenté dans la figure IV.7 sous format graphique dans un cercle de corrélation.

Tableau IV.11 : Contribution du rapport entre les concentrations des caractéristiques physico-chimiques des eaux de rejet sur l'eau de mer naturelle dans les composantes principales.

	F1	F2	F3
Ca2	0,867	-0,473	0,158
Mg2	-0,659	0,734	0,163
Cl_neg	-0,911	-0,370	-0,181
K	-0,855	-0,486	-0,178
Fe3	0,926	-0,192	-0,325
Fe2	-0,582	-0,071	0,810
SO4	-0,747	0,253	-0,614
TDS	0,568	0,821	-0,058

IV.2.1.4. Cercle de corrélation

Nous constatons visuellement, à partir du cercle de corrélation représenté dans la figure IV.7, trois regroupements principaux des ratios entre les caractéristiques physico-chimique de la saumure et celles du milieu marin. Le premier regroupement se positionne positivement sur l'axe (F1), avec un taux d'explication de 60,3%, il comporte le Fer (Fe3) et le Calcium (Ca2). Le deuxième groupe est positionné principalement sur l'axe (F1) de manière négative, il regroupe le Sulfate, Fer (Fe2), Chlorures et le Potassium. En fin, le troisième groupe se positionne sur l'axe (F2), avec un taux d'explication de 24%, comporte uniquement le Taux de salinité (TDS) et le Magnésium.

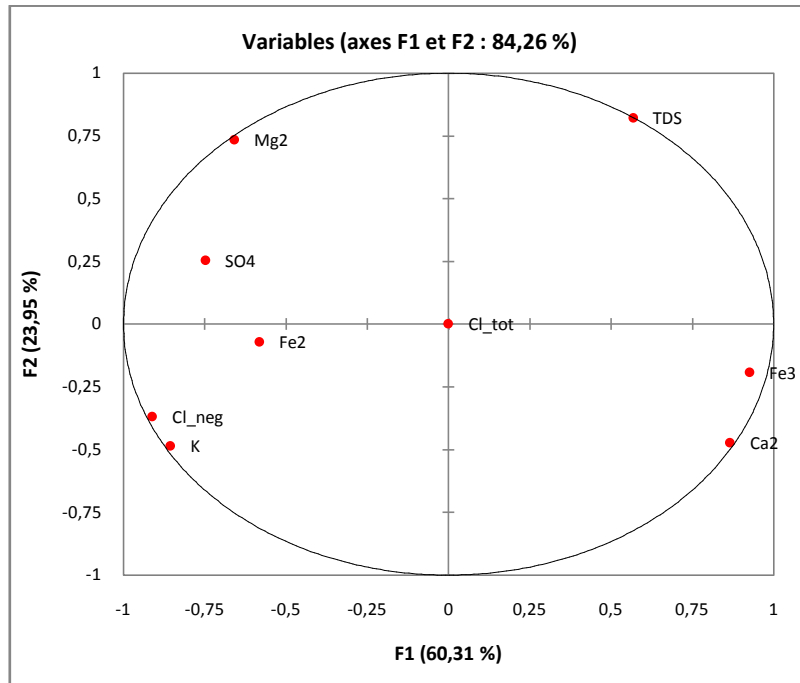


Figure IV.7 : Cercle de corrélation du rapport entre les paramètres physico-chimiques des eaux de rejet sur les eaux de mer naturelle.

On peut conclure que l'axe principale (F1) représente les résidus issus du prétraitement provenant de l'injection des doses des coagulants (Chlorure ferrique $FeCl_3 \cdot 6H_2O$; Sulfate ferrique $Fe_2 (SO_4)_3$; Sulfate d'aluminium $Al_2 (SO_4)_3 \cdot 8H_2O$).

Concernant l'axe (F2), il représente la variation du taux de salinité et le Magnésium.

Selon la figure IV.8, la station de Hamma (Alger) se trouve sur l'axe (F1) se qui nous conduit à conclure que cette station présente le cas le plus défavorable de part l'excès de résidus des paramètres chimiques issus de la phase du prétraitement avec un faible taux de salinité. Par contre, la station de Fouka qui se présente proche du centre (voir figure IV.8) présente un faible taux de résidus du processus de prétraitement et un faible taux de salinité.

Quant à la station de Capdjenet, on remarque qu'un taux de salinité relativement élevé et un résidu issu du taux de coagulant élevé.

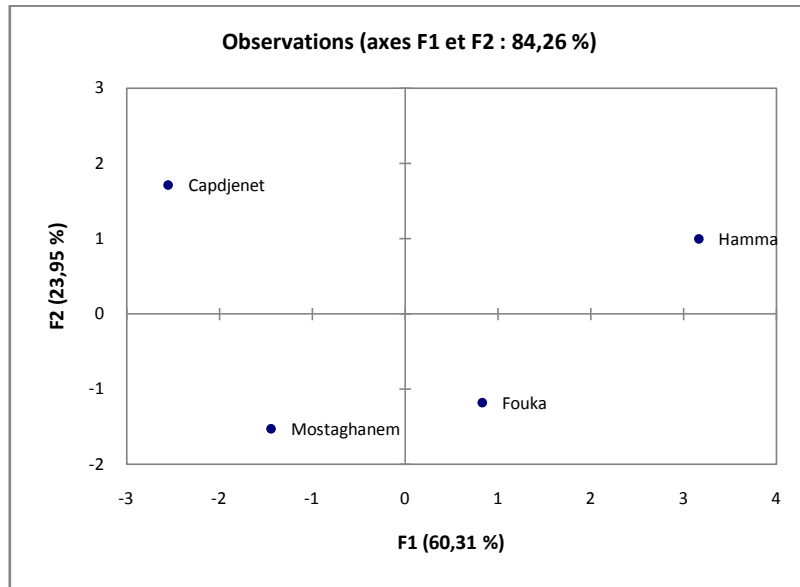


Figure IV.8 : Projection des stations sur les composantes principales de l'ACP des ratios.

Conclusion

On a établi une analyse en composantes principales sur l'échantillon d'eau de mer dans le but d'une description meilleur des paramètres prépondérants pour la description des eaux de mer et pour la détermination des éventuelles relations qui puissent exister entre ces paramètres.

D'après l'ACP appliqué sur le ratio des eaux de rejets sur l'eau de mer on a pu conclure que les paramètres physico-chimiques sont issus de l'injection des coagulants dans la phase du prétraitement.



Conclusion Générale



Conclusion générale

Les ressources en eau douce sont très inégalement réparties et ne représentent qu'environ 2,5 % du volume d'eau existant sur la Terre. Or, les besoins en eau douce sont de plus en plus importants. Une bonne partie des zones consommatrices se trouvant proches des rivages océanique, une solution intéressante consiste à dessaler l'eau de mer. Vu que l'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, la variante du dessalement de l'eau s'avère la solution convenable pour notre pays qui dispose de 1440 km de côtes sur la mer méditerranée.

Le procédé est en plein développement. Il est au cœur d'une gamme de problématiques humaines, environnementales et économiques.

Les caractéristiques des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer se modifient pendant le dessalement en fonction des méthodes de prétraitement et des procédés de dessalement. Les méthodes de prétraitement sont analogues dans les procédés par distillation et OI, mais elles sont différentes quand il s'agit d'éliminer les matières en suspension (usines OI uniquement) ou de lutter contre la corrosion et la production de mousse dans les usines à distillation.

Le procédé utilisé a une grande influence sur la salinité des effluents, qui est habituellement plus élevée dans la saumure d'OI. Outre les produits chimiques de prétraitement, on peut trouver de temps à autre dans les effluents des solutions de lavage, qui sont mélangées à la saumure. Chaque effluent a des propriétés qui peuvent se traduire par des impacts sur le milieu marin, et le rejet des effluents combinés peut avoir des effets cumulatifs ou synergiques.

Références bibliographiques

A. BERMAD (2004) « Elaboration d'une méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales». Thèse de doctorat d'Etat, ENP.

Ali Kouani, S. El Jamali et M.Talbi (2006) « Analyse en composantes principales Une méthode factorielle pour traiter les données didactiques »

A. MARTIN (Septembre 2004) « L'analyse de données » Polycoché de cours ENSIETA - Réf. : 1463,

BOYE H. (2008) .Eau, énergie dessalement et changement climatique en méditerrané .Plan bleu centre d'activité régional, conseil général du l'environnement et du développement durable.

BRGM. (2010). Quelles techniques pour quels traitement- analyse couts, bénéfiques. Rapport final. BRGM/ RP-58609-FR.

BERLAND J M & JUERY C. (2002). Le procédé membranaire pour le traitement de l'eau. Office international de l'eau (SNIDE).ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. Direction de l'espace rurale et de la foret- France.

CASTAING J. B.(2011). Procédés de traitement de l'eau de mer en conchyliculture pour la sauvegarde et le maintien de la qualité des mollusques bivalves. Thèse de doctorat. Génie des procédés. Université de Nante.

C. Duby, S. Robin « Analyse en Composantes Principales » AgroParisTech.

C. DURAND (juillet 2005), « L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité».

CHENAOUI B.(2010). Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement. Séminaire Ouargla. Université de Chlef.

CORSIN P., CEDRIC M. (2003). Les pompes hautes pression adaptées aux usines de dessalement d'eau de mer par osmose inverse, le thème du mois : les pompes, La revue : l'eau, l'industrie, les nuisances, n°265.

DUNGLAS J.(2014). Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. Groupe eau. Académie d'agriculture de France.

DEGREMENT (2005). « Mémento technique de l'eau », Lavoisier-Lexique technique de l'eau. Tome1, Paris.

EL KHABBAZE H. (2008) .Traitement des solutions modèles du lait par des membranes de nano filtration et d'osmose inverse .chimie. Thèse de doctorat. Université Mohamed v AGDAL faculté des sciences rabat, Maroc.

Flowserve (March 2015). Équipement pour systèmes de désalinisation par osmose inverse « Pompes • Dispositifs de récupération d'énergie ».

HAMRICHE (1993), « Contribution à l'étude et à la simulation des paramètres hydrométriques par l'analyse en composantes principales (ACP) », Mémoire de Projet de Fin d'Etude, ENP Alger.

J. AKRETCH (février 2004); « les prétraitements par membranes en dessalement » journée de formation, au gabés, Tunis.

Khirani S. (2007) « Procédés hydrique associant à la filtration membranaire et l'absorption », Thèse de Doctorat. Institut National des sciences appliquées de Toulouse.

Klein et al (1999) «Chemical Oceanography» .Academic Press.

Ludovic LE MOAL (2002) «L'Analyse en Composantes Principales ».

MAUREL A. (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2eme édition, TEC & doc.286p.

MANDRI Y. (2011).Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froid. Thèse de doctorat, génie des procédés université Claud bernard lyon1,n°d'ordre : CT12.

TANSAKUL C. (2009). Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Doctorat. Génie des procédés et de l'environnement Université de Toulouse.

Valiron F (1989) ; « gestion des eaux : alimentation en eau d'assainissement », presses de l'école national des ponts et chaussés, Paris.



Annexe



Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau de mer des différentes stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie

Paramètres	Unité	Station de Cap Djinet (Boumerdes)	Station Hamma (Alger)	Station Fouka (Tipaza)	Station de Mostaghane	Station EL Hilel (Ain Témouchent)
pH		8,22	7,8	7,7	7,6	7,85
conductivité	ms/cm	56	55,4	56,2	56,8	56,4
turbidité	NTU	0,32	1,08	1,05	0,66	0,95
TDS	g/l	35,7	35,2	36,1	36,6	36,3
T	C°	15,7	17,8	15,6	18,1	16,88
Ammonium NH ₄ ⁺	Mg/l	0	0	0	0	0
Nitrites NO ₂ ⁻	Mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Nitrate NO ₃ ⁻	Mg/l	6,33	5,9	5,8	5,1	6,4
TA	°F	0	0	0	0	0
TAC	°F	13	13,5	13,4	13	13,8
Bicarbonates HCO ₃ ⁻	Mg/l	130	135	134	131	137
TH	°F	441	560,6	450,3	442	467
Calcium Ca ²⁺	Mg/l	381	200	220	237	213
Magnésium Mg ²⁺	Mg/l	724	780,9	807	776,87	751,44
Chlorures	Mg/l	6472,2	6816	6532	6453,56	6779,11
Chlore libre	Mg/l	0	0	0	0	0
Chlore totale	Mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Potassium K ⁺	Mg/l	142,15	148,8	145,7	144,9	146,09
Fe ⁺⁺⁺	Mg/l	0,015	0,011	0,011	0,014	0,011
Fe ⁺⁺	Mg/l	0,085	0,087	0,09	0,082	0,091
Sulfate SO ₄ ²⁻	Mg/l	1023,4	1260	1100	1180,1	1039,8
Bore	Mg/l	3,81	3,72	3,46	3,51	3,84
MES	mg/l	3,3	4,6	4,6	4,08	4,12
Résidus sec	g/l	32	30,2	30,5	31,1	30,6
O ₂ dissous	mg/l	0,16	0,18	0,2	/	/

Les quantités journalières des différents éléments chimiques des stations de dessalement en Algérie

Station	Q _{saumure} (m ³ /j)	Ca ²⁺ (kg/j)	Mg ²⁺ (kg/j)	Chlorure Cl ⁻ (kg/j)	Chlore libre (kg/j)	Chlore total (kg/j)	K ⁺ (kg/j)	Fe ⁺³ (kg/j)	Fe ⁺² (kg/j)	So ₄ ²⁻ (kg/j)	Sels (kg/j)
Cap-djenat (boumerdes)	124765	8691.12	10733.5	1720917.3	2.495	2.495	69757.3	3.742	3.742	536763.9	3794.10
Souk tleta (telmcen)	244444	17027.9	21029.5	3371682	4.88	4.88	136671	7.33	7.33	1051646	7433542
Honaine (telmcen)	244444	17027.9	21029.5	3371682	4.88	4.88	136671	7.33	7.33	1051646	7433542
Beni saf (aintemouchent)	244444	17027.9	21029.5	3371682	4.88	4.88	136671	7.33	7.33	1051646	7433542
Arzew (oran)	47177	3286.3	40586	650725	0.943	0.943	26377	1.415	1.415	202964	1434652.5
Mactaa (oran)	611111	42569.9	52573.8	8429219	12.22	12.22	341678	18.33	18.33	2629121	18583885
Mostaghanem	244444	17027.9	21029.5	3371682	4.88	4.88	136671	7.33	7.33	1051646	7433542
Tenes (chlef)	244444	17027.9	21029.5	3371682	4.88	4.88	136671	7.33	7.33	1051646	7433542
Fouka (tipaza)	146666	10216	12617.6	2023003	2.93	2.93	82002	4.399	4.399	630986	4460113
Hamma (alger)	244444	17027.9	21029.5	3371682	4.88	4.88	136671	7.33	7.33	1051646	4460113
Skikda	124765	8691.12	10733.5	1720917.3	2.495	2.495	69757.3	3.742	3.742	536763.9	3794.10

El tarf (projetée)	124765	8691.12	10733.5	1720917.3	2.495	2.495	69757.3	3.742	3.742	536763.9	3794.10
Jijel (projetée)	124765	8691.12	10733.5	1720917.3	2.495	2.495	69757.3	3.742	3.742	536763.9	3794.10
Bejaia (projetée)	124765	8691.12	10733.5	1720917.3	2.495	2.495	69757.3	3.742	3.742	536763.9	3794.10
Oued Sebt (projetée)	124765	8691.12	10733.5	1720917.3	2.495	2.495	69757.3	3.742	3.742	536763.9	3794.10
Total	Kg/j	210386.3	296355.4	<u>41658542.8</u>	60.34	60.34	1688626	90.57	90.57	<u>69102666.6</u>	<u>62102666.5</u>
	Tan/ans	576400.8	811932.6	<u>114132994</u>	165.3	165.3	4626372	248.13	248.13	<u>189322372</u>	<u>170144291.8</u>

VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS D.EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS selon le journal officiel de la république Algérienne N° 26 (24 Rabie El Aouel 1427, 23 avril 2006)

N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
1	Température	°C	30	30
2	PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
3	MES	mg/l	35	40
4	Azote Kjeldahl	"	30	40
5	Phosphore total	"	10	15
6	DCO	"	120	130
7	DBO5	"	35	40
8	Aluminium	"	3	5
9	Substances toxiques bioaccumulables	"	0,005	0,01
10	Cyanures	"	0,1	0,15
11	Fluor et composés	"	15	20
12	Indice de phénols	"	0,3	0,5
13	Hydrocarbures totaux	"	10	15
14	Huiles et graisses	"	20	30
15	Cadmium	"	0,2	0,25
16	Cuivre total	"	0,5	1
17	Mercuré total	"	0,01	0,05
18	Plomb total	"	0,5	0,75
19	Chrome Total	"	0,5	0,75
20	Etain total	"	2	2,5
21	Manganèse	"	1	1,5
22	Nickel total	"	0,5	0,75
23	Zinc total	"	3	5
24	Fer	"	3	5
25	Composés organiques chlorés	"	5	7

PH : Potentiel d'hydrogène
 DBO₅ : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours
 DCO : Demande chimique en oxygène
 MES : Matière en suspension