



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Hydraulique
Hydraulique Urbaine

Réf. : HU 10/2019

Présenté et soutenu par :
LAKHDARI HOCINE

Le : dimanche 7 juillet 2019

Suivi qualitatif de la station de traitement des eaux par osmose inverse -In Salah- W.Tamanrasset

Jury :

Mme. MIMECHE Leila	Dr	Université de Biskra	Président
Mlle. GUERGAZI Saadia	Pr	Université de Biskra	Examineur
Mme. YUCEF Leila	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2018 - 2019

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude avant tout à dieu qui m'a aidé et m'a donné le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Mes vifs remerciements à mon encadreur de travail Madame YOUCEF Leila, professeur à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, pour la qualité de son encadrement, son orientation méthodologique, ses précieux conseils, sa disponibilité et son extrême gentillesse.

Je formule mes remerciements à Mademoiselle GUERGAZI Saadia, professeur à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, directrice du laboratoire de recherche en hydraulique de surface et souterraine (LARHYSS) à l'université de Biskra, pour la confiance qu'elle m'a donnée en m'accueillant au sein de son laboratoire.

Je remercie tout particulièrement, les membres du jury qui ont accepté de lire et de critiquer objectivement mon travail

Toute ma profonde gratitude va aux agents de la station de déminéralisation d'In Salah et tous les cadres au niveau de société COSIDER canalisation POL H28, qui m'ont facilité l'obtention des données et des informations nécessaires pour la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à exprimer toutes mes grâces et mes remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université de Biskra.

A toutes les personnes qui n'ont pas hésité un seul instant à m'encourager même avec un sourire je vous remercie de tout mon cœur

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
Que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à
Mes chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour
Ma réussite et m'ont éclairé le chemin par*

Leurs conseils judicieux.

J'espéré qu'un jour,

*Je pourrai leurs rendre un peu de ce qu'ils ont
Fait pour moi, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

Je dédie aussi ce travail à mes frères et

Tous mes professeurs qui m'ont enseigné

Et à tous ceux qui me sont chers.

Lakhdari Hocine

Résumé

L'augmentation des besoins en eau et la disponibilité de l'eau de bonne qualité demeure un challenge d'actualité, généralement pour le monde entier et particulièrement pour l'Algérie.

En Algérie, la technique de dessalement et de déminéralisation pour le traitement des eaux de mer ou les eaux souterraines surtout dans le sud algérien est devenue parmi les techniques courantes vues le manque de la disponibilité des eaux douces.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la performance de la station de déminéralisation des eaux de forage, qui alimente les villes d'In Salah et de Tamanrasset, par osmose inverse.

L'étude a été effectuée par la réalisation des prélèvements des échantillons d'eau au niveau de cinq points de la filière de traitement. Le suivi de certains paramètres physico-chimiques (le pH, la conductivité électrique de l'eau, le TH, le TAC et les concentrations en ions K^+ , Na^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-}) a montré que l'eau à la sortie de la station de traitement des eaux est de très bonne qualité en comparant les valeurs mesurées pour chaque paramètre aux normes de potabilité.

Le rendement de l'abaissement de la conductivité électrique à la sortie de l'osmose inverse dépasse 90 % avec une concentration des éléments minéraux qui nécessite une reminéralisations ultérieure.

La technique de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse est une technique de choix qui nécessite une étude sérieuse pour la généralisée dans le territoire Algérien.

Mots clés : eaux souterraines, In Salah, déminéralisation, osmose inverse, qualité physico-chimique.

ملخص

تبقى الزيادة في احتياجات المياه وتوافر المياه ذات نوعية جيدة تحديا موضعيا بالنسبة للعالم كله وخاصة بالنسبة للجزائر. إن تحلية المياه المالحة في الجزائر سواء بالنسبة لمياه البحر أو المياه الجوفية ولاسيما في الجنوب الجزائري أصبحت من التقنيات الشائعة نظرا لندرة المياه العذبة.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقدير مدى فعالية محطة تحلية المياه الجوفية التي تزود سكان عين صالح و تمنراست عن طريق التناضح العكسي (osmose inverse).

تمت هذه الدراسة بعد اخذ عينات مائية عند خمس مراحل مختلفة للمعالجة على مستوى المحطة. متابعة تغير بعض العناصر الفيزيائية و الكيميائية للمياه (الأس الهيدروجيني pH، التوصيل الكهربائي للمياه، TAC و TH و تركيز الايونات: K^+ ، Na^+ ، NO_3^- ، PO_4^{3-} ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^- و SO_4^{2-}). بين أن الماء الموجود عند خروجه من محطة المعالجة ذو نوعية جيدة للغاية من خلال مقارنة القيم المقاسة لكل عنصر مع مقاييس المياه الصالحة للشرب .

مردود تخفيض الناقلية الكهربائية عند خروج الماء من مرحلة المعالجة بالتناضح العكسي يتعدى 90% مع تركيز للعناصر المعدنية يتطلب عملية رفع درجة التمعدن.

إن تقنية تحلية المياه الجوفية عن طريق التناضح العكسي (osmose inverse). هي تقنية الاختيار التي تتطلب دراسة جادة لتعميمها عبر كامل القطر الجزائري.

كلمات مفتاحية: مياه جوفية، عين صالح، تحلية المياه، التناضح العكسي، النوعية الفيزيائية و الكيميائية .

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Sommaire.....	IV
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Liste des abréviations.....	XII

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Etude bibliographique

Chapitre I : Situation Actuelle et Future de l'eau en Algérie.

I.1. Introduction.....	03
I.2. L'eau en Algérie du nord.....	03
I.3. L'eau dans le sud Algérien.....	06
I.4. les Principaux Problèmes Hydrauliques en Algérie.....	11
I. 5. Stratégie pour augmenter le stockage de l'eau.....	13
I. 6. Conclusion.....	15

Chapitre II : Techniques de déminéralisation et dessalement des eaux.

II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition.....	16
II.2.1. Eaux saumâtres.....	16
II.2.2. L'eau de Mer.....	16
II.3. Techniques de la déminéralisation des eaux.....	17
II.4. Techniques de dessalement des eaux.....	18
II.4.1. Etapes de dessalement des eaux de mer.....	18
II.4.2. Les différents procédés de dessalement.....	18
II.4.2.1. procédés Thermiques (procédés de distillation).....	19
II.4.2.1.1. Distillation à simple effet (SED).....	20
II.4.2.1.2. Distillation à multiples effets (MED).....	20
II.4.2.1.3. Distillation avec compresseur de vapeur ou (vapor compression) (VC).....	21
II.4.2.1.4. Distillation par détente successive ou procédé «Flash» ou Distillation Multi-stage flash (MSF).....	22
II.4.2.2. Procédés à membranes.....	22
II.4.2.2.1. L'électrodialyse « ED».....	23
II.4.2.2.1. a) L'électrodialyse dite conventionnelle (ED).....	23
II.4.2.2.1. b) L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB).....	23
II.4.2.2.1. c) L'électrodialyse à membrane (EM).....	23
II.4.2.2.2. L'osmose inverse (OI).....	24
II.4.2.2.2.1. Principe de l'osmose inverse.....	24
II.4.2.2.2.2. Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	25
II.4.2.2.2.3. Les avantages et les inconvénients de l'osmose inverse.....	27
II.4.2.2.3. Nanofiltration (NF).....	28
II.4.2.2.3.1. Définition et principe.....	28

II.4.2.2.3.2. Domaine d'application de la nanofiltration.....	29
II.4.2.3. Autres procédés de dessalement.....	29
II.4.2.3.1. Echange ionique.....	29
II.4.2.3.2. Dessalement par Congélation.....	29
II.4.2.3.3. Dessalement par Distillation Solaire.....	30
II-5. Dessalement et déminéralisation des eaux en Algérie.....	30
II-6. Déminéralisation des eaux souterraines en Algérie.....	31
II.7. Conclusion.....	33

Partie expérimentale

Chapitre I : Description de la station de déminéralisation par OI

I.1. Introduction.....	34
I.2. Présentation de la Station de traitement.....	34
I.3. Description du site de la station.....	35
I.4. Description de la filière de traitement.....	35
I.4.1. Pompes d'alimentation.....	37
I.4.2. Les Filtres Multimédia (Filtres bicouches sous pression type horizontale).....	39
I.4.3. Station de pompage d'eau filtrée (Les Pompes à Basse pression).....	40
I.4.4. Filtres 5 Micron pour le Système d'Alimentation d'Osiose Inverse.....	41
I.4.5. Station de pompage Haute Pression (Les Pompes à haute pression).....	43
I.4.6. Unité d'osiose inverse.....	44
I.5. Bassin d'évaporation.....	46
I.6. Nettoyage de l'installation.....	48
I.7. Traitement chimiques.....	49
I.8. Conclusion.....	50

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction.....	51
II.2. Prélèvement des échantillons d'eau.....	51
II.3. Dosage des paramètres de la qualité de l'eau.....	53
▪ PH.....	53
▪ Conductivité.....	53
▪ Titre alcalimétrique complet (T.A.C).....	53
▪ Titre hydrométrique (TH).....	53
▪ Dosage du calcium.....	54
▪ Détermination de la teneur en magnésium.....	54
▪ Dosage des chlorures.....	54
▪ Dosage du sodium et potassium.....	55
▪ Dosage des ions SO_4^{2-}	56
▪ Dosage des ions PO_4^{3-} et NO_3^-	56
II.4. Conclusion.....	56

Chapitre III : Evaluation de la performance de la station d'osiose inverse d'In Salah

III.1. Introduction.....	57
III.2. Paramètres de qualité destinés pour le suivi.....	57
III.3. Résultats du suivi des paramètres de qualité physico-chimiques.....	58
III.3.1. Le potentiel d'hydrogène PH.....	59

III.3.2. Conductivité électrique (CE).....	59
III.3.3. Potassium (K^+).....	61
III.3.4. Sodium (Na^+).....	63
III.3.5. Nitrates (NO_3^-).....	64
III.3.6. Phosphates (PO_4^{3-}).....	66
III.3.7. Titre hydrométrique (TH).....	66
III.3.8. Calcium (Ca^{++}).....	69
III.3.9. Magnésium (Mg^{++}).....	70
III.3.10. Chlorures (Cl^-).....	71
III.3.11. Sulfates (SO_4^{2-}).....	73
III.3.12. Titre alcalimétrique complet (TAC).....	74
III.4. Résultats d'analyse de la saumure (eau à l'arrivée du bassin d'évaporation).....	76
III.5. Conclusion.....	78
Conclusions générale.....	79
Références bibliographiques.....	81
Références expérimentales.....	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 01 : Caractéristiques des stations de déminéralisation des eaux à Ouargla.....	33
Tableau 02 : Analyses physico-chimiques de l'eau brute alimentant la station de traitement.....	36
Tableau 03 : Ligne principale.....	38
Tableau 04 : Caractéristiques du filtre multimédia (filtres à sable).....	40
Tableau 05 : Pompe haute pression ligne principale.....	41
Tableau 06 : Données Techniques des filtres.....	43
Tableau 07 : Les caractéristiques des pompes haute pression ligne principale.....	43
Tableau 08 : Technologie de dessalement station à membrane (par unité).....	45
Tableau 09 : Analyses physico-chimiques de l'eau brute alimentant la station de traitement.....	58
Tableau 10 : Classification de l'eau en fonction de la valeur de la dureté totale (TH (°F))....	67
Tableau 11 : Qualité des eaux à l'entrée des bassins d'évaporation.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1: Répartition de l'eau en Algérie du nord.....	04
Figure 2: Découpage de l'Algérie du nord en quatre régions.....	05
Figure 3: Les Cinq bassins hydrographiques.....	05
Figure 4: Aquifères du bassin hydrogéologique du Sahara Septentrional.....	07
Figure 5: Coupe hydrogéologique Schématique du hydrogéologique du Sahara Septentrional.....	08
Figure 6: Carte générale du Sahara septentrional.....	08
Figure 7: Répartition de la superficie du système aquifère du Sahara septentrional(SASS)...	09
Figure 8: Répartition des points d'eau du SASS entre les 03 pays.....	09
Figure 9: Exploitation du SASS entre les 03 pays.....	10
Figure 10: Répartition de système aquifère du Sahara septentrional (SASS) Entre les 03 Pays (l'Algérie, la Tunisie et la Libye).....	11
Figure 11: Principaux problèmes hydrauliques en Algérie.....	12
Figure 12: Procédés d'augmentation de la capacité de stockage de l'eau en Algérie (Digramme résumé à partir du document Remini (2010)).....	14
Figure 13: Récapitule des procédés de dessalement.....	19
Figure 14: Distillation à simple effet.....	20
Figure 15: Distillation à multiples effet.....	21
Figure 16: Compression mécanique de vapeur.....	21
Figure 17: Distillation à détente successives.....	22

Figure 18: Principe de fonctionnement de l'électrodialyse.....	24
Figure 19: Fonction de la membrane d'osmose inverse.....	25
Figure 20: Schéma simple du procédé d'osmose inverse.....	26
Figure 21: Schéma du module de l'osmose inverse indiquant l'entrée de l'eau brute et la Sortie du perméat et de la saumure.....	26
Figure 22: Schéma du principe de la nanofiltration.....	28
Figure 23: Principe de dessalement par congélation.....	30
Figure 24: Répartition des stations de dessalement des eaux de mer en Algérie.....	31
Figure 25: Situation géographique de la station de traitement des eaux par osmose inverse à In Saleh (W-Tamanrasset).....	35
Figure 26: Schéma synoptique de la station de déminéralisation d'eau par osmose inverse...37	37
Figure 27: Les pompes D'alimentation à partir de la bache d'eau brute.....	38
Figure 28: Les Filtre multimédia au niveau de la station.....	39
Figure 29: Les 05 Pompes à Bas pression au niveau de la station.....	41
Figure 30: Les Filtres 5 Micron au niveau de la station.....	42
Figure 31: Les 05 Pompes à haut pression au niveau de la station.....	44
Figure 32: Modules de l'osmose inverse au niveau de la station.....	45
Figure 33: Bassin d'évaporation.....	46
Figure 34: Plan de situation des bassins d'évaporation.....	46
Figure 35: Disposition des bassins d'évaporation selon la concentration de la saumure.....	47
Figure 36: Plan de situation de Rejet proposé dans l'oued vers la Sebka.....	48
Figure 37: Réservoir de nettoyage l'osmose inverse au niveau de la station.....	49
Figure 38: Points de prélèvements au niveau de la station de traitement.....	52

Figure 39: pH mètre utilisé au cours des essais.....	53
Figure 40: Conductimètre utilisé pour la mesure de la conductivité des échantillons d'eau..	53
Figure 41: Détermination du TH par complexométrie à l'EDTA.....	54
Figure 42: Détermination de la concentration des chlorures (Cl ⁻).....	55
Figure 43: Spectrophotomètre à flamme utilisé pour le dosage du sodium et du potassium..	55
Figure 44 : Photomètre PALINTEST.....	56
Figure 45 : Multi paramètre photomètre HI83200.....	56
Figure 46: Valeurs du pH de l'eau mesurés au niveau de différents points de prélèvement...	59
Figure 47: Evolution de la conductivité électrique de l'eau mesurée dans différents points de la station.....	60
Figure 48: Rendement de la réduction de la conductivité électrique de l'eau des forages par l'osmose inverse pour les trois prélèvements.....	61
Figure 49: Evolution du potassium K ⁺ dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	62
Figure 50: Rendement d'élimination du potassium de l'eau des forages par osmose inverse pour les trois prélèvements.....	62
Figure 51: Evolution de la teneur du Na ⁺ dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station...	63
Figure 52: Rendement d'élimination du sodium de l'eau des forages.....	64
Figure 53: Evolution des nitrates (NO ₃ ⁻) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	65
Figure 54: Rendement d'élimination des nitrates de l'eau de forage pour les trois périodes de prélèvements.....	65
Figure 55: Evolution des phosphates (PO ₄ ³⁻) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	66
Figure 56: Evolution de la dureté totale de l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	68
Figure 57: Rendement d'élimination du TH de l'eau pour les trois périodes de prélèvements.....	68

Figure 58: Evolution du calcium dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	69
Figure 59: Rendement d'élimination du calcium de l'eau de forage par l'osmose inverse pour les trois prélèvements.....	70
Figure 60: Evolution du magnésium dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	71
Figure 61: Rendement d'élimination du magnésium de l'eau de forage par osmose inverse pour les trois prélèvements.....	71
Figure 62: Evolution du chlorure dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	72
Figure 63: Rendement d'élimination du chlorure de l'eau de forage par osmose inverse pour les trois prélèvements.....	72
Figure 64: Evolution de sulfates dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	73
Figure 65: Rendement d'élimination des sulfates de l'eau des forages par osmose inverse pour les trois prélèvements.....	74
Figure 66: Evolution du TAC dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.....	75
Figure 67: Rendement d'élimination du TAC de l'eau de forage par osmose inverse pour les trois prélèvements.....	75
Figure 68: Causes de la concentration de la saumure à la sorties des osmoseurs.....	77

Liste des abréviations

- (MED) : Distillation à effets multiples.
(MSF) : Distillation par détente à étages multiples.
(SED) : Distillation à effets simple effets.
(VC) : Distillation à compression de vapeur.
(OI) : Osmose inverse.
(NF) : Nano filtration.
(ED) : Électrodialyse.
(UV) : Ultraviolet.
OMS : Organisation mondiale de la santé.
(JORA) : Journal Officielle de la République Algérienne.
(CEE) : Comité Economique Européenne.
pH : Potentiel Hydrogène.
TAC : Titre alcalimétrique complet.
TH : Dureté totale.
(CE) : Conductivité électrique
 μs : Microsiemens.
NTU : Unité de Turbidité Néphélométrie.
(°F) : Degrés français.

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle très limitée dans les régions arides et semi-arides. Elle est très demandée (Baha et Bensari, 2014).

Selon le rapport de l'ONU (2008), plus de 1,4 milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable dans le monde, et la demande à cette ressource indispensable et irremplaçable s'accroît de plus en plus avec l'accroissement économique et démographique continu.

Dans le même rapport l'Algérie se trouve parmi les pays de l'Afrique du nord les plus menacés, elle vit dans une situation de pénurie hydrique et la situation va s'aggraver à l'horizon de 2025.

Pour palier à ce manque de ces ressources vitales, l'Algérie a adapté d'autres alternatives en investissant dans des grands projets dans le secteur de l'eau, parmi eux le recours à l'utilisation des eaux non conventionnelles, et le dessalement des eaux saumâtres et, a fortiori, de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique (Bourouga, 2015)

Le dessalement est depuis longtemps une source d'eau importante dans certaines parties de la Méditerranée. Les usines de dessalement se trouvent dans les régions ayant un climat chaud, une pluviométrie relativement faible et imprévisible et où les ressources en eau ne peuvent répondre aux demandes de pointe de la période touristique (PUNE/MAP, 2003).

Face à cette situation, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue ainsi une des réponses possibles pour s'adapter à la pénurie croissante des ressources en eau (Fathalli, 2011).

En dessalement le principal procédé membranaire est l'osmose inverse (OI) qui représente à l'heure actuelle 53 % des capacités mondiales d'eau produites par dessalement et a ainsi dépassé les procédés de distillation depuis 2001 (Zemali, 2004).

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est en développement (Amitouche, 2016 et Bourouga, 2015).

L'objectif de cette étude est d'observer l'efficacité de déminéralisation des eaux souterraines par la technique d'osmose inverse. Ceci par le suivi de la qualité physico-chimique des eaux brute et traitée au niveau de la station de déminéralisation des eaux des forages située au niveau de la ville de In Salah wilaya de Tamanrasset (Sud Algérien).

Ce mémoire vise à donner aux chercheurs, gestionnaires, ingénieurs et étudiants les vrais problèmes que connaît l'Algérie en matière de l'eau douce pour proposer des solutions de traitement, et protection et préservation de la qualité de l'eau et l'ampleur de l'efficacité des ouvrages hydrotechniques dans ce domaine.

Le mémoire se composera en deux parties principales. Chaque partie sera présentée en plusieurs chapitres.

- La première partie de ce travail sera relative à l'étude bibliographique, subdivisée en 02 chapitres :

- Chapitre I: Une étude bibliographique sur la situation de l'eau en Algérie (Actuellement et à l'avenir) sera présentée.
- Chapitre II: sera consacré à la présentation d'une généralité sur les techniques et les procédés existant à l'échelle industrielle pour le dessalement et de la déminéralisation des eaux.

- La deuxième partie du mémoire concerne l'étude expérimentale. Cette partie sera présentée en trois chapitres :

- Chapitre I : permettra de réaliser une description de la station de déminéralisation par OI.
- Chapitre II : on décrira la procédure expérimentale suivie pour la réalisation des prélèvements et des analyses physico-chimiques au niveau du laboratoire de recherche Larhyss.
- Chapitre III: ayant pour objectif de présenter et de discuter les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines brutes et traitées par la station d'osmose inverse située à In Salah. Les résultats de cette étude vont nous permettre de contrôler la performance et de suivre l'efficacité de différentes unités de la station.

Etude bibliographique



Chapitre I
Situation Actuelle et Future de l'eau en Algérie

I.1.Introduction

En Algérie, la problématique de l'eau est indissociable du développement durable dans la mesure où l'eau doit permettre de répondre aux besoins des générations actuelles sans hypothéquer, la capacité des générations futures à satisfaire les leurs Il faudrait disposer entre 15et 20 milliards de m³ par année, en réservant 70% à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante. C'est un défi titanesque lorsqu'on sait qu'on mobilise à peine au plus 05 milliards de m³ d'eau par année. La pression exercée sur ces ressources ne cessera de s'amplifier sous les effets conjugués de la croissance démographique et des politiques appliquées vis –à-vis des activités consommatrices d'eau.

Cette situation liée à la faiblesse de la ressource, aggravée par la sécheresse, impliquera ipso facto entre les différents utilisateurs des conflits sérieux qui nécessiteront inmanquablement des arbitrages malaisés pour les pouvoirs publics. (Bouainah, 2015).

Dans un tel contexte, il devient prioritaire d'établir une stratégie pour localiser, quantifier et protéger les ressources en eau de façon à pouvoir les exploiter d'une manière rationnelle et en bonne qualité.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter une synthèse sur les données existantes sur la situation actuelle et future de l'eau en Algérie.

I.2. L'eau en Algérie du nord

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'A.E.P pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau grève d'ores et déjà les efforts de développement de nombreux pays.

La pluviométrie moyenne annuelle en Algérie du nord est évaluée entre 95et100×10⁹ m³ Plus de 80×10⁹ m³ s'évaporant, 03×10⁹ m³ s'infiltrant et 12,5×10⁹ m³ s'écoulent dans les cours d'eau. Dans l'Algérie du nord, l'apport principal vient du ruissellement. Les eaux de surface sont stockées dans les barrages. En 2002, l'Algérie dispose de 52 grands barrages d'une capacité de 05,2 milliards de m³. Le reste (07,3×10⁹ m³) se déverse directement dans la mer (Figure 01) (Remini, 2010).

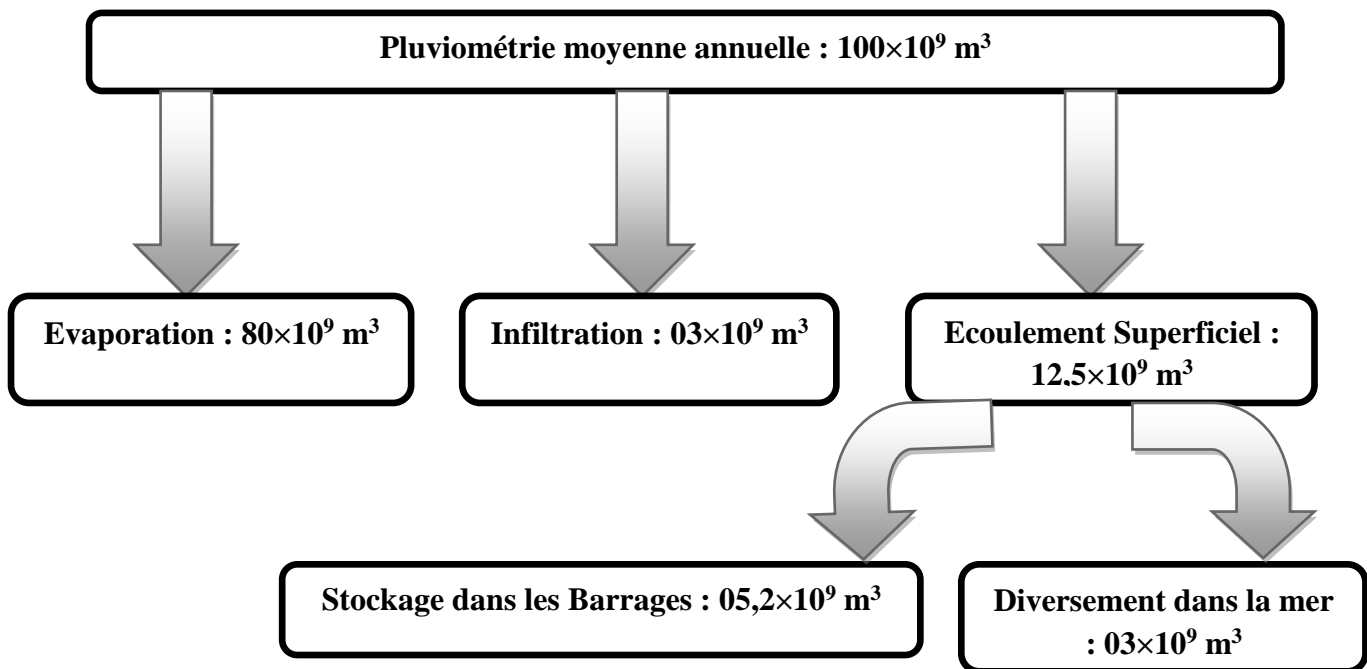


Figure 01: Répartition de l'eau en Algérie du nord (Ladjal, 2013).

Le problème de l'eau est aggravé ces dernières années par une sécheresse qui a touché l'ensemble du territoire de notre pays, et qui a montré combien il était nécessaire d'accorder la plus grande attention à l'eau.

Le découpage de l'Algérie du Nord en quatre régions repose sur les critères suivants :

- *Les caractéristiques géographiques et naturelles des régions.
- *Le groupement des bassins versants et sous bassins hydrographiques, entre lesquels existent des nécessités de transfert. Les différentes régions sont (Figure 02) (Remini, 2010).

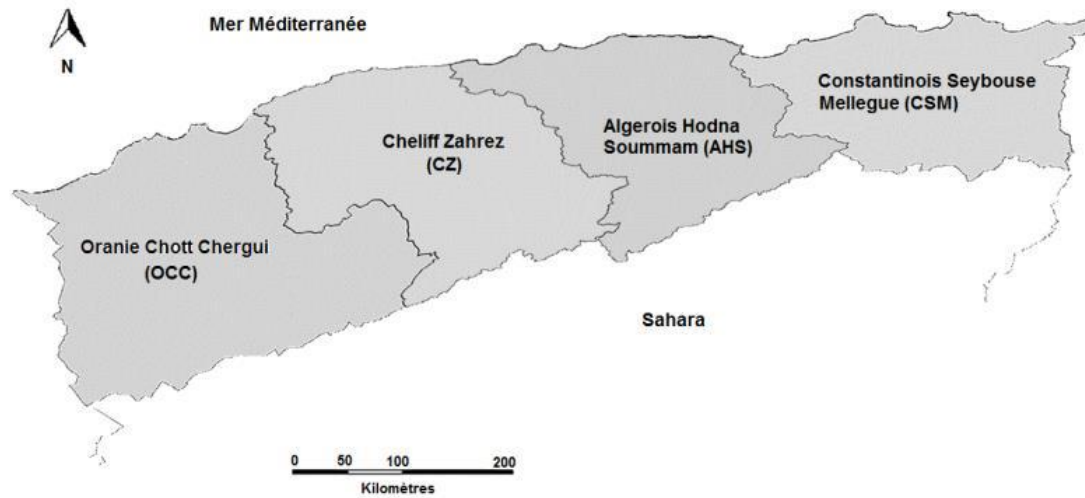


Figure 02: Découpage de l'Algérie du nord en quatre régions (Belhaouari et al, 2017).

- 1- Oranie - Chott Chergui
- 2- Chellif – Zahrez
- 3- Algérois - Soummam – Hodna
- 4- Constantinois - Seybouse – Mellegue
- 5- Sahara



Figure 03: (Les Cinq bassins hydrographiques) (Bouchedja , 2012).

I.3. L'eau dans le sud Algérien

Le sud de l'Algérie couvre 85% du territoire global du pays, avec une superficie d'environ 2 156 000 Km², et une population qui a dépassé aujourd'hui les 03 millions d'habitants. Considérée comme une zone désertique, où les précipitations sont quasi nulles, les crues sont violentes et dévastatrices, le charriage est considérable et l'érosion des berges participe au transport solide dans les cours d'eau avec un débit appréciable, le sud Algérien est constitué des wilayas suivantes : Adrar, Laghouat, Biskra, Béchar, Tamanrasset, Ouargla, Illizi, El Oued, Ghardaïa, El Bayadh, Naama et Tindouf.

Pour ce grand espace, l'essentiel de ces ressources en eau est localisé dans deux grands systèmes aquifères ; la nappe du continental Intercalaire qui est un grand réservoir d'eau fossile qui s'étend sur tout le Sahara Septentrional et la nappe du Complexe Terminal qui est un aquifère peu profond. Une étude initiée par l'UNESCO a été réalisée dans le cadre du projet ERESS (étude des ressources en eau du Sahara septentrional) en 1972 sur la nappe du continental intercalaire à l'échelle du Sahara Algéro – Tunisienne (Remini ,2010).

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes : la nappe du continental Intercalaire CI (qui est la plus étendue et la plus profonde) et celle du Complexe Terminal CT (Figure 04 et 05). Il couvre une superficie de plus de 01 million de Km², répartis entre les 03 pays (Algérie : 700000 km², Tunisie: 80000 km² et la Libye: 250000 km²) comme le montre la (Figure 07) (Fezzani ,2003).

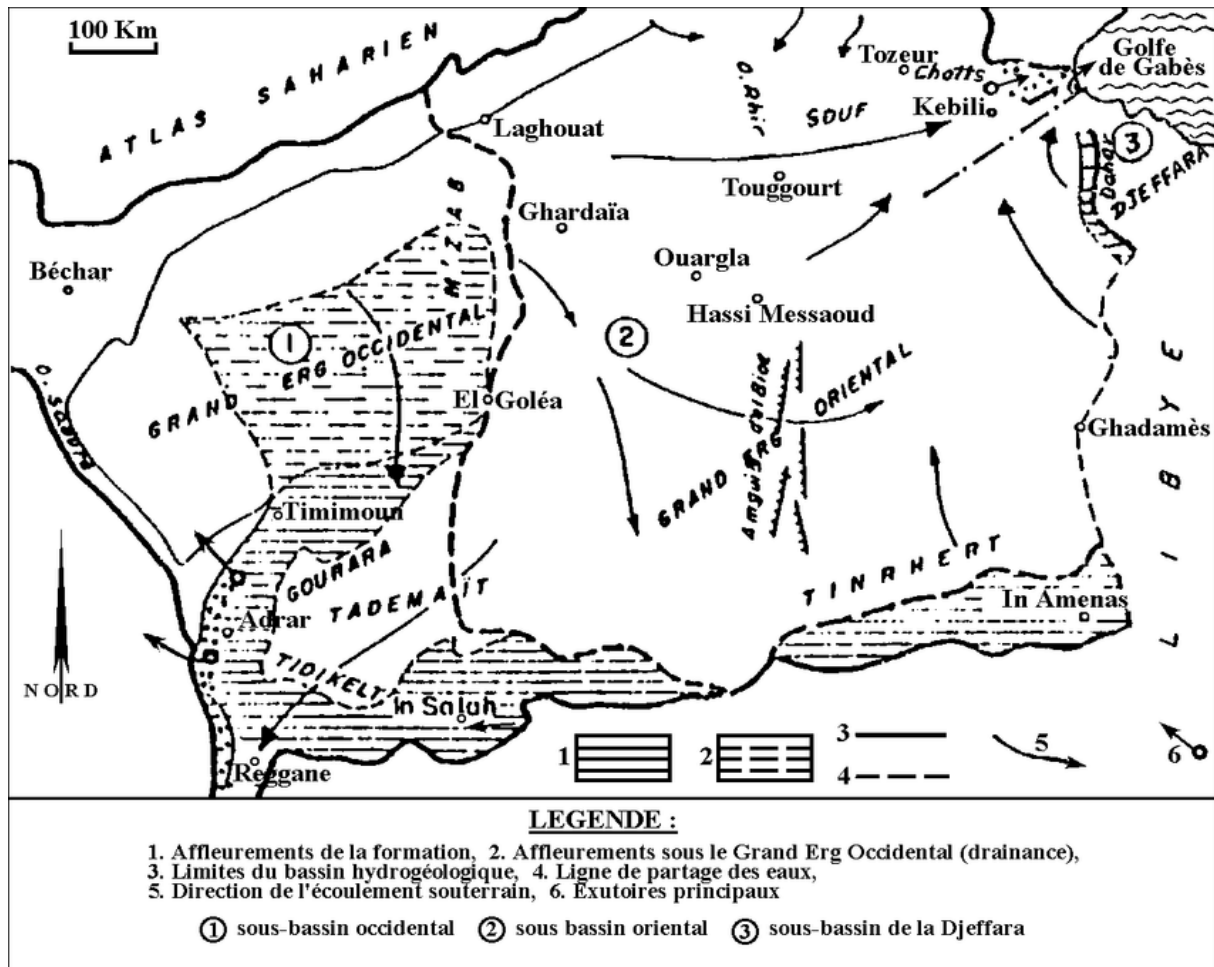


Figure 04 : Aquifères du bassin hydrogéologique du Sahara Septentrional

(UNESCO, 1972) (<http://physiogen.revues.org>).

1. affleurement de la formation hydrogéologique perméable du CI.
2. affleurement du CI sous les sables du Grand Erg Occidental (alimentation par drainante descendante).
3. zone d'émergence des foggaras.
4. limite du bassin hydrologique.
5. limite du bassin hydrologique.
6. ligne de partage des eaux souterraines.
7. grands axes de flux de l'écoulement de l'eau souterraine.

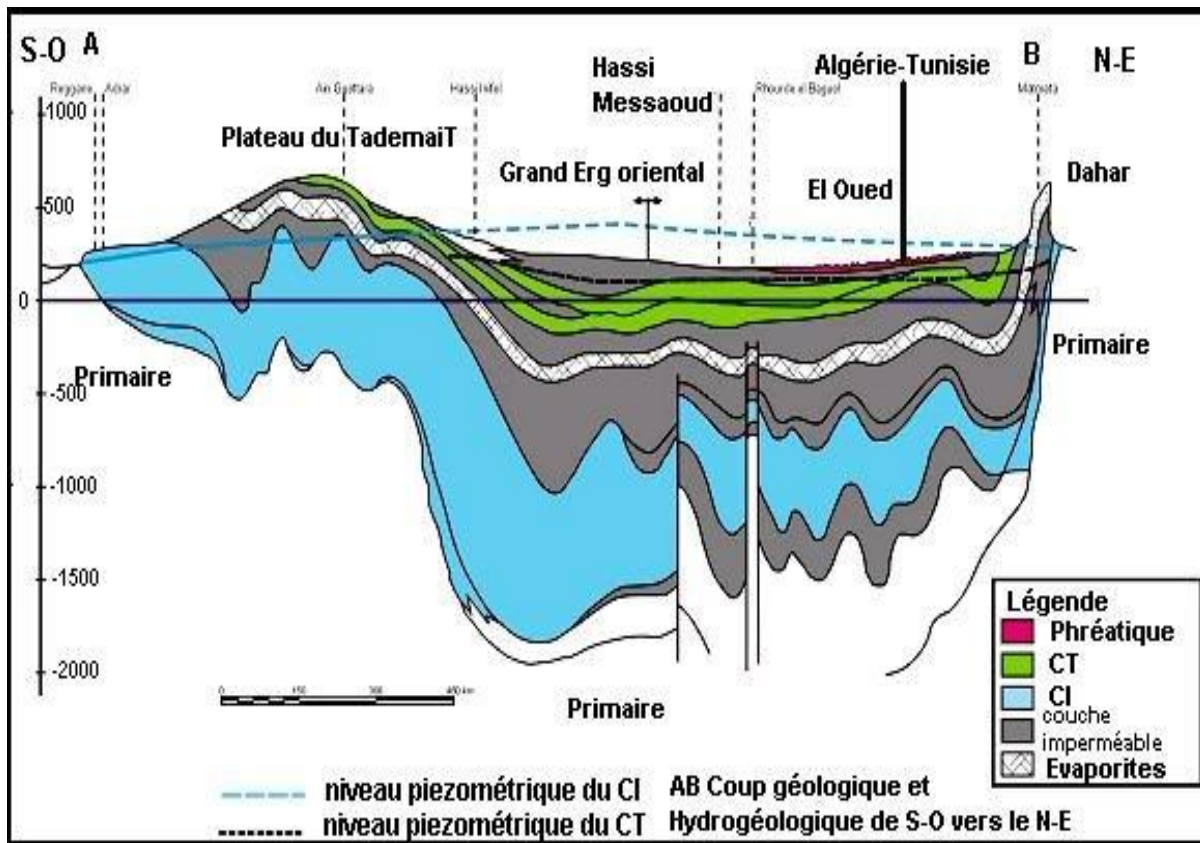


Figure 05 : Coupe hydrogéologique Schématique du hydrogéologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972) (<http://physiogeo.revues.org>).

CI. Continental Intercalaire.
 MP. Moi pliocène.
 Ss. Sénonien supérieur.
 T. Turonien à nappe d'eau salée.
 Ci. Cénomaniens argileux.
 J. Jurassique indéterminé.
 CT. Complexe Terminal.
 AB. Trace de la coupe figure.

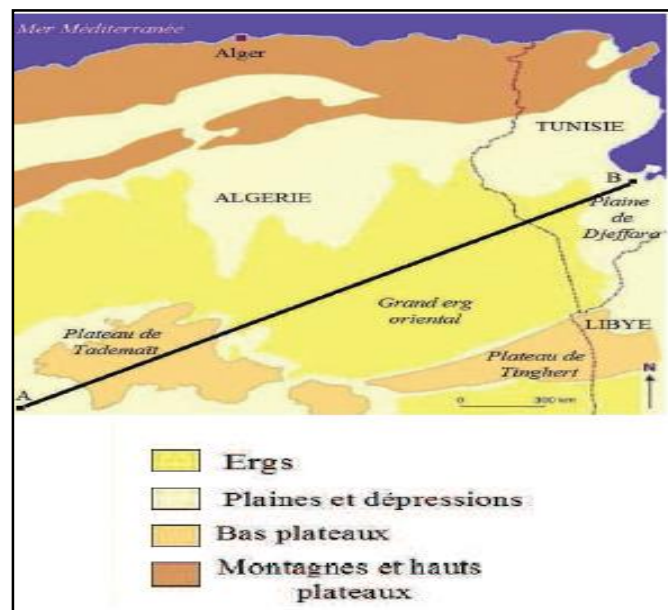


Figure 06 : Carte générale du Sahara septentrional (UNESCO, 1972) (<http://physiogeo.revues.org>).

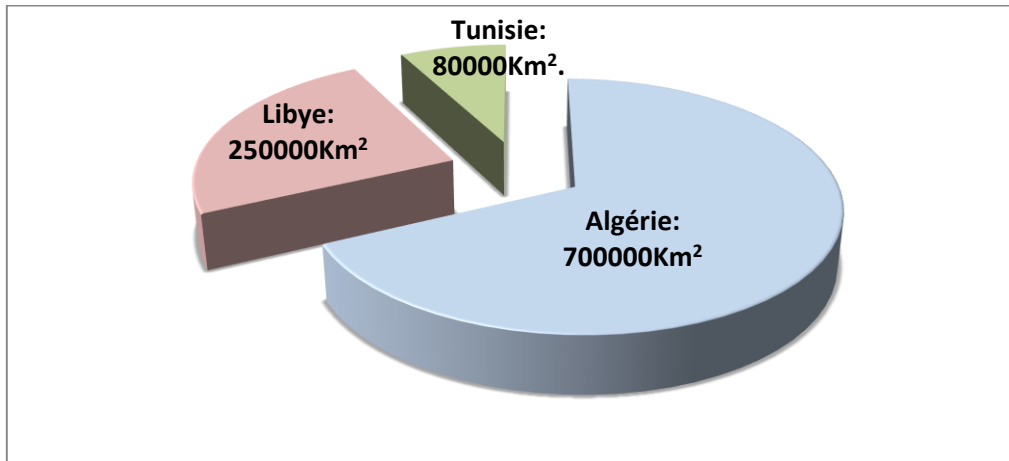


Figure 07 : Répartition de la superficie du système aquifère du Sahara septentrional (SASS),
[Source : établi selon les données de Fezzani ,2003].

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) est exploité par près de 8800 points d'eau ; foggaras et sources : 3500 au continental intercalaire et 5300 au complexe terminal.par pays, ces points répartis entre les 03 pays (l'Algérie : 6500, la Tunisie : 1200 et la Libye : 1100) (Figure 08).

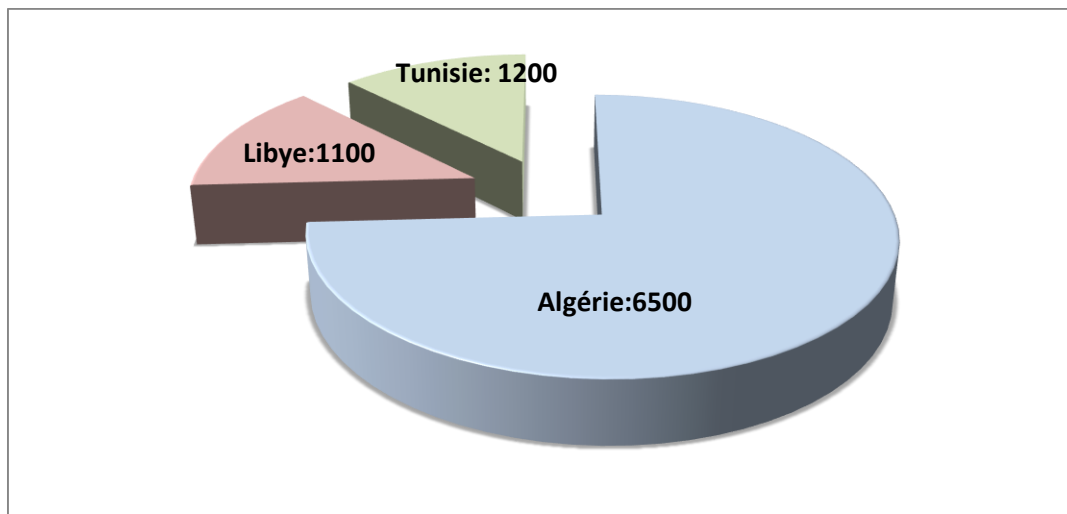


Figure 08 : Répartition des points d'eau du SASS entre les 03 pays

[Source : établi selon les données de Fezzani ,2003].

Depuis le début des années 80, le système aquifère du Sahara septentrional(SASS) est exploité grâce à la multiplication des forages profonds, le débit exploité avoisine aujourd'hui 2,2 milliards de m³/an répartis entre les 03 pays (l'Algérie : 1,33milliards de m³, la Tunisie : 0,55 milliards de m³ et la Libye: 0,33 milliards de m³) (Figure 09)

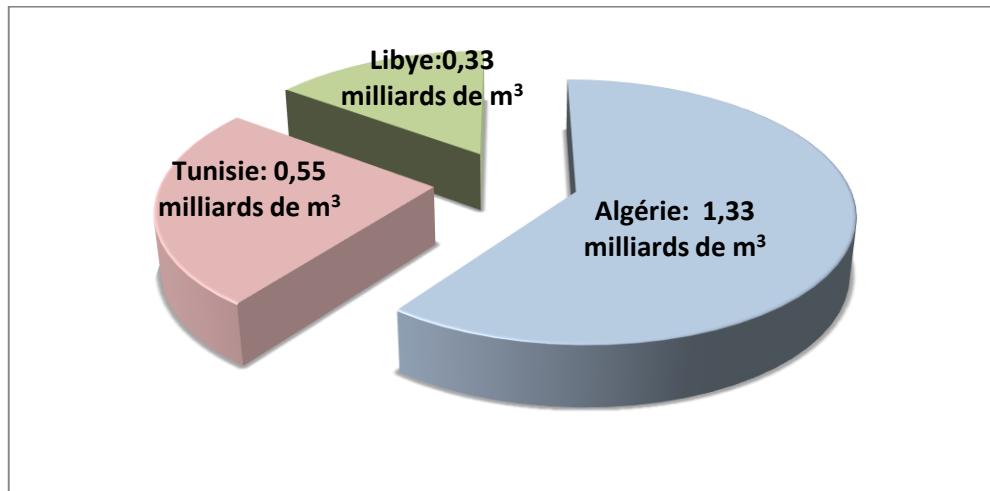


Figure 09 : Exploitation du SASS entre les 03 pays.

[Source : établi selon les données du Fezzani ,2003].

Cette forte consommation d'eau par les 03pays a été accélérée par l'évolution du nombre de forages et de leurs régimes d'exploitation, ce qui a provoqué une baisse sensible du niveau de la nappe, la disparition de l'artesianisme dans certains endroits du Sahara et l'assèchement de plusieurs foggaras. Le plus grand bassin est constitué par le Continental Intercalaire, une nappe fossile, appelée nappe albienne estimée à 60000 milliards de m³, Soit l'équivalent de 1200 fois la capacité de nos barrages actuels. Selon les Experts, ce volume est théorique et pourrait être en réalité bien inférieur. Ces eaux ne sont pas renouvelables à un rythme correspondant aux besoins. Le temps de renouvellement de la nappe albienne est estimé à 70000 ans. Cependant, l'exploitation de ces eaux est limitée par les facteurs suivants :

- Les ergs et les dunes occupent une bonne partie de l'espace saharien ;
- La profondeur des captages ;
- La salinité des eaux (Fezzani ,2003).

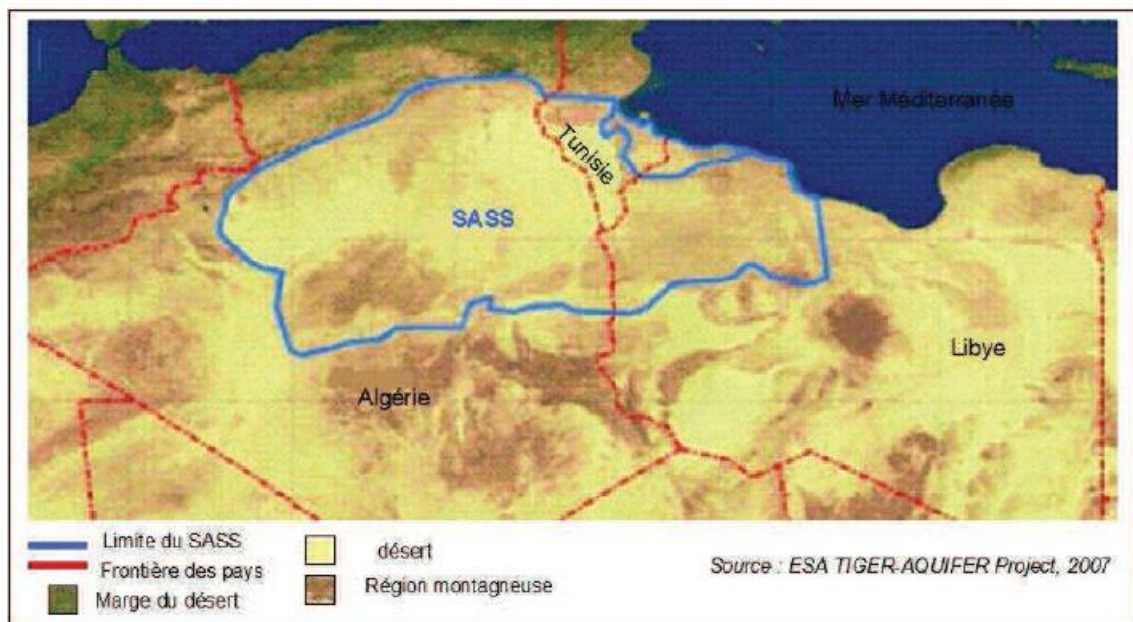


Figure 10 : Réparation de système aquifère du Sahara septentrional (SASS) Entre les 03 Pays (l'Algérie, la Tunisie et la Libye) (<http://physiogeo.revues.org>).

I.4. les Principaux Problèmes Hydrauliques en Algérie

La rareté grandissante des ressources en eau qui résulte de la diminution des quantités disponibles par habitant, la dégradation de la quantité et les objectifs de développement économique et social imposent donc l'élaboration et la définition d'une stratégie de gestion de l'eau à moyen et à long terme. Le problème de l'eau est aggravé ces dernières années de sécheresse qui ont touché l'ensemble du territoire, ont montré combien il était nécessaire d'accorder la plus grande attention à l'eau. Cette ressource vitale est menacée dans sa qualité et dans sa quantité. Malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement, l'Algérie enregistrera un déficit en eau de 01 milliard de m³ d'ici l'an 2025 (Remini, 2010). On a essayé de résumer les principaux problèmes techniques qui affectent la quantité et la qualité des ressources en eau cités par Remini (2010) dans le diagramme suivant (Figure 11).

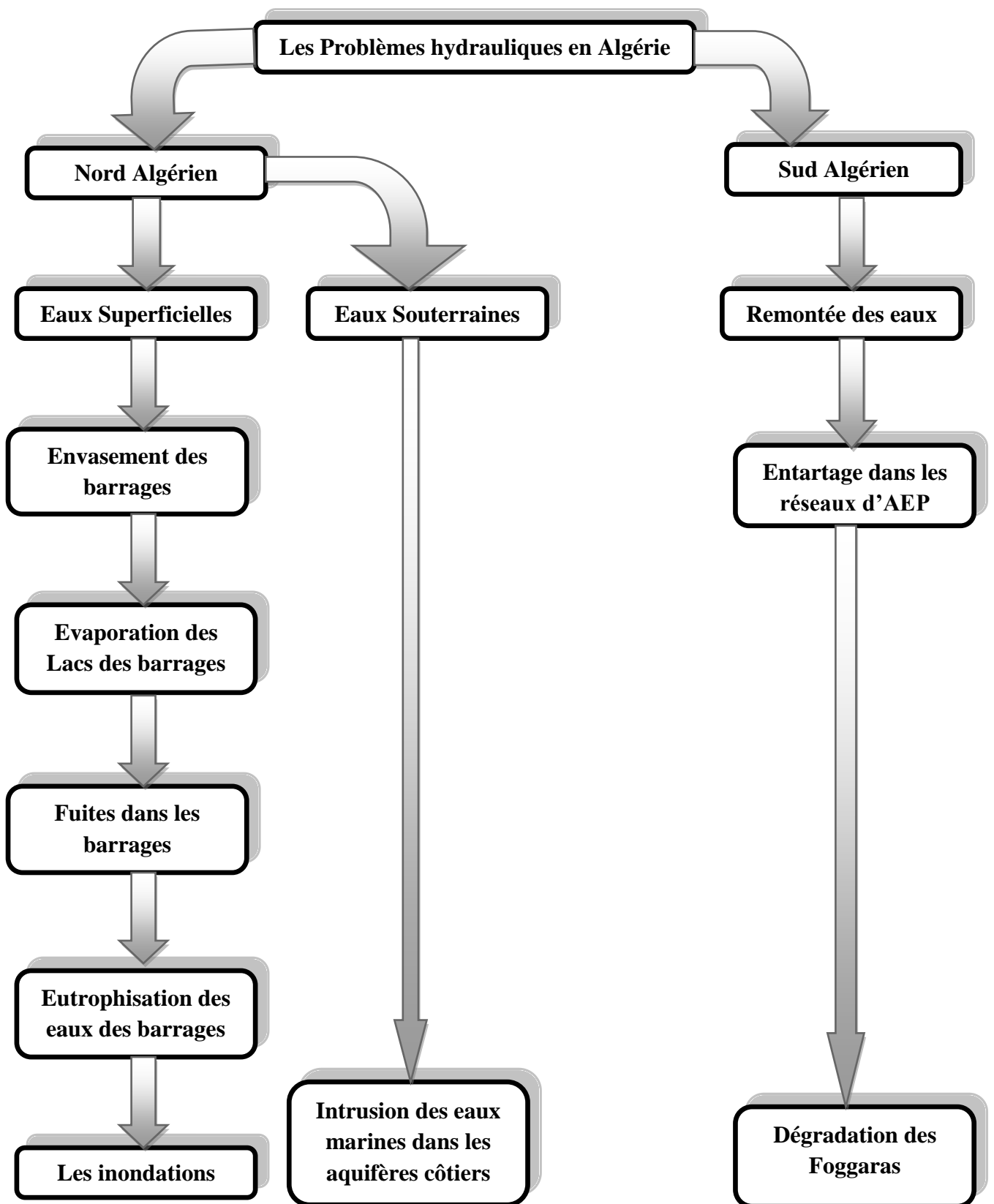


Figure 11 : Principaux problèmes hydrauliques en Algérie.
(Digramme résumé à partir du document (Remini, 2010)).

I.5. Stratégie pour augmenter le stockage de l'eau

Pour éviter de répercuter fatalement le déficit en eau d'ici l'an 2025, il faut mobiliser le maximum des ressources superficielles et souterraines, cherchant de nouvelles ressources, lutter contre les pertes et améliorer la qualité des eaux disponibles. C'est la qualité de l'eau qui est devenue un problème crucial, car depuis une trentaine d'années, cette qualité est menacée par les activités humaines. L'augmentation des besoins d'une région dans les trois grandes catégories (industrie, agriculture, particuliers) demande une planification innovatrice des ressources hydriques. Il est clair que l'Algérie enregistre d'un côté un manque énorme en ressources, au même moment où les besoins augmentent, et de l'autre côté le volume d'eau mobilisable est en diminution, et ceci est dû aux différents problèmes naturels ou humains qui touchent les sites susceptibles de capter les eaux. Partant de ce constat, Remini (2010) a proposé une série de suggestions dans le but de sauvegarder nos ressources mobilisées actuellement, tout en tentant de les augmenter au maximum, dans la mesure du possible, qui aura pour effet la baisse du déficit et le relèvement du taux de satisfaction, en ce sens que, le but est l'amélioration de la situation actuelle et future afin d'arriver au stade d'équilibre. On a essayé de résumer les propositions de Remini (2010) dans le diagramme suivant (Figure 12).

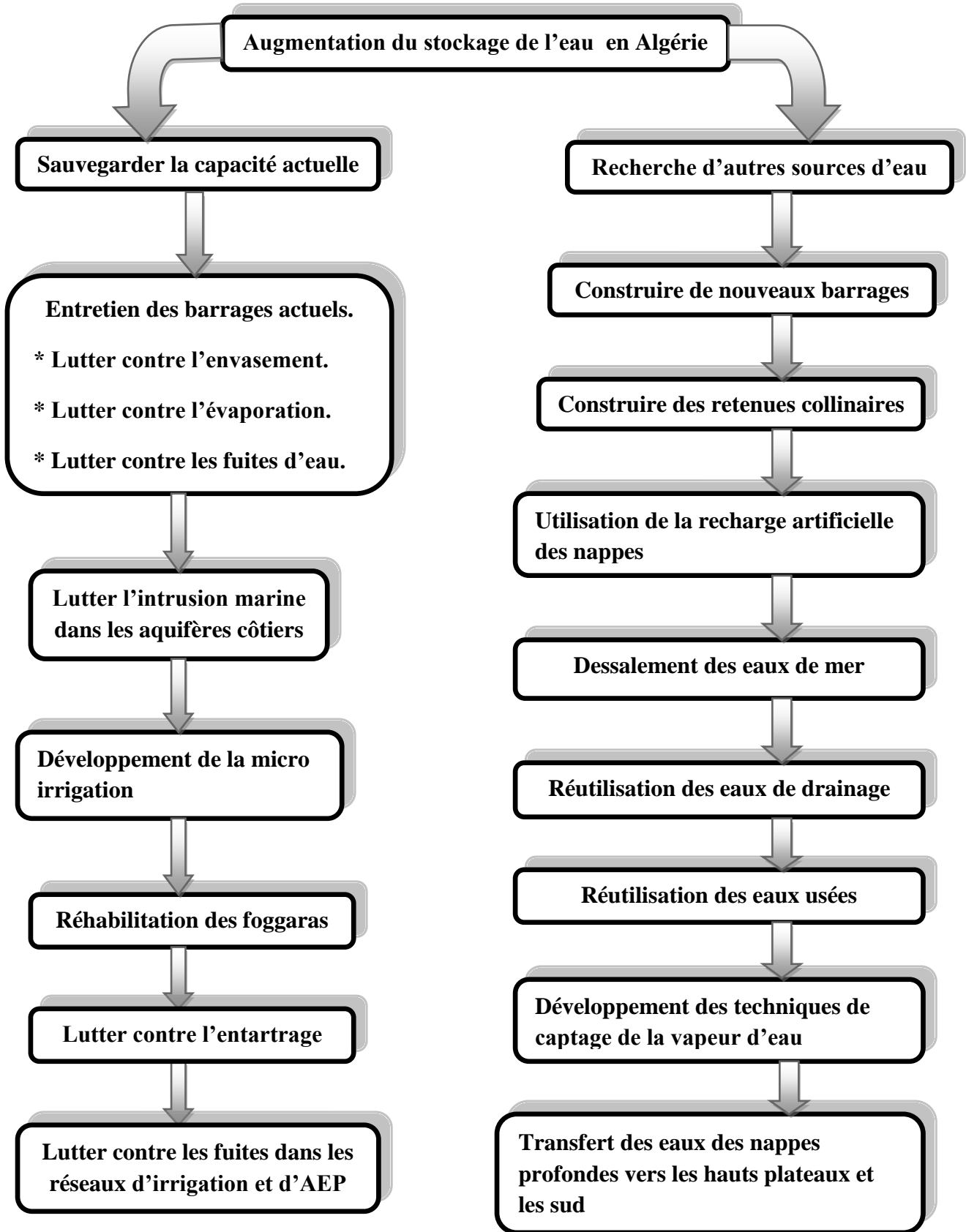


Figure 12 : Procédés d'augmentation de la capacité de stockage de l'eau en Algérie (Digramme résumé à partir du document Remini (2010)).

I.6. Conclusion

En Algérie, le secteur de l'eau fait l'objet d'une attention particulière de la part des Pouvoirs publics qui lui consacrent des moyens de plus en plus importants. La construction de nouveaux barrages, la réalisation de grands transferts régionaux et de grandes adductions urbaines et agricoles, des usines de dessalement ont permis d'augmenter nettement le volume des ressources en eau mobilisées et d'améliorer les conditions d'approvisionnement des régions et des agglomérations déficitaires.

Cependant, l'efficacité de ces efforts reste limitée parce que le service de l'eau est encore imparfait dans la plupart des villes, les irrigations dans les grands périmètres ne progressent pas et les pollutions menacent les nappes souterraines dans plusieurs zones. De plus, des volumes importants sont perdus dans les réseaux de distribution d'eau urbaine et les réseaux d'irrigation sont vétustes ou mal entretenus.

Toutes ces défaillances traduisent une maîtrise insuffisante dans la gestion des ressources hydrauliques du pays. Une politique de gestion de la demande en eau qui permettrait de contrôler, réduire et ajuster les consommations à ce qui est nécessaire, tout en luttant contre les pertes et les gaspillages, s'avère ainsi un impératif.



Chapitre II
Techniques de déminéralisation
et dessalement des eaux

II-1.Introduction

L'évolution que connaît l'environnement urbain et industriel pose, dans de nombreux pays, le problème de l'eau. Le prélèvement global de l'eau, en additionnant les usages domestiques, industriels et agricoles, est de 250 m³ par an et par habitant. En moyenne mondiale. Par ailleurs il est certain que nos besoins en eau ne cesseront de croître alors que les réserves en eau de bonne qualité diminuent (Tata, 2009).

Le dessalement d'eau de mer et la déminéralisation des eaux saumâtres résoudraient en effet de nombreuses difficultés de pénuries d'eau que connaissent beaucoup de pays.

Ainsi au cours de ce chapitre on va donner une synthèse sur les procédés existant à l'échelle industrielle pour le dessalement et de la déminéralisation des eaux.

II-2.Définitions

II-2.1.Eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 01 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO₃, le CaSO₄, le MgCO₃, et le NaCl (Senhadji, 2017).

II-2.2.L'eau de mer

Les eaux de mers sont une source d'eau brute qu'on utilise que lorsqu'il n'y a pas de moyens pour s'approvisionner en eau douce. Les eaux de mers sont caractérisées par leur concentration en sel dissous c'est ce qu'on appelle leur salinité. La salinité de la plus part des eaux de mers varie de 33000 à 37000 mg/L (Raymond Desjardins, (Janvier 1990)).

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est –à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne de l'eau de mer est de l'ordre de 35g / l, cependant cette valeur varie fortement selon les régions et la saison : Mer Baltique : 17g / l¹, Atlantique et Pacifique : 32à 35g.l¹, Mer méditerranée : 38 à 40 g.l¹, Mer Rouge : 43à 45g.l¹, Mer morte : 270 g.l¹ (Degrémont Suez, 2005).

II-3. Techniques de la déminéralisation des eaux

L'eau déminéralisée est très utilisé dans les différentes activités lié à la vie quotidienne des citoyens telle que les eaux destiné pour l'alimentation des réseaux en eau déminéralisée post traité (eau potable) dont la concentration des sels dissous varie de 200 à 500 ppm ou les eaux des chaudières ayant une valeur en sels dissous inférieur à 200 ppm et qui sont utilisées l'industrie chimique, pharmaceutique et agroalimentaire.

Il existe plusieurs méthodes physiques permettent l'obtention de l'eau déminéralisée à partir de l'eau de mer et de l'eau saumâtre (Dahmani, 2017).

Les eaux très chargées en sels minéraux dissous peuvent présenter des inconvénients dans certains usages. Ainsi, souvent on est appelé à éliminer totalement ou partiellement certains ions gênants tel que : Ca^{2+} et Mg^{2+} (dureté) : CO_3^{2-} et HCO_3^- (alcalinité) ou SO_4^{2-} (agressivité) Ces techniques ne sont utilisées en générale que si les ressources conventionnelles sont insuffisantes, et servent surtout d'appoint.

Pour l'élimination de ces sels minéraux on utilise:

- L'échange ionique.
- La distillation.
- Les procédés membranaires (Zitouni, 2013).

A la tête des stations de déminéralisation des eaux on trouve essentiellement une étape de prétraitement visant à éliminer les colloïdes les bactéries, les macromolécules et les sels bivalents.

II-4. Techniques de dessalement des eaux

Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou plus rarement 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 (Kameche et Madani, 2017).

L'eau de mer contient en moyenne 35g/l de sels qui sont essentiellement des chlorures de sodium (76%) et de magnésium (11%), des sulfates de magnésium (5%), de calcium (3,5%) et de potassium (2,4%). Dans l'eau, Les sels sont sous forme d'anions chlorures et sulfates Parallèlement aux cations sodium, magnésium, calcium et potassium (Ahmouda et Biala, 2016).

II-4. 1. Etapes de dessalement des eaux de mer

Le processus de dessalement d'eau de mer se fait en quatre étapes :

- la captation de l'eau de mer
- le prétraitement
- Les différents procédés de dessalement
- le post traitement ou minéralisation (Maurel, 2006).

II- 4.2. Les Différents procédés de dessalement

Il existe de nos jours, deux procédés de dessalement des eaux de mer, chacun comprend plusieurs techniques qui sont (Figure13) :

- ▶ Procédé de distillation à simple effet, distillation à multiples effet à tube horizontaux arrosés, distillation flash, et distillation par compression de vapeur.
- ▶ Procédé à membranes électrodialyse, l'osmose inverse.

Les techniques les plus utilisées sont la distillation flash et l'osmose inverse. La(Figure13) illustre les procédés de dessalement disponibles sur le marché (Mandri, 2011).

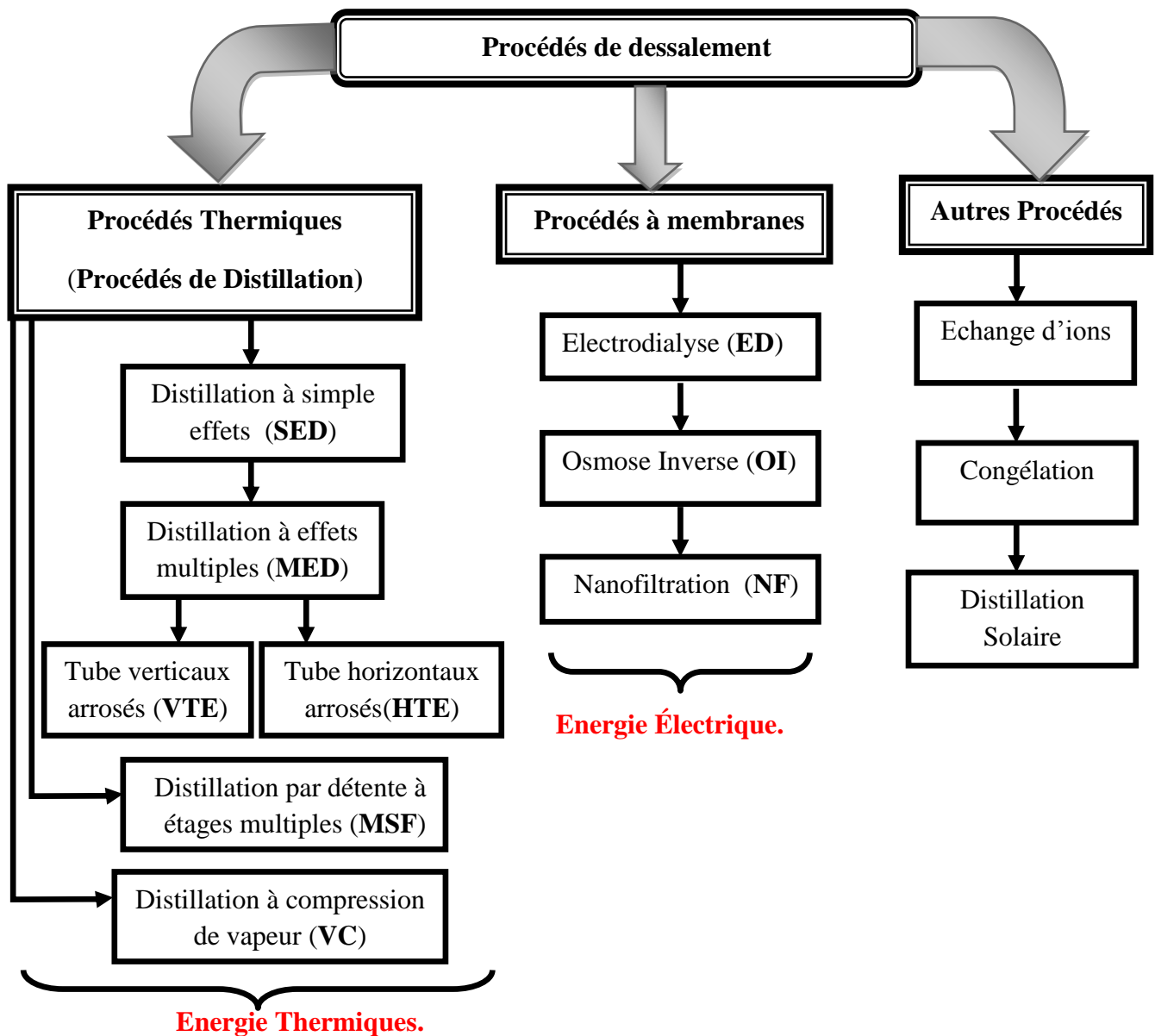


Figure 13: Récapitule des procédés de dessalement.

II-4.2.1. Procédés Thermiques (Procédés de distillation)

Le procédé par distillation consiste à chauffer de l'eau salée avec production de la vapeur d'eau qui à son tour, se condense pour former de l'eau douce. L'eau est chauffée jusqu'à l'ébullition pour produire la quantité maximale de vapeur.

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

II- 4.2.1.1. Distillation à simple effet (SED)

Ce procédé est mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable. Son principe est simple. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer (figure 14). La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure (Danis, 2003).

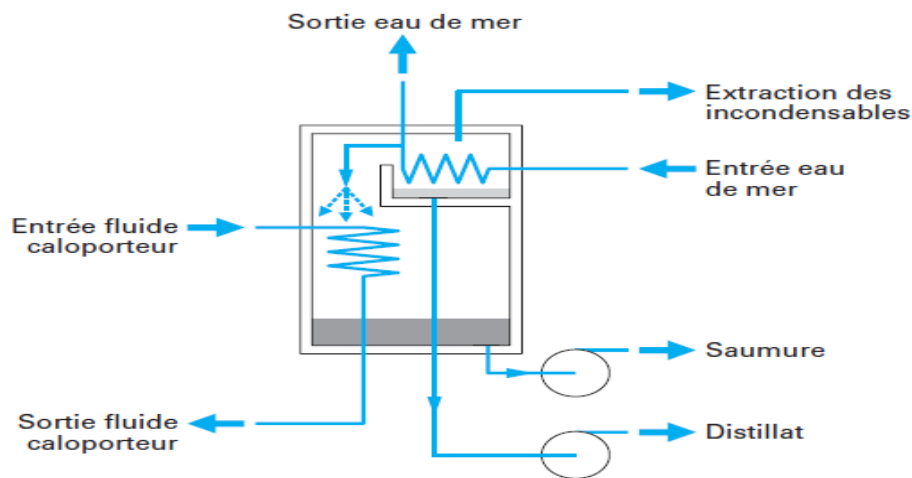


Figure 14: Distillation à simple effet (Danis, 2003).

II- 4.2.1.2. Distillation à multiples effets (MED)

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (figure 14). Le fluide de réchauffage porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, qui est aussi la cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine, où on maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise l'eau de mer présente dans la deuxième cellule. C'est le deuxième effet. On peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois, la limite basse étant donnée par la température de l'eau de mer froide (figure 15) (Danis, 2003).

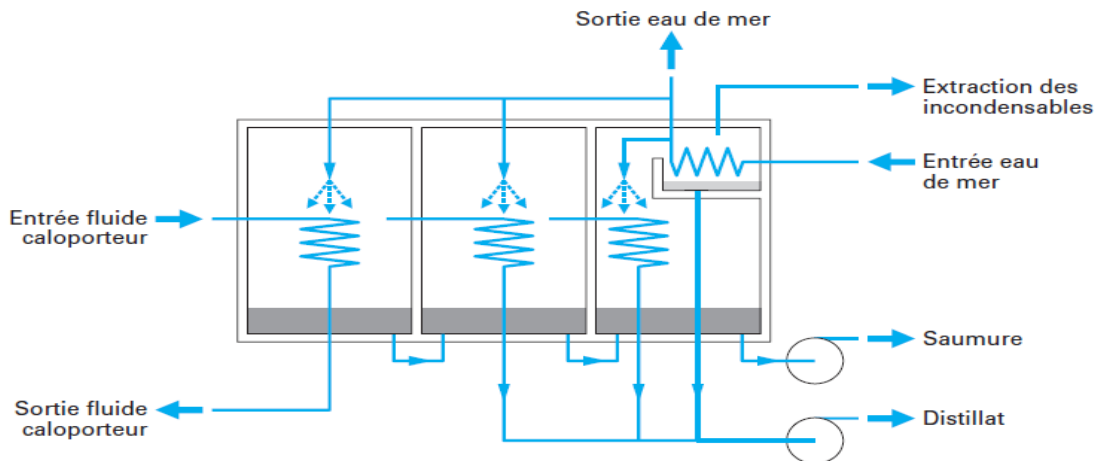


Figure 15: Distillation à multiples effet (Danis, 2003).

II- 4.2.1.3. Distillation avec compresseur de vapeur ou (vapor compression) (VC)

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 thermo compression. La compression par éjecteur nécessite par ailleurs une vapeur motrice (Samaké, 2016).

Dans une cellule de distillation, on constate que l'enthalpie de la vapeur émise est peu différente de celle utilisée pour le chauffage, d'où l'idée de comprimer la vapeur émise et de s'en servir comme fluide chauffant (figure16) (Danis, 2003).

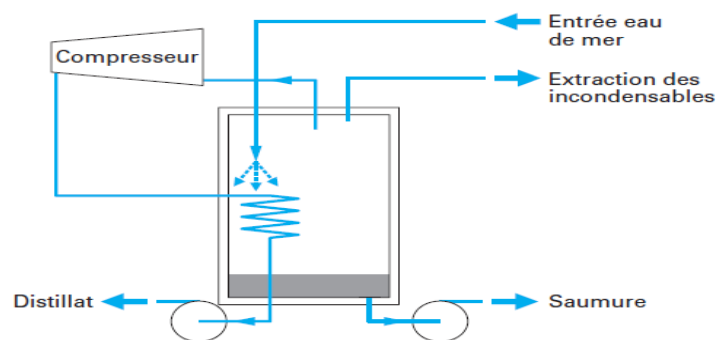


Figure 16 : Compression mécanique de vapeur (Danis, 2003).

II- 4.2.1.4. Distillation par détente successive ou procédé «Flash» ou Distillation Multi-stage flash (MSF)

Consiste à mettre une enceinte sous vide, isolée et ne contenant que de l'eau de mer. On la maintient en équilibre avec sa vapeur à une température « t » et une pression « p ». Lorsque de l'eau chaude est introduite dans l'enceinte, et que « p » est inférieure à la pression de saturation, on observe une vaporisation instantanée par détente. La chaleur de la vapeur est transférée à l'eau froide circulant dans les tubes de condenseur. Elle est alors condensée sur un faisceau tubulaire (Danis, 2003).

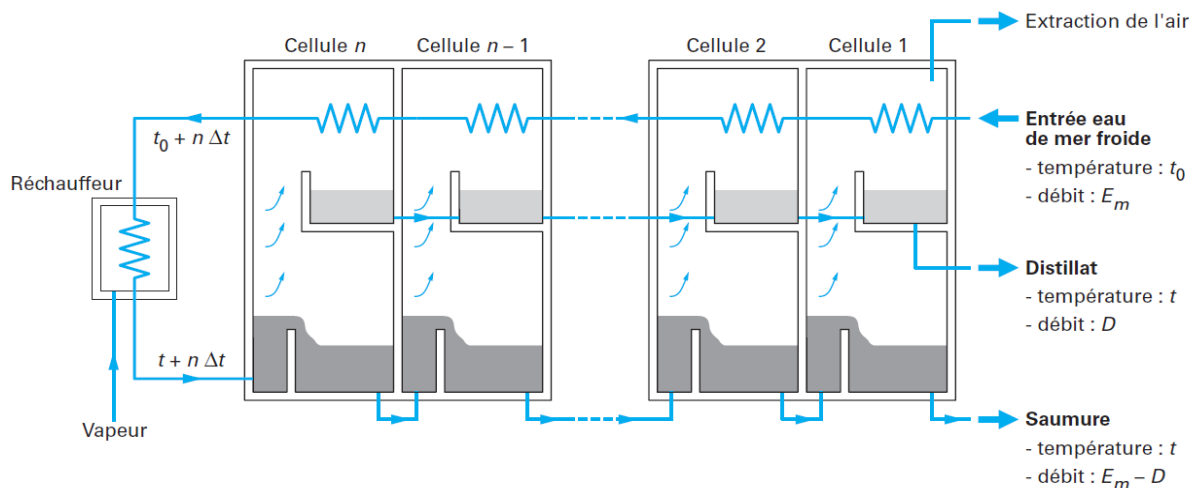


Figure 17: Distillation à détente successive (Danis, 2003).

II- 4.2.2. Procédés à membranes

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.

II-4.2.2.1.L'électrodialyse « ED».

L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce.

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 - dés ionisation.

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.

II- 4.2.2.1.a) L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)

Le terme dialyse désigne la diffusion d'une solution à travers une membrane qui lui est perméable. L'électrodialyse désigne le transfert d'ions à travers une membrane qui leur est perméable sous l'effet d'un champ électrique.

II- 4.2.2.1.b) L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)

Titrées d'une face perméable aux anions et d'une face perméable aux cations. Sous l'effet d'un champ électrique, l'eau présente au cœur de la membrane est dissociée en ions H^+ et OH^- générés respectivement par les faces cationiques et anioniques.

II- 4.2.2.1.c) L'électrodialyse à membranes (EM)

L'électrolyse à membranes est la technique électro-membranaire dans laquelle on couple les effets d'une électrodialyse (migration d'ions au travers d'une membrane semi-perméable) à ceux d'une électrolyse (réaction aux électrodes) (Berland et Juery, 2002).

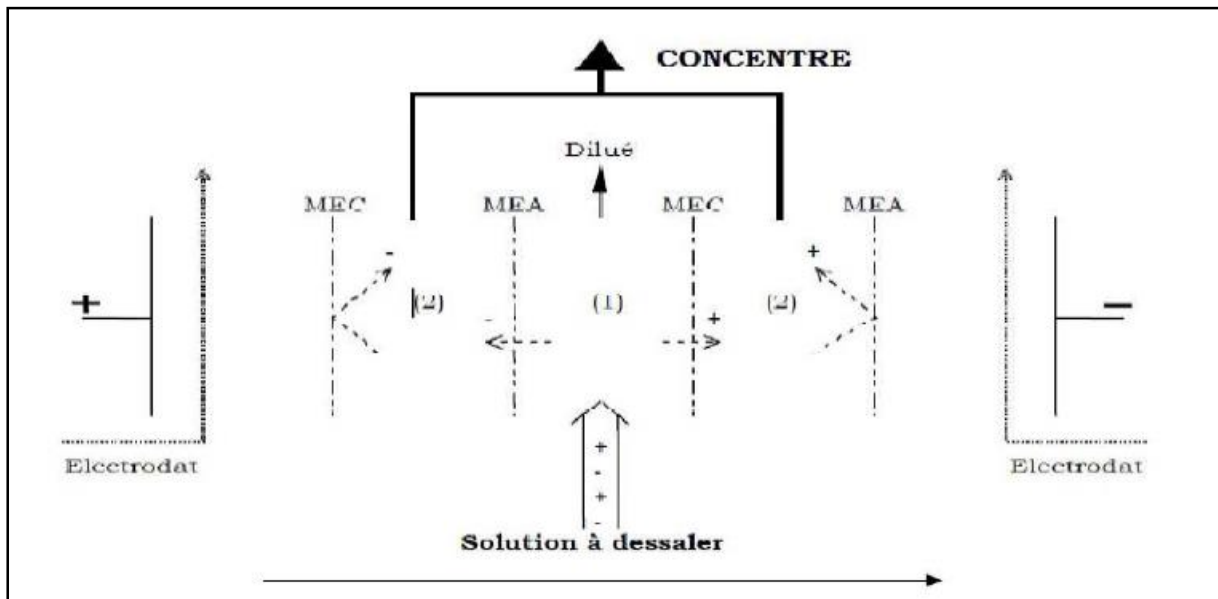


Figure 18 : Principe de fonctionnement de l'électrodialyse (Violleau, 1999).

MEC : Les membranes sélectives aux cations. MEA : Les membranes sélectives aux anions.

Electrodat : Electrodes.

II- 4.2.2.2. L'osmose inverse «OI»

L'osmose un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autres d'une membrane semi-perméable. C'est un phénomène naturel, notamment à travers les membranes cellulaires (Berland et Juery, 2002).

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels. Cette technique est utilisée pour :

- Le dessalement des eaux de mer ;
- Le dessalement des eaux saumâtres ;
- La production d'eau ultra pure ;
- La production d'eau de process... (Benaissa, 2013).

II- 4.2.2.2.1.Principe de l'osmose inverse

Le procédé OI (Osmose inverse) consiste à séparer les substances dissoutes d'une solution salée pressurisée en la faisant diffuser à travers une membrane. A mesure qu'une quantité de l'eau diffuse à travers la membrane, la concentration en sels de la fraction restante augmente. Dans le même temps, une partie de l'eau d'alimentation est rejetée sans diffuser à travers la

membrane .La fonction de la membrane d'osmose inverse est schématisée par la (Figure 19) (Noureddine, 2008).

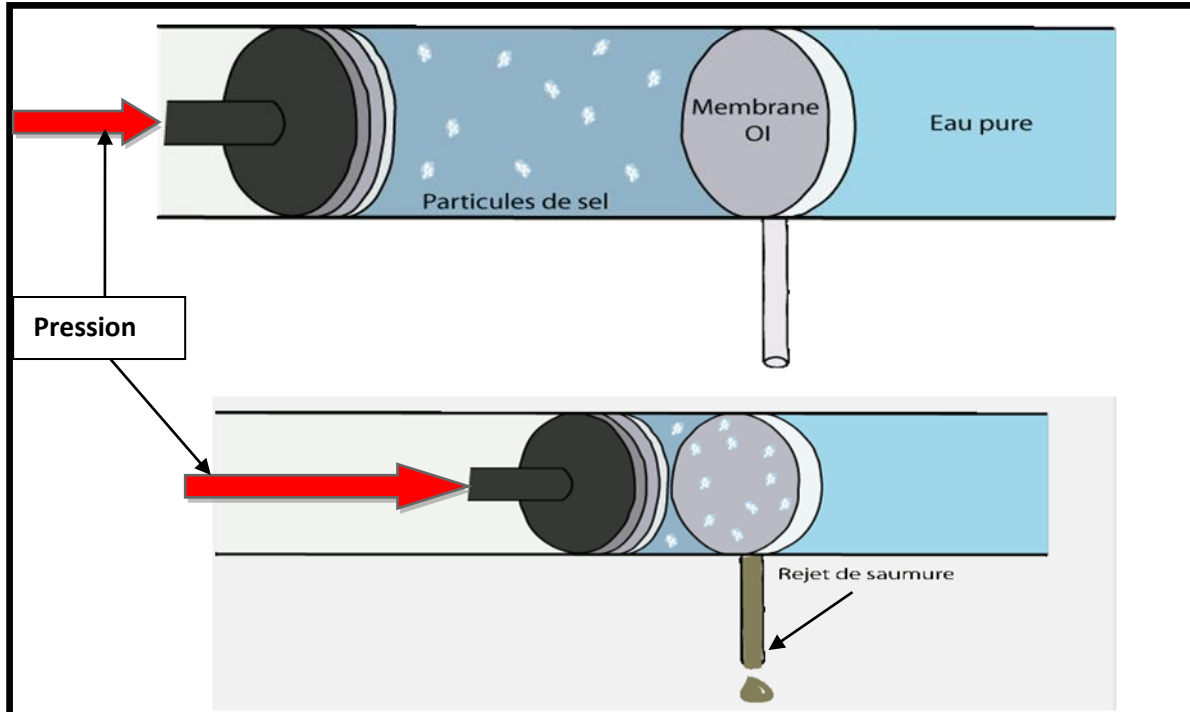


Figure 19: Fonction de la membrane d'osmose inverse (<https://www.ecotoxicologie.fr>).

Cette solution a recours à des membranes filtrantes spécifiques. Ce sont en fait des films de polyamides semi-perméables à l'eau. Leurs pores sont minuscules (moins d'un nanomètre de diamètre), une taille qui entraîne une sélection : seules les molécules d'eau traversent la membrane, les sels dissous ne passent pas, et encore moins les impuretés contenues dans l'eau. Après passage membranaire, l'eau ressort débarrassée de 99 % de son sel. (Ahmouda et Biala, 2016).

II- 4.2.2.2.Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Un système d'osmose inverse «OI» se compose des éléments de base suivants (Figure 20) :

- a) Un poste de prétraitement : l'eau est traitée au préalable à l'aide de filtre, comme le sable, pour éviter que trop de particules s'accumulent au niveau des membranes très fragiles et que le passage ne s'effectue plus.
- b) Une pompe haute pression.
- c) Un module d'osmose inverse (Unité d'osmose inverse) : contenant la membrane (film fin en polyamide enroulé) (Ahmouda et Biala, 2016).

Les unités d'osmose inverse comportent principalement en plus des modules les éléments suivants :

- Une pompe à haute pression : (40 @ 80 bars) pour l'osmose inverse.
- Un échangeur de chaleur : pour maintenir les liquides aux températures souhaitées.
- Une étape d'élimination préalable des plus grosses particules est toujours nécessaire. (Filtre Multimédia, Cartouche 20 microns, Cartouche 5 microns) (Noureddine, 2008).

d) Un système de récupération d'énergie.

e) Un post- traitement : après dessalement, l'eau doit être reminéralisée notamment en calcium et bicarbonate et subir des post-traitements en UV ainsi qu'une légère chloration (Ahmouda et Biala, 2016).

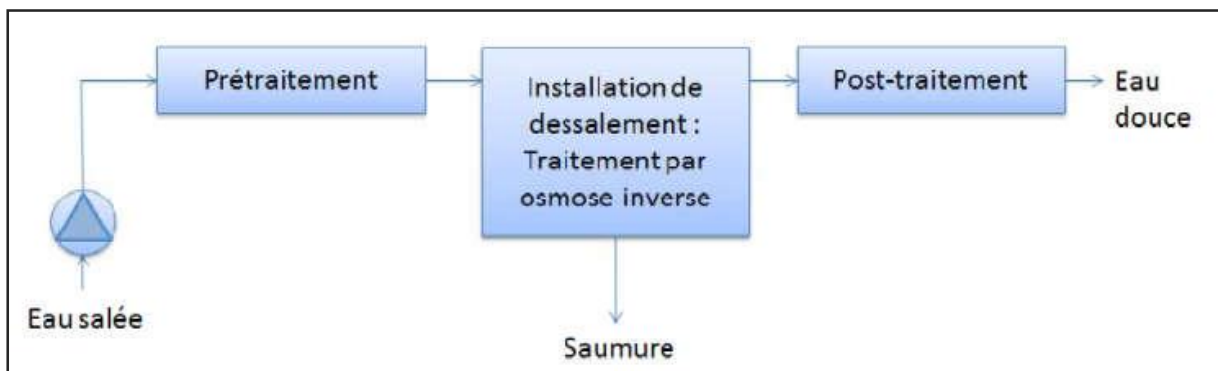


Figure 20: Schéma simple du procédé d'osmose inverse (Amitouche, 2016).

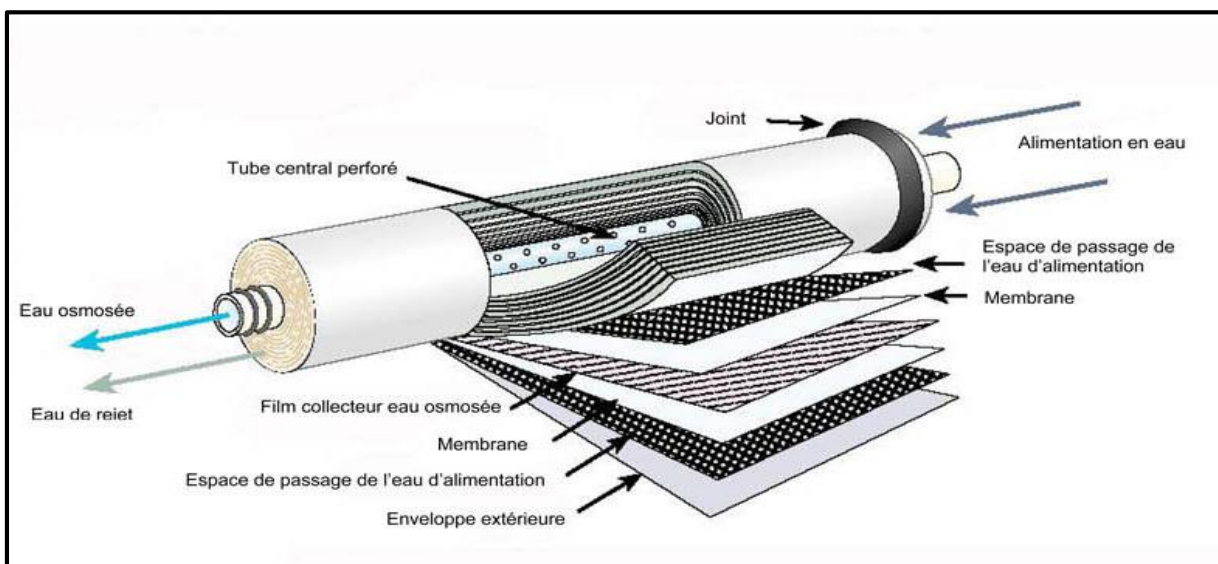


Figure 21 : Schéma du module de l'osmose inverse indiquant l'entrée de l'eau brute et la Sortie du perméat et de la saumure (<https://www.alposmose.com/arti...>).

II- 4.2.2.2.3. Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse

- Ces procédés membranaires possèdent par rapport aux méthodes classiques de gros

avantages :

- ▶ Pas de changement de phase ;
- ▶ Ils permettent de travailler à température ambiante (et sont donc utilisables pour récupérer des molécules fragiles) ;
- ▶ Ils sont simples à automatiser (Issaadi et Khebat, 2015).
- ▶ Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%) ;
- ▶ Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5Kwh/m³) ;
- ▶ Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau ;
- ▶ Une durée de mise en œuvre réduite
- ▶ Après l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bio électroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles (Benaissa, 2013).
- ▶ Capacité de séparation élevée.
- ▶ Systèmes modulaires, d'où une grande flexibilité d'utilisation.
- ▶ Recyclage du perméat et du concentré possible.
- ▶ Températures de fonctionnement faibles.
- ▶ Fonctionnement entièrement automatisé possible (Si Mohammed, 2013).

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

- ▶ Le colmatage se traduisant par une baisse de performances (diminution de la perméabilité, Modification de la sélectivité).
- ▶ La durée de vie liée à la perte de résistance mécanique, qui peut être dû à des nettoyages fréquents ou à l'utilisation des réactifs concentrés (acides, bases, détergents...) (Issaadi et Khebat, 2015).
- ▶ Sensibilité à la variation de la qualité d'eau brute et surtout aux pollutions ;
- ▶ Nécessité d'un personnel qualifié ;
- ▶ Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement ;
- ▶ Un coût de maintenance élevé dû aux frais de renouvellement des membranes d'une durée de vie ne dépassant pas 7 ans à présent (Benaissa, 2013).

II- 4.2.2.3. Nano filtration (NF)

II- 4.2.2.3.1. Définition et principe

La nanofiltration (NF) est une technique membranaire relativement récente qui couvre un domaine de séparation intermédiaire entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Elle permet la séparation de composés ayant une taille en solution de l'ordre du nanomètre, d'où son nom. Les caractéristiques principales de la nanofiltration sont les suivantes:

- les masses moléculaires des solutés retenus se situent entre 200 et 1000 g/mol.
- les pressions de travail (de 10 à 50 bar) sont plus basses que celles utilisées en osmose inverse (de 30 à 100 bar) et les débits de filtration supérieurs à ceux obtenus avec cette technique.
- la séparation des solutés électriquement chargés ne se fait pas sur le seul critère de leur taille mais aussi en fonction de leur charge.

Ainsi, on observe une très forte différence de perméabilité entre deux molécules de même taille, suivant qu'elles sont électriquement chargées ou non. En outre, les membranes de nano filtration vont retenir beaucoup plus les ions multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) que les ions monovalents : elles sont donc sélectives (Arnaud, 2007).

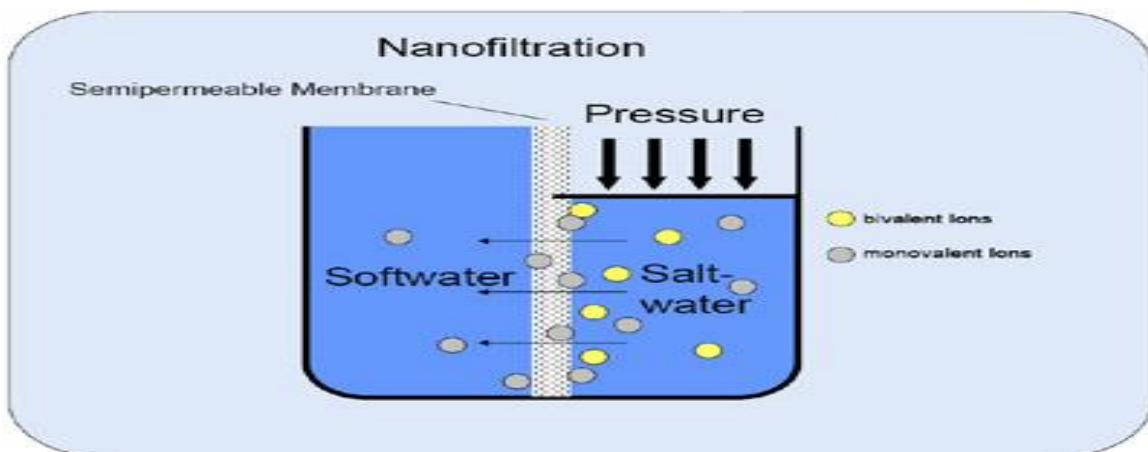


Figure 22: Schéma du principe de la nanofiltration

([http://www.fumatech.com/EN/Membrane-technology/Membrane_processes/Nanofiltration/.](http://www.fumatech.com/EN/Membrane-technology/Membrane_processes/Nanofiltration/))

II- 4.2.2.3.2. Domaine d'application de la nanofiltration

Le procédé de nanofiltration est utilisé dans de nombreux domaines :

- la déminéralisation sélective de l'eau,
- la concentration de composés organiques de faible masse molaire tels que les antibiotiques,
- le traitement des eaux usées notamment l'élimination ciblée de molécules polluantes telles que les pesticides (Bikai, 2015).

Autres applications de la nanofiltration :

- Elimination des pesticides des eaux souterraines.
- Elimination des métaux lourds des eaux usées.
- Recyclage des eaux usées dans les laveries.
- Adoucissement.
- Elimination des nitrates (Dridi, 2018).

II- 4.2.3. Autres procédés de dessalement

II- 4.2.3.1. Echange ionique

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L (Bechki, 2011).

II- 4.2.3.2. Dessalement par congélation

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut-être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce. En pratique, la glace est contaminée par les sels lors de la congélation pour des raisons cinétiques, et par la saumure elle-même pendant la séparation glace solution ; Le procédé doit permettre de minimiser cette contamination (Mandri, 2011).

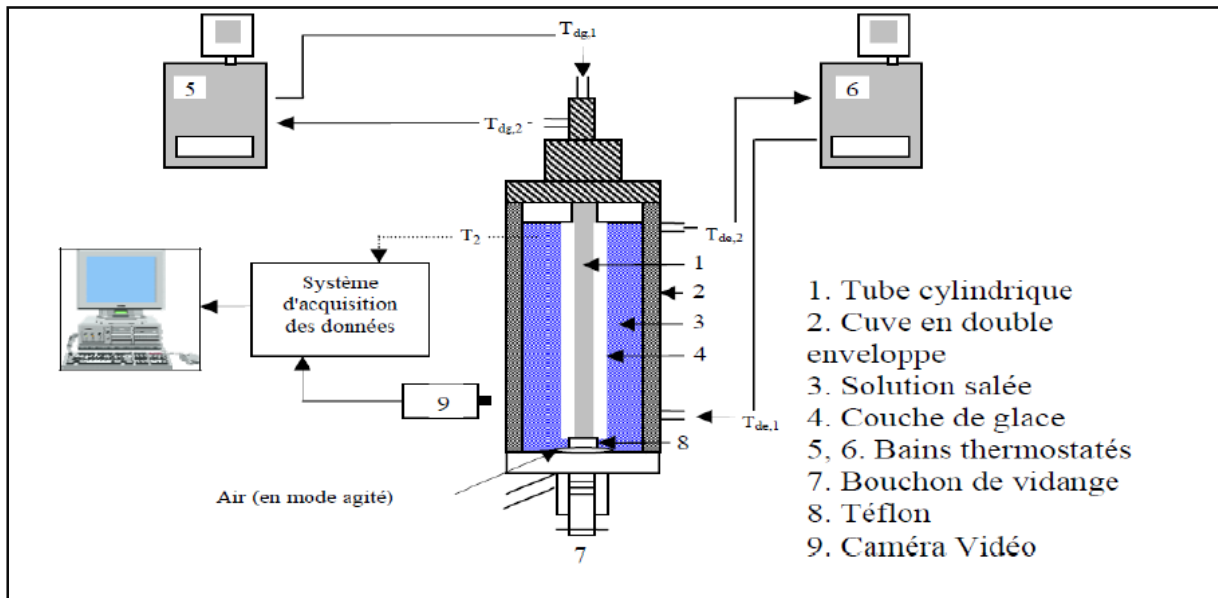


Figure 23 : Principe de dessalement par congélation (Mandri, 2011).

II- 4.2.3.3. Dessalement par Distillation solaire

La distillation solaire est un procédé simple et pouvant être appliqué de façon rustique mais elle ne convient évidemment qu'aux régions où l'ensoleillement est suffisant. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel (Fidali, 2008).

II-5. Dessalement et déminéralisation des eaux en Algérie

En matière de dessalement d'eau de mer et de déminéralisation, l'expérience Algérienne date des années 60. Vers la fin des années 90, il existait 43 unités de dessalement d'une capacité de traitement de près de 100000 m³ par jour. Ce débit est destiné pour une grande partie à l'industrie pétrolière d'ARZEW et de SKIKDA. Des unités de déminéralisation d'eau saumâtre ont été réalisées à Abadla (1700m³/j), D'Ouenza (4000 m³/j), Ouled Djellal (3000 m³/ j) et celle de SONIC à Mostaganem (40000 m³/j). Quelques actions ont été engagées au sein du haut commissariat à la recherche concernant des projets de développement tels que :

- L'étude et la réalisation d'une unité de dessalement par osmose inverse d'une capacité de 200 m³/j.
- L'étude et la réalisation d'une unité de dessalement d'eau de mer par la technique multi flash, d'une capacité journalière de 480 m³.

Suite à la sécheresse de ces dernières années qui a provoqué un manque d'eau potable dans la majorité de communes, un programme d'urgence a été élaboré par le gouvernement pour palier au déficit des ressources en eau. Il s'agit de réaliser 21 stations de dessalement d'une production de 57500 m³/j réparties comme le montre la (figure 24).

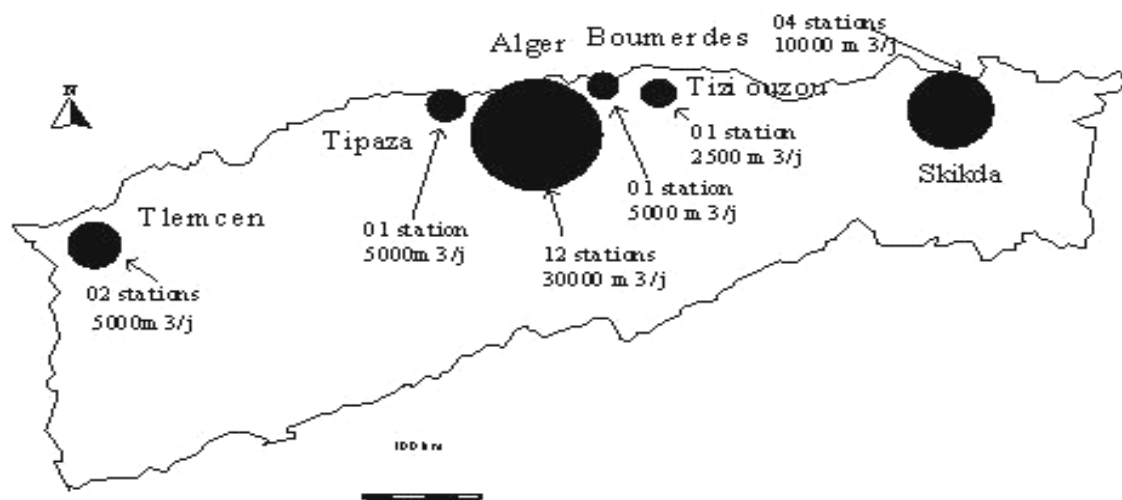


Figure 24 : Répartition des stations de dessalement des eaux de mer en Algérie.

Le dessalement des eaux de mer reste une solution sûre, vu la sécheresse qui sévit ces dernières années dans notre pays. Seulement, il serait préférable que les unités de dessalement destinées à l'alimentation en eau potable de la population fonctionnent uniquement durant les périodes de crises et d'une longue sécheresse. (Remini, 2010).

II-6. Déminéralisation des eaux souterraines en Algérie

Le volume d'eaux saumâtres mobilisées actuellement est estimé à **510 hm³/an** dont **160hm³/an** sont en exploitation pour satisfaire l'alimentation en eau potable.

Douze (**12**) stations sont en exploitation dans les wilayas de : Tlemcen, Oran, Tizi-Ouzou, Bejaia, Illizi, Biskra, Ouargla, Médéa et Ain Defla.

La production d'eau potable est de 24, 2 hm³/an. Aussi, 241 hm³/an d'eaux saumâtres seront déminéralisés à partir d'un volume mobilisé de 464 hm³/an et ce à travers 35 stations et monoblocs de déminéralisation qui sont en phase d'étude et de travaux, inscrites dans différents programmes.

La capacité globale des stations de déminéralisation des eaux saumâtres (SDES) est de 91,5 hm³/an. Le débit global mobilisé en amont dépasse les 428,9 hm³/an. La situation se présente comme suit (Bourouga, 2015) :

- En étude: **06** stations (Tamanrasset 4. El Oued 2) dont 04 SDES dont les études sont achevées (El Oued 2 et Tamanrasset 2).
- Etude et réalisation : **01** station (Béchar).
- En travaux: **12** stations (Ouargla 10, El Oued et Tamanrasset (ADE)).
- Travaux en cours de lancement : **02** station à l'indicatif de l'ADE (Tindouf et Illizi).
- Installation de SDES Monoblocs : **15** stations (El Oued) dont : **01** station achevée et mise en service et **14** stations en cours d'installation.
- Selon la documentation disponible on détail à titre d'exemple quelques données sur les stations de déminéralisation de l'eau potable à Ouargla :

La wilaya d'Ouargla est alimentée en eau potable exclusivement des nappes aquifères .Elle compte également 138 forages, dont 116 en service destinés à l'AEP en plus de 93 réservoirs d'une capacité de stockage de 56.590 m³.

Les 9 stations concernées par le projet de la ville d'Ouargla sont actuellement alimentées en eau brutes à partir de 27 forages exploités, dont 2 forages Albiens (Tableau 01).

Le projet consiste à améliorer la qualité de l'eau potable actuellement distribuée à Ouargla et d'en réduire la salinité qui est actuellement de 3 à 6 g/l pour la ramenée après désalinisation à 0,8 g/l.

Les différentes stations permettront de traiter 70500 m³/J pour fournir 75% d'eau déminéralisée, soit environ 53 000 m³/j (www.ade.dz).

Tableau 01:Caractéristiques des stations de déminéralisation des eaux à Ouargla (Algérienne des Eaux)

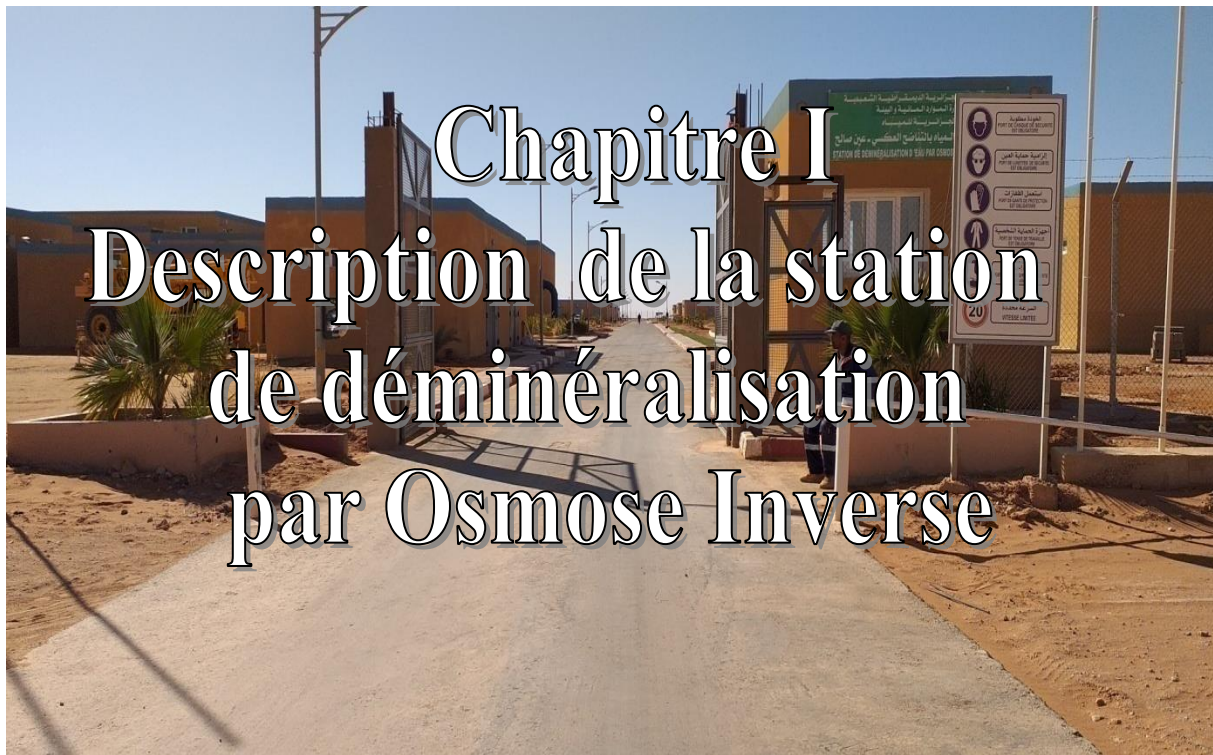
Nom de la station	Capacité d'eaux brutes (m ³ /j)	Objectif d'eaux traitées (m ³ /j)	Nbre d'habitant servie moyenne de 150 L/J.hab	Forages
G HARBOUZ (S1)	3 000	2250	15000	2
AIN EL KHEIR (S2)	9 000	6750	45000	5
HAI BOUZID (S3)	4 500	3375	22500	3
MEKHADMA (S4)	3 000	2250	15000	3
IFRI-GARA (S5)	10500	7850	52333	4
ZYAYNA (S6)	3 000	2250	15000	2 (1 Albien)
EL KHAFDI (S7)	7 500	5625	37500	3
BAMENDIL VILLAGE (S8)	3 000	2250	15000	2
EL HADEB (S9)	27 000	20250	135000	3 (Albiens)

II-7. CONCLUSION

Les procédés membranaires classiques et l'osmose inverse connaissent un essor important dans le dessalement des eaux de mer et saumâtres. Toutefois, quelle que soit le procédé, il constituera un élément dans une chaîne d'opération de traitement. Par ailleurs, comme nous l'avons précisé chaque industrie est un cas particulier. La synthèse bibliographique que nous avons réalisée montre que ces techniques membranaires offrent de nombreuses possibilités d'emploi et une qualité du perméat conforme aux normes.

L'expérience algérienne en matière de dessalement et de déminéralisation des eaux en vue d'un usage destiné exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est en développement.

Partie expérimentale



Chapitre I

Description de la station de déminéralisation par Osmose Inverse

I.1. Introduction

Ce présent chapitre a pour but de donner une description générale sur la station de traitement des eaux par osmose inverse. Cette station est destinée à l'approvisionnement en eau potable de la ville de Tamanrasset et in Salah. Nous allons commencer le chapitre par une présentation de la station de traitement en décrivant des différentes étapes de traitement des eaux au niveau de la station.

I.2. Présentation de la Station de traitement

Cette Station, occupe une superficie Totale de 81831,00 m².

- SuperficiesBâtie: 6298, 00 m².
- Superficies non Bâtie: 75633, 00 m².
- Superficies des Bassin d'évaporation (14 Bassin) : 60 hectares.

L'objectif de la station de traitement des eaux potables et la déminéralisation des eaux pour la production d'une eau potable dont les caractéristiques physico-chimiques sont conformes aux normes de potabilité. La station est l'un des composants principaux d'un système d'alimentation en eau potable envisage pour la ville de Tamanrasset et de la ville d'in Salah qui est située a environ 700 km en direction sud-est dans la région saharienne de l'Algérie.

Le système est prévu à répondre au besoin en eau dans l'agglomération de la ville de Tamanrasset ainsi que des communautés situées le long de la route d'approvisionnement jusqu'à l'année 2050.

Les données Relatives à la mise en Service et Exploitation de la Station de déminéralisation sont les suivantes :

- Démarrage des travaux: 10 Mai 2015.
- Mis en service semi- industrielle et essais:19 Juillet 2017.
- Réception provisoire partielle de la station de déminéralisation: 01 Novembre 2017.
- Production actuelle (selon besoin) :
 - Eau brute: Entre 33000 m³/jours et 34 000 m³.
 - Eau Traitée: Entre 29000 m³/jours et 30 000 m³.
- La minéralisation mesurée : A la sortie de la station : 0,6 g/l. A Tamanrasset : 0,8g/l.
- Cout du mètre cube d'eau Traitée: 36,48 DA en TTC.

- Consistance du transfert ver Tamanrasset:
 - 48 Forage (24 Forage de profondeur 600m chacun).
(24 Forage de profondeur 450m chacun).
(02 Forage et 35 piézomètres).
- 01 Réservoir Terminal avec une capacité de 50 000 m³.

I.3 Description du site de la station

La Station se trouve au niveau d'Ain Salah W/Tamanrasset et située sur la bordure droite de la route nationale RN1 (Voir les images Google earth ci-dessous (Figure 25)).

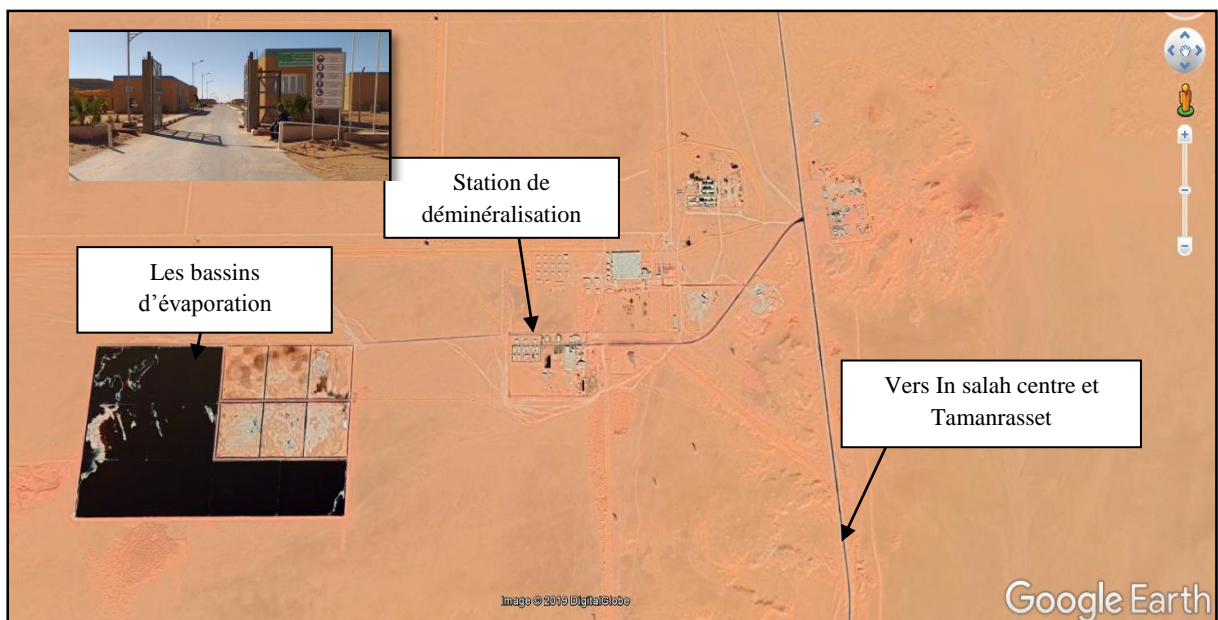


Figure 25: Situation géographique de la station de traitement des eaux par osmose inverse à In Salah (W-Tamanrasset).

I.4. Description de la filière de traitement

L'eau des forages situé dans le champs de captage aux voisinage du station de déminéralisation est destinée pour l'alimentation des deux villes (in Salah et Tamanrasset) pour la consommation humaine. Cette eau est considérée comme une eau de salinité très élevée, une dureté élevée, fortes teneurs en sulfates, en bicarbonate et très riche en ions chlorure et sodium (Tableau 02) d'où la nécessité d'un traitement préalable. De ce faite elle est acheminée vers le réservoir d'eau brute à partir duquel commence la chaine de traitement par osmose inverse (Figure26).

Tableau 02 : Analyses physico-chimiques de l'eau brute alimentant la station de traitement (Données de la station en 20/12/2017).

Paramètre	Valeur
Température (T°)	20,1 °C
Sels dissous calculés (Minéralisation)	2003 mg/l
Turbidité	0,220 < 1 NTU
Conductivité	2940 (µs /cm)
Matières en suspension	Négligeables
pH	7,62
Sodium (Na ⁺)	193 mg/l
Potassium (K ⁺)	22 mg/l
Calcium (Ca ²⁺)	210 mg/l
Magnésium (Mg ²⁺)	45 mg/l
Fer total (Fe ²⁺)	< 0,03mg/l
Manganèse (Mn ²⁺)	0,00 mg/l
Chlorures (Cl ⁻)	701,96 mg/l
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	495 mg/l
Bicarbonate (HCO ₃ ²⁻)	212,89 mg/l
Nitrate (NO ₃ ⁻)	10,85 mg/l
Silice (SiO ₂)	872 mg/l
Phosphate (PO ₄ ³⁻)	0,19 mg/l

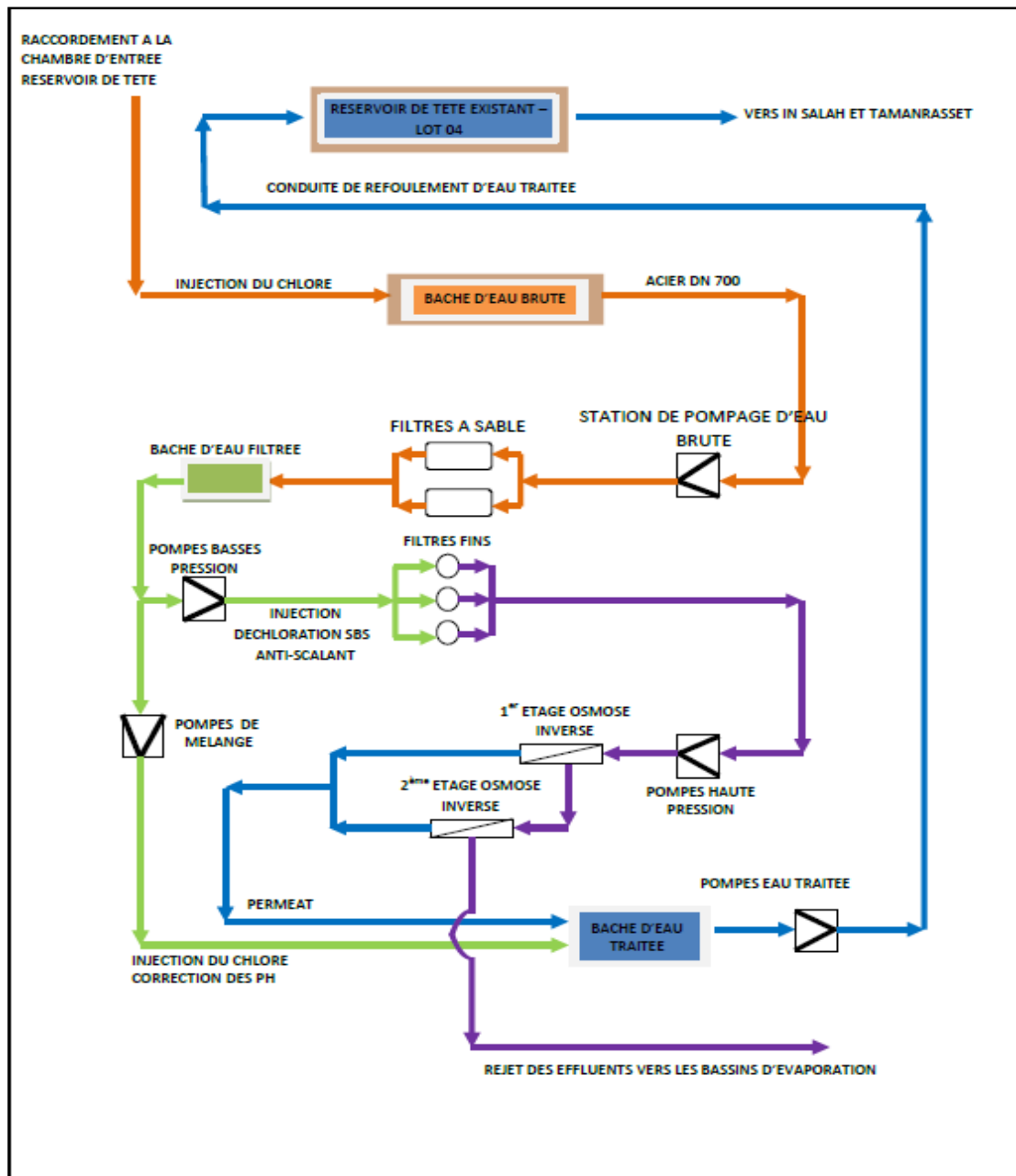


Figure 26 : Schéma synoptique de la station de déminéralisation d'eau par osmose inverse (ADE, 2018).

I.4.1. Pompes d'alimentation

A la sortie de la bache d'eau brute on dispose de deux lignes de pompage (Figure 27-a) qui alimentent les 10 filtres multimédia (filtres à sable) (Figure 27-b).

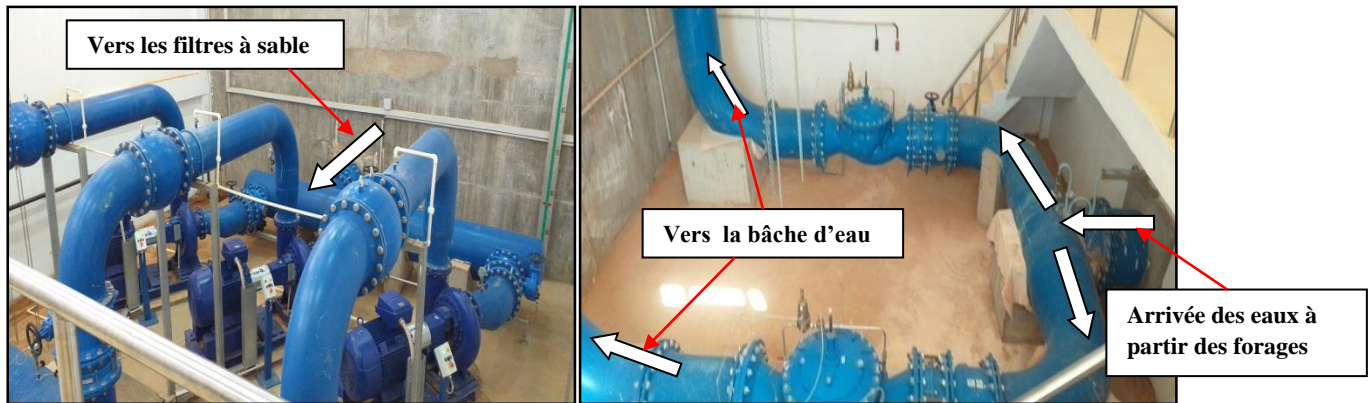


Figure 27-a



Figure 27-b

Figure 27 : Photos : Les pompes d'alimentation à partir de la bache d'eau brute,
LAKHDARI –H, le : 13/02/2019

Les caractéristiques de chaque ligne sont présentées dans le tableau03.

Tableau 03 : Ligne principale (ADE, 2019), les formations suivant les plaques des pompes.

Pompe d'alimentation ligne principale [03(02+ 01 de secours)]	
Débit	Q = 937,50 m³/h
La hauteur manométrique	H = 30,00 m
La vitesse de rotation	n= 1490Tr/ min
La Pression sur les 03 manomètres	P=03bars

I.4.2. Les Filtres Multimédia (Filtres bicouches sous pression type horizontale)

Les filtre-multimédia est la première étape de traitement dans la station après la bêche d'eau brute. L'eau d'alimentation est introduite dans le système à un débit de $Q = 937,50 \text{ m}^3/\text{h}$ et une pression minimale de 03bars.

Ces filtres sont composés d'un mélange de sable, gravier et anthracite pour éliminer les particules en suspension ayant une taille supérieure à 20-30 microns.

Le filtre multimédia est équipé d'un système de lavage automatique (sous pression) le démarrage du lavage est contrôlé par un timer ou par différence de pression installé dans l'armoire de contrôle. Le rétro lavage du système est réalisé avec de l'eau d'alimentation.

Les systèmes de filtrations "multimédia" associent les avantages de chaque matière filtrante par un sur couchage successif des divers matériaux filtrants (Figure28).

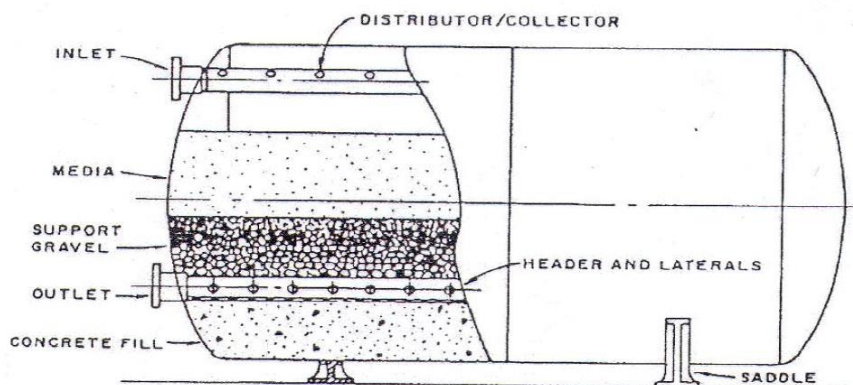
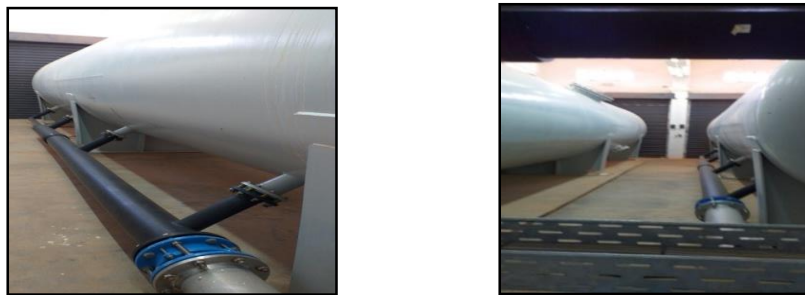


Figure28 : Photos: Les Filtre multimedia au niveau de la station,
LAKHDARI-H, le : 13/02/2019.

Les données concernant la conception de l'unité de filtration sur sable sont présentées dans le tableau 04.

Tableau 04:Caractéristiques du filtre multimédia (filtres à sable).

Source : [Manuel d'exploitation Pour unité d'osmose inverse, Système: **CHRIWA**,
Le : 01-11-2016, Pour: ADE-In-Salah.]

Filtres Bicouches sous Pression		Caractéristiques
Type de filtration :		filtration en profondeur sous pression sur milieux
Nombre de filtres		10
Numéro d'identification		F-101...F-110
Débit de conception	- total	1875 m ³ /h
	- par filtre, service normal	187,5 m ³ /h
	- par filtre, maximal	208,3 m ³ /h (1 filtre en mode de lavage à contrecourant)
Pression de service		2,2 bars
Surface de filtration	- par filtre	26,38 m ²
	- totale	263,8 m ²
Vitesse de filtration,		
Vitesse de filtration	moyenne, avec tous les filtres En service :	7,1 m/h
	maximale, avec 9 filtres en service :	7,9 m/h (1 filtre en mode de lavage à contrecourant)
Turbidité du filtrat, à 10 mg/l de MES d'entrée :		≤ 0,3 NTU
Durée de fonctionnement moyenne du filtre à 10 mg/l de MES d'entrée:		~20,9 heures
Pompes de Lavage à Contre-courant des Filtres	Nombre de pompes :	2 (1 en service + 1 en standby)
	Type de pompe :	pompes centrifuges monocellulaires
	Débit de conception :	527...860 m ³ /h
	Hauteur manométrique totale :	18 m
	Puissance nominale :	75 kW
	Réglage du débit et démarrage :	par convertisseur de fréquence externe

I.4.3. Station de pompage d'eau filtrée(Les Pompes à Basse pression)

L'eau filtrée est aspirée et puis transférée vers les filtres fins à l'aide de 05 pompes de reprise, 04 en opérations et 01 en stand-by(Figure29).

Chaque pompe a une capacité de 336 m³/h et 04 bars (Tableau 05). Les moteurs sont à vitesse variable par variation de fréquence. La vitesse de rotation de ces pompes est de 3.000 tours/min.

La Hauteur manométrique totale: 40,8 m, le Rendement hydraulique total : 74,7 %.

Tableau 05: Pompe haute pression ligne principale (CHRIWA, 2016). Les formations suivant les plaques des pompes.

Les 05 Pompe (04+01 de secours) d'alimentation ligne principale	
Débit	$Q = 336 \text{ m}^3/\text{h}$
La hauteur manométrique	$H = 40,8 \text{ m}$
La vitesse de rotation	$N = 2982 \text{ Tr}/\text{min}$
Pression	$P = 4 \text{ bar}$



Les 05 Pompes à Bas pression

Figure29 : Photo des 05 Pompes à Bas pression au niveau de la station.

Lakhdari - H le : 14/02/2019.

I.4.4. Filtres 5 Microns pour le Système d’Alimentation d’Osmose Inverse

La cartouche filtrante à 5 microns (Figure 30) permet de retenir des particules plus fines que la cartouche à 5 microns. Ainsi, on obtient une finesse de filtration plus précise.



WFMB Cartouche fusible



Photo: Lakhdari - H le 14/02/2019.

Figure 30 : Les Filtres 5 Microns au niveau de la station (Photo: Lakhdari - H le:14/02/2019).

L'eau filtrée alimentant les unités de déminéralisation passe par des filtres fins à cartouches de 5 microns dimensionnés pour le débit nominal total. La fourniture comprend huit unités avec 39 cartouches de 40 pouces dans chaque unité

Les données techniques des filtres sont regroupées dans le (tableau 06).

Tableau 06: Données Techniques des filtres

Source : [Manuel d'exploitation Pour unité d'osmose inverse, Système: **CHRIWA**,
Le:01-11-2016, Pour: ADE-In-Salah.].

Données	Caractéristiques
Nombre d'unités de filtration	08
Configuration	unité monté sur pieds consistant en 8 boîtier de filtre avec chaque'un 39 cartouches filtrantes standardisées d'une longueur de 40''
Type de filtration	filtration en profondeur
Degré de filtration (finesse)	5 µm
Débit de l'eau d'alimentation d'OI (selon conception d'OI)	
- total	1344 m ³ /h
- par ligne de filtration	336 m ³ /h

I.4.5. Station de pompage Haute Pression (Les Pompes à haute pression)

L'eau filtrée après les filtres fins à cartouches est aspirée à l'aide de 5 pompes haute pression et puis transférée vers les osmoseurs, 4 en opérations et 1 en stand-by.

Chaque pompe a une capacité de 336 m³/h et 12 bars. Les moteurs sont à vitesse variable par variation de fréquence. La vitesse de rotation de ces pompes est de 3.000 tours/min, La Hauteur manométrique totale, choisie (~122,7 m), le Rendement hydraulique au point de fonctionnement : 74,7 % .Avant d'entrer dans les membranes d'osmose inverse, Les eaux souterraines est pressurisée au moyen de la pompe haute pression généralement entre 12 et 18bar, en fonction de la température et de la salinité de l'eau (Tableau 07).

Tableau 07: Les caracteristiques des Pompe haute pression ligne principale (CHRIWA, 2016).

Les 05 Pompe (04+01 de secours) d'alimentation ligne principale	
Débit	Q =336 m ³ /h
La hauteur manométrique	H =122,67m
La vitesse de rotation	N =2416 Tr/min
Pression	P =12bar



Les 05 Pompes à haute pression

Figure 31 : Photo Les 05 Pompes à haute pression au niveau de la station,
Lakhdari - H le : 14/02/2019.

I.4.6. Unité d'osmose inverse

L'eau d'alimentation prétraitée et pressurisée à la pression de service requise est introduite dans le système par la pompe haute pression.

Après la pompe haute pression, l'eau d'alimentation pénètre dans les membranes. L'ensemble des membranes peut être désigné comme installation à réservoir sous pression unique ou à plusieurs réservoirs sous pression en parallèle. Ceux-ci peuvent être disposés comme modules multiples dans une configuration à plusieurs étages (Figure 32), chaque étage contenant de moins en moins de modules (configuration de type « Christmas tree » en anglais). Quelques caractéristiques techniques de l'unité de l'osmose inverse sont regroupées dans le tableau 8.

Si, par exemple, le système est conçu pour une récupération à 75 %, cela veut dire que 75 % de l'eau d'alimentation est obtenue sous forme de perméat peu salin. Les 25 % restants

sont déviés vers les effluents sous forme de concentrât (pour la concentration des effluents, il faut respecter la réglementation locale pertinente).



Figure 32 : Modules de l'osmose inverse au niveau de la station, (Photo: Lakhdari –H Le : 14/02/2019).

Tableau 08 : Technologie de dessalement station à membrane (par unité)

N°	Les caractéristiques	Valeurs
01	Capacité perméat	276 m ³ /h
02	Capacité alimentation	336 m ³ /h
03	Pression d'exploitation	12 bar
04	Pression d'alimentation	02 bar
05	Évacuation concentrât	60 m ³ /h
06	Rétention sel	99,5 %
07	Valeur pH alimentation	7,4 pH
08	Valeur pH perméat, conception	6,4 pH
09	Température de conception	25 °C
10	Température d'exploitation max	40 °C
11	Système membranaire	
12	Réservoir sous pression type	MSP450
13	Élément type	TMG20D400
14	Plage de pH	3-9 pH
15	Commutation	3-2

I.5. Bassins d'évaporation

Les bassins d'évaporation (Figure 33) sont essentiellement des bassins artificiels à très grandes superficies qui sont conçus pour faire évaporer l'eau efficacement grâce à l'exposition au soleil.

Ces bassins sont situés à 800 mètres de la station se compose de 14 bassins (Figure : 33 et 34). La superficie totale de ces bassins est de 60 hectares. La profondeur de chaque bassin est de 01 m. Ces bassins reçoivent un débit moyen journalier de la saumure d'environ $Q_{\text{saumure}} \approx 6000 \text{ m}^3/\text{jour}$.



Figure 33: Bassin d'évaporation, (Photos : Lakhdari H, Le : 13/02/2019).

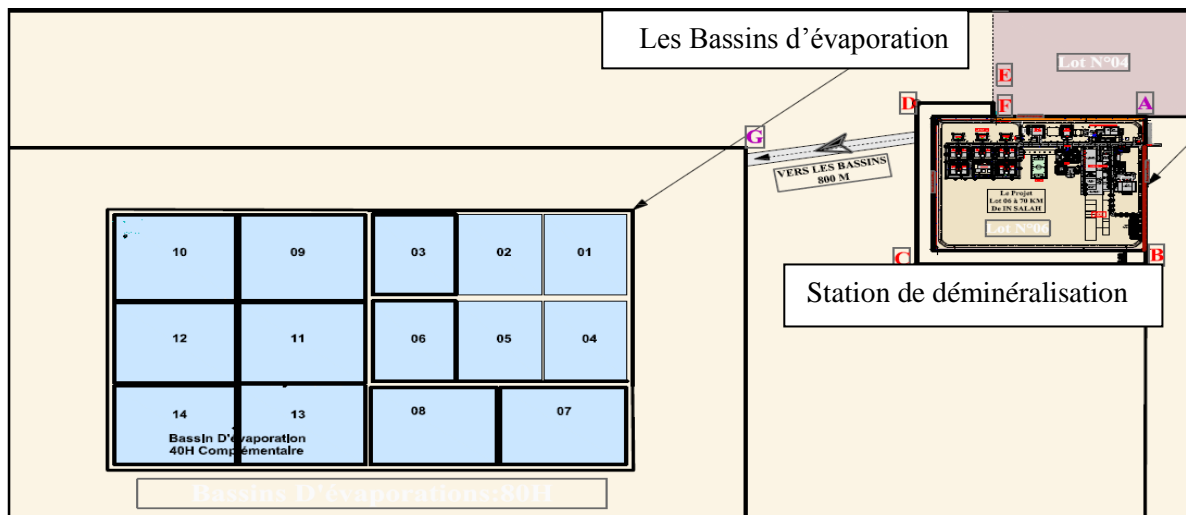


Figure 34: Plan de situation des bassins d'évaporation, (CHRIWA, 2016).

Les étangs d'évaporation seront divisés sur trois bassins, ces bassins ont trois concentrations différentes (Figure 35) :

- Bassin 1 : évaporation des saumures entrantes, concentration entre 48 g/l et 110 g/l.

- Bassin 2 : bassin d'évaporation intermédiaire, centration entre 110 g/l et 230 g/l.
- Bassin 3 : bassin de cristallisation, concentration supérieur à 230 g/l.

Bassin de cristallisation	Bassin d'évaporation intermédiaire	Bassin d'évaporation des saumures entrantes
Bassin de cristallisation	Bassin d'évaporation intermédiaire	Bassin d'évaporation des saumures entrantes

Figure 35 : Disposition des bassins d'évaporation selon la concentration de la saumure (CHRIWA, 2016).

Source : Rapport d'Etude d'impact sur l'environnement préalable à la réalisation et l'exploitation d'une station de déminéralisation à In Salah.

Après évaporation les sels récoltés devront être stocké dans des alvéoles dans un cassier imperméable, recouvert de géomembranne, qu'on peut recouvrir à fur à mesure qu'elles se remplissent durant l'exploitation de la station. L'estimation financière de la réalisation de ces bassins d'évaporation est d'environ 5 million d'euros.

D'après le rapport d'étude du sol de la station de déminéralisation de In Salah, le sol à un degré de saturation assez élevé (compris entre 37,42 % et 92,79 %) donc il a une perméabilité aussi élevé, par contre juste à proximité du site il y a l'oued de Taïdjet qui s'écoule du nord-ouest au sud-est par rapport à notre site vers une Sebkhha qui représente un bassin d'évaporation naturelle.

La possibilité de déverser les concentras de la station de déminéralisation directement vers cet oued reste une possibilité envisageable et moins couteuse que celle des bassins d'évaporations, néanmoins des sondages pour mesurer la perméabilité du lit de oued et la sebkhha de destination sont obligatoire avant de prendre une décision finale.

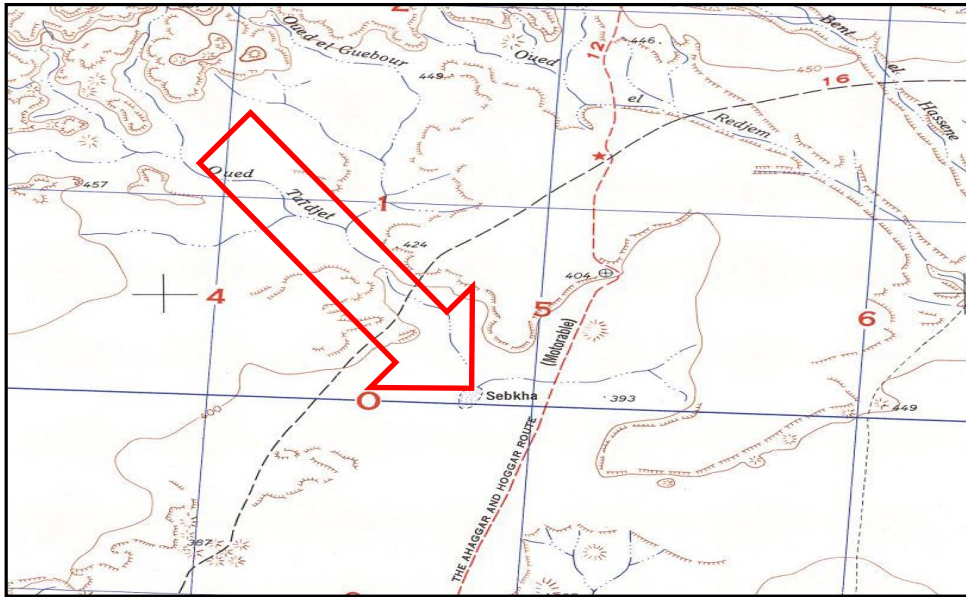


Figure 36: Plan de situation de Rejet proposé dans l’oued vers la Sebkha (CHRIWA, 2016).

Source : Rapport d’Etude d’impact sur l’environnement préalable à la réalisation et l’exploitation d’une station de déminéralisation à In Salah.

I.6. Nettoyage de l’installation

Si un nettoyage des membranes est prévu, le perméat du réservoir de stockage doit être rempli jusqu’au niveau maximum. Le perméat sera utilisé pour la production et pour la préparation de la solution de nettoyage. Toute la quantité de perméat produite pendant le processus de nettoyage sera évacué (Figure 37), ne pouvant pas être utilisée pour la production des boissons.

Il faut effectuer un nettoyage de l’usine à osmose inverse lorsque :

- * la capacité de perméat de l’usine baisse par 15-20 % par rapport aux données enregistrées au redémarrage après le dernier nettoyage.
- * la conductivité du perméat a augmenté par plus de 20 % par rapport aux données enregistrées au redémarrage après le dernier nettoyage.
- * mais au moins une fois tous les 6 mois.

Les membranes à osmose inverse sont soumises à un processus de vieillissement normal et au compactage, voulant dire que la capacité des membranes diminue irréversiblement avec le temps. C’est la raison pour laquelle les données pouvant être mesurées à la mise en service ne peuvent pas être complètement atteintes après une durée d’exploitation prolongée.



Réservoir de nettoyage

L'eau de rinçage vers les bassins d'évaporation

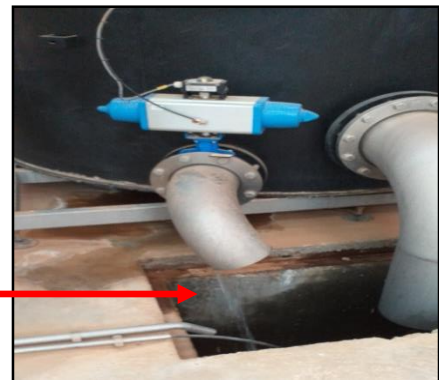


Figure 37 : Réservoir de nettoyage l'osmose inverse au niveau de la station,

Photo: Lakhdari – H, le : 14/02/2019.

I.7. Traitements chimiques

Au cours de la chaîne de traitement on réalise les traitements chimiques suivants:

- a) **Pré chloration** : le processus pré chloration est réalisé par utilisation d'une solution d'hypochlorite à une dose moyenne de : 57,7 L/h.

Le point d'injection du produit de la Pré chloration est la conduite d'entrée d'eau de puits dans la chambre de vannes commune en amont des comportements de réception d'eau de puits. La dose moyenne spécifique du chlore effectif est de : 01 g/m^3 .

- b) **Dé chloration**: on utilise le méta bisulfite de sodium, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (en bref SMBS) de densité : $2,36 \text{ g/cm}^3$ et à 20% à une dose spécifique de : 3g SMBS par 1g de Cl_2 1,5 à 3 mg/L. Ce composé sert d'éliminer tout chlore effectif résiduel qui pourrait être présent dans le flux de filtrat pompé vers le système d'osmose inverse. Comme

produit chimique fortement oxydant, le chlore est préjudiciable aux membranes (éléments) d'osmose inverse, alors que le SMBS dispose d'un léger effet désinfectant qui n'est pas nuisible aux éléments d'osmose inverse.

Le point d'injection du produit chimique est dans les lignes d'alimentation d'osmose inverse des chaînes d'osmose inverse individuelles.

c) Ajout de l'antitartre : L'antitartre est d'empêcher des dépôts de carbonate et de sulfate au sein des éléments d'osmose inverse.

L'antitartre est utilisé sous forme liquide de densité 01g/cm^3 à 3 à 5g/m^3 .

Le point d'injection est situé dans la conduite de refoulement vers les filtres fins.

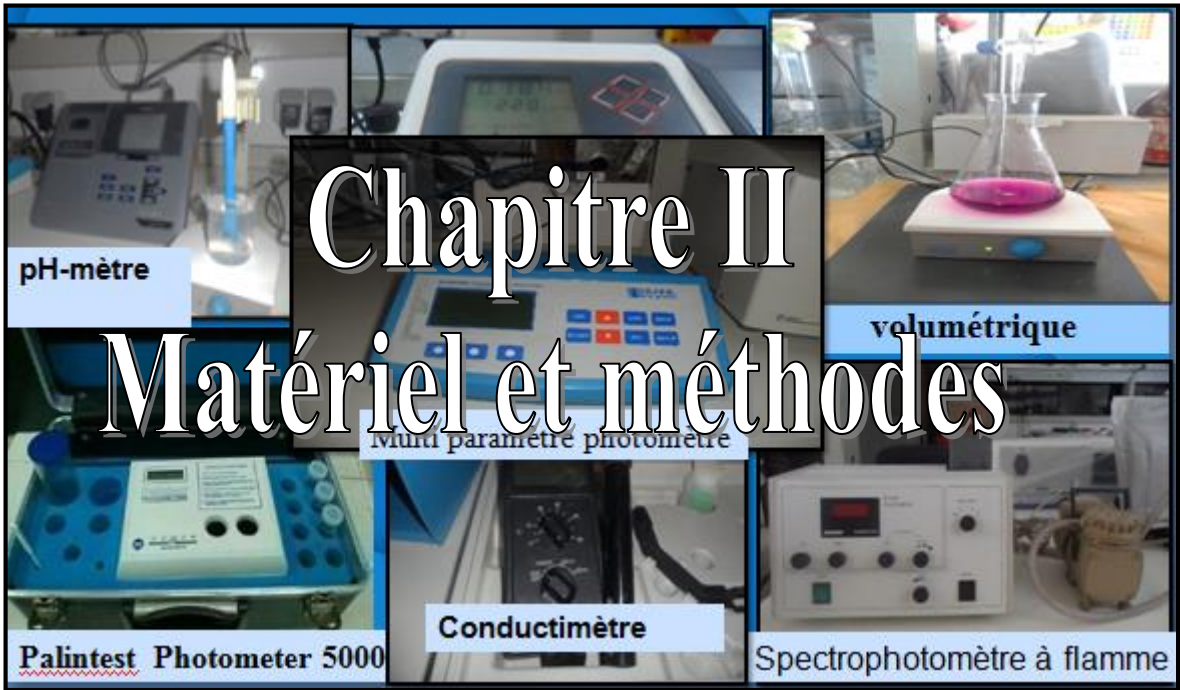
d) Ajout du carbonate de sodium : L'objectif principal du dosage de carbonate de sodium (soude caustique), Na_2CO_3 , consiste à augmenter la valeur PH (7,8 à 7,9) et l'alcalinité de l'eau traitée afin d'assurer sa stabilité, c'est-à-dire une quantité constante. En outre, l'équilibre chimique de « chaux-acide carbonique » obtenu à la valeur pH cible réduit considérablement le pouvoir corrosif « agressivité » de l'eau traitée.

Le produit Na_2CO_3 est préparé en solution aqueuse à raison de 200g/L . Le débit spécifique de carbonate de sodium est entre : 25 à 30g/cm^3 .

Le point d'injection du produit chimique est la conduite d'eau de mélange, juste en Amont de l'arrivée au compartiment de la bêche d'eau traitée.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la situation de la station de traitement ou de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse au niveau du PK70 au Nord d'In Salah située dans la wilaya de Tamanrasset. Et la destination des eaux traitées. Nous avons également donné une idée générale sur les caractéristiques des différents ouvrages de la station. Une idée générale a été donnée également sur les traitements chimiques réalisés au niveau de la station.



pH-mètre

Chapitre II

Matériel et méthodes

volumétrique

Palintest Photometer 5000

Conductimètre

Spectrophotomètre à flamme

II.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour la réalisation de l'étude expérimentale de notre étude.

Nous allons présenter une description des caractéristiques des solutions et des réactifs utilisés. Les méthodes de dosage de différents paramètres physico-chimiques des échantillons prélevés après différentes étapes de traitement de l'eau des forages seront également décrites.

II.2 Prélèvement des échantillons d'eau

Les points de prélèvements au niveau de la station de traitement sont effectués manuellement au niveau de cinq points (Figure 38):

- **E1:** Un prélèvement de l'eau brute à la sortie de la Bache d'eau brute.
- **E2:** Un prélèvement à la sortie de la Bache d'eau Filtrée.
- **E3:** Un prélèvement à la sortie l'osmose inverse.
- **E4:** Un prélèvement à la sortie de la Bache d'eau Traitée.
- **E5:** Un prélèvement à la sortie du Rejet vers les Bassins d'évaporation.

Comme le montre la figure 38 l'eau traitée représente un mélange de l'eau osmosée et l'eau filtrée à un rapport respectivement de 75% / 25%.

Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en plastique des eaux minérales de 1,5 L rincées par l'eau traitée puis remplis jusqu'au bout. Le bouchon est placé de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport.

Dans chaque point de prélèvement, on a réalisé un échantillonnage le 25 février 2019. Nos résultats d'analyses physico-chimiques de ces échantillons d'eaux (réalisées aux niveaux du laboratoire LARHYSS) seront comparés à ceux obtenus comme données aux niveaux de la station:

1. Le 23 Juillet 2017 (Les résultats d'analyse obtenu du laboratoire de la station).
 2. Le 20 Décembre 2018 (Les résultats d'analyse obtenue du laboratoire de la station).
- ❖ Au niveau du laboratoire LARHYSS et pour chaque échantillon prélevé nous avons réalisé les mesures des paramètres suivants: pH, conductivité, sodium (Na^+) et potassium (K^+), nitrates (NO_3^-), phosphates (PO_4^{3-}), TH, calcium (Ca^{2+}), chlorure (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}) et TAC.

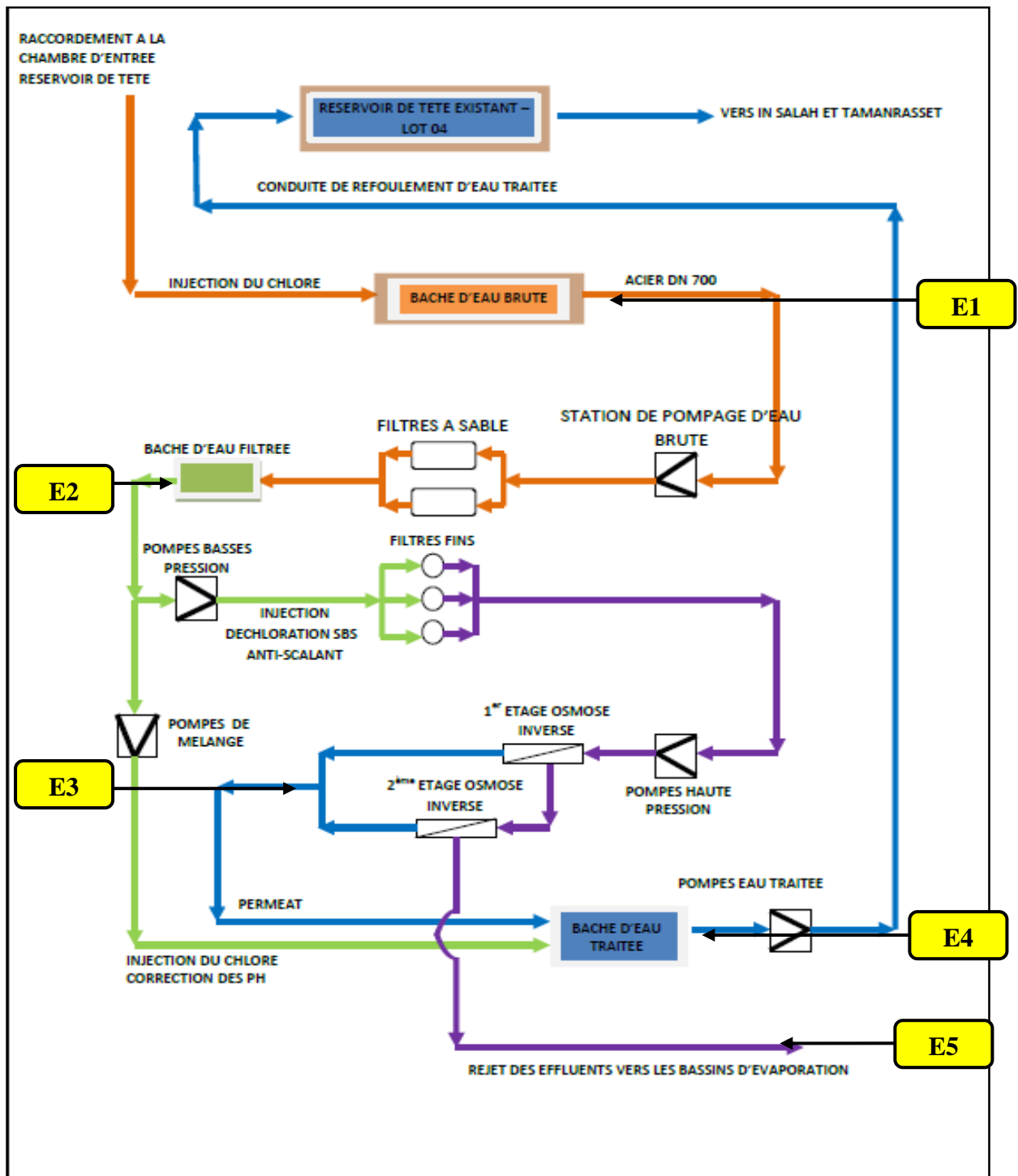


Figure 38 : Points de prélèvements au niveau de la station de traitement (ADE, 2018).

II.3 Dosage des paramètres de la qualité de l'eau

Les méthodes de dosage utilisées sont décrites par Rodier (2009), Tardat-Henry et Beaudry (1984) ou par les catalogues de l'appareillage utilisé :

- **pH:** On a mesuré le pH des échantillons d'eau à l'aide d'un pH mètre HANNA instruments (pH 210) (Figure39).



Figure 39 : pH mètre utilisé au cours des essais.

- **Conductivité :** Elle a été mesurée au moyen d'un conductimètre électrique de type « Bioblocscientific LF 315 », donnant des mesures en $\mu\text{s}/\text{cm}$ et en ms/cm (figure40).



Figure 40: Conductimètre utilisé pour la mesure de la conductivité des échantillons d'eau

- **Titre alcalimétrique complet (T.A.C) :** L'échantillon d'eau à analyser est additionné de quelques gouttes (2 à 3) de méthylorange puis titré à l'aide d'acide sulfurique jusqu'au virage du jaune à l'orange. Le TAC est exprimé en milliéquivalents par litre ou en degrés français (Tardat-Henry et Beaudry, 1984).
- **Titre hydrométrique (TH) :** La dureté totale ou hydrométrique (TH) est la somme des concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le mode opératoire consiste à prélever 100 ml d'eau à analyser, ajouter 5ml de solution tampon (pH = 10) et une pincée d'indicateur coloré (Noir

Eriochrome T). Enfin, on verse la solution d'EDTA jusqu'au virage du rouge vieux au bleu vert (Figure 41), ce volume versé correspond à la dureté totale (en °F) (Rodier, 2009).



Avant titrage

Après titrage à l'EDTA

Figure 41: Détermination du TH par complexométrie à l'EDTA

- **Dosage du calcium :** Les ions Ca^{2+} sont dosés par complexométrie dans un milieu alcalin à $\text{pH} = 12$, en présence de la soude (NaOH) avec le Murexi de comme indicateur coloré. on titre par l'EDTA ($N = 0,02 \text{ éq/l}$) jusqu'au virage pourpre (Rodier, 2009).
- **Détermination de la teneur en magnésium :** La différence entre la dureté totale et la dureté calcique donne directement la dureté magnésienne (la teneur en magnésium), exprimé en degrés français (Rodier, 2009).
- **Dosage des chlorures :** Selon la méthode de Mohr (Rodier, 2009), les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent (AgNO_3), en présences de chromate de potassium (KCrO_4) jusqu'à apparition d'une coloration rouge brique (Figure 42).

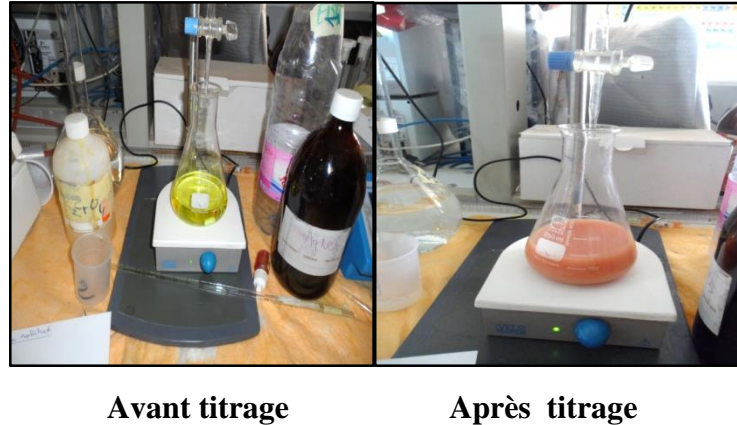


Figure 42: Détermination de la concentration des chlorures (Cl^-)

▪ **Dosage du sodium et potassium :** Les ions sodium et potassium sont dosés par photométrie de flamme (JENWAY clinical PFP7) (Figure 43).

- Afin d'effectuer le dosage du sodium, les solutions étalons sont préparées par dilution à partir d'une solution mère de $1000 \text{ mg de Na}^+/\text{l}$, préparée par dissolution de NaCl dans l'eau distillée.
- Afin d'effectuer le dosage du potassium, les solutions étalons sont préparées par dilution à partir d'une solution mère de $100 \text{ mg de K}^+/\text{l}$, préparée par dissolution de KCl dans l'eau distillée.

La teneur de Na^+ ou de K^+ dans l'échantillon est déterminée après avoir utilisé une solution étalon de 100 mg/l pour le sodium et de 10 mg/l pour le potassium.



Figure 43: Spectrophotomètre à flamme utilisé pour le dosage du sodium et du potassium.

- **Dosage des ions SO_4^{2-}** : Le dosage a été réalisé sur un photomètre de type «PALINTEST» (Figure 44) à une longueur d'onde spécifique (520 nm) réglée sur le photomètre «PALINTEST» après l'ajout d'un réactif adéquat selon le catalogue de l'appareil.



Figure 44 : Photomètre PALINTEST

- **Dosage des ions PO_4^{3-} et NO_3^-**

Le dosage de chaque élément a été réalisé sur un spectrophotomètre multi paramètres de type HI 83200-02 (Figure 45). Le mode opératoire de la détermination de la concentration de chaque élément a été décrit par le catalogue de l'appareil.

- **PO_4^{3-}** : dans une gamme basse de mesure de 0 à 2,5 mg/l, à une longueur d'onde de 610 nm.
- **NO_3^-** : dans une gamme de mesure de 0 à 30 mg/l à une longueur d'onde de 525 nm.



Figure 45 : Multi paramètre photomètre HI83200.

II.4. Conclusion

Ce chapitre donne des renseignements sur les méthodes de dosage des différents paramètres physico-chimiques des eaux prélevées au niveau de la station de traitement par osmose inverse à In Saleh.

Les résultats d'analyses et leurs interprétations sont présentés dans le chapitre suivant.

Conclusion générale

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter et de discuter les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines (In Saleh) brutes et traitées par la station d'osmose inverse. La discussion sera basée sur la comparaison des résultats obtenus aux normes de potabilités. Les résultats de cette étude vont nous permettre de contrôler la performance et de suivre l'efficacité de différentes unités de la station.

III.2 Paramètres de qualité destinés pour le suivi

❖ Les paramètres mesurés sont le pH, la conductivité électrique de l'eau, le TH, le TAC et les concentrations en K^+ , Na^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} .

Le réservoir d'eau brute à partir duquel commence la chaîne de traitement par osmose inverse est alimenté par 16 forages situés dans le champ de captage au voisinage de la station de déminéralisation est destinée pour l'alimentation des deux villes : in Saleh et Tamanrasset. Le tableau 09, regroupe les caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute. Cette eau est caractérisée par une dureté élevée, fortes teneurs en sulfates, en potassium et très riche en ions chlorure et sodium.

Rappelons que les points de prélèvement au niveau de la station sont les suivants :

- **E1**: Un prélèvement de l'eau brute à la sortie de la Bache d'eau brute.
- **E2**: Un prélèvement à la sortie de la Bache d'eau Filtrée.
- **E3**: Un prélèvement à la sortie l'osmose inverse.
- **E4**: Un prélèvement à la sortie de la Bache d'eau Traitée (mélange de 75% d'eau Osmosée avec 25 % d'eau filtrée).
- **E5**: Un prélèvement à la sortie du Rejet vers les Bassins d'évaporation.

Pour calculer le pourcentage d'élimination des éléments suivis à la sortie de chaque unité de traitement, on a utilisé l'expression du taux de rétention qui se présente par la relation suivante :

$$R (\%) = (1 - C_r / C_0) \times 100$$

Avec : **R (%)** : Taux de rétention ; **C₀** : la concentration initiale avant l'entrée dans l'unité de traitement et **C_r** : la concentration résiduelle de l'ion à la sortie de l'unité de traitement.

Tableau 09 : Analyses physico-chimiques de l'eau brute alimentant la station de traitement.

Paramètre	Labo LARHYSS (27-02-2019)	Labo Station (23-07-2017)	Labo Station (20-12-2018)	Norme de potabilité (JORA, 2014)
pH	7,51	7,62	7,25	6,5<pH<9
Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2450	2940	3230	2800
Sodium (Na^+) (mg/l)	537	193	400	200
Potassium (K^+) (mg/l)	35	22	30	12
Calcium (Ca^{2+}) (mg/l)	187,2	210	148	200
Magnésium (Mg^{2+}) (mg/l)	79	45	93	Non indiquée par JORA et OMS. On adopte 50 mg/l selon CEE (1975)
TH ($^{\circ}\text{F}$)	79,6	71,25	76	50
Chlorures (Cl^-) (mg/l)	699,783	701,96	610	500
Sulfates (SO_4^{2-}) (mg/l)	520	495	650	400
TAC ($^{\circ}\text{F}$)	13	17,45	10	6,5 Pour les eaux dessalées ou déminéralisées (valeur minimale)
Nitrate (NO_3^-) (mg/l)	14,62	10,85	15,41	50
Phosphate (PO_4^{3-}) (mg/l)	0,29	0,19	-	5 mg/l en P (15,34 mg/l en PO_4^{3-})

III.3 Résultats du suivi des paramètres de qualité physico-chimique

Une remarque est à faire pour tous les paramètres de qualité que nous avons suivis :

- A la sortie des filtres à sable une légère diminution par rapport à l'eau brute car cet ouvrage affecte principalement les MES.
- Une augmentation de la valeur correspondante au paramètre mesurée pour l'eau traitée par rapport à l'eau osmosée car l'eau traitée est un mélange de 75% d'eau osmosée avec 25% d'eau filtrée alors l'eau devient reminéralisée. Et le paramètre reste conforme aux normes.

- Les analyses obtenus au niveau de la station et qui dates du 20-12-2018 permettent de montrer de faible rendement de traitement à la sortie de l'osmose inverse par rapport aux deux autres analyse. Cet effet revient au faite que les membranes de ces ouvrages nécessitaient un nettoyage.

III.3.1 le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'activité des ions hydrogènes (H^+) dans une solution aqueuse exprimée en moles/litre. Il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu et renseigne sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau. Le pH de l'eau analysée brute et au cours des étapes de traitement varie entre 6,23 et 7,8 et généralement toutes les valeurs de pH mesurés sont conformes aux normes de potabilités (JORA, 2014).

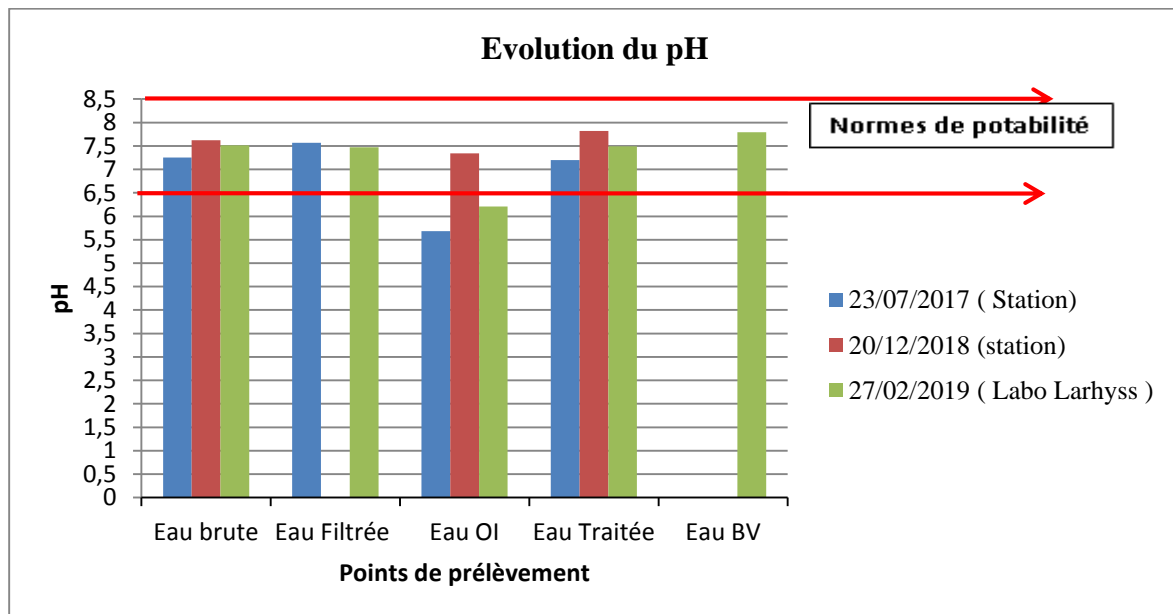


Figure 46: Valeurs du pH de l'eau mesurées au niveau de différents points de prélèvement.

III.3.2 Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, la conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Rejsek, 2002).

Les eaux brutes des trois périodes de prélèvements sont très minéralisées, avec des valeurs qui oscillent entre 3230 et 2950 μ S/cm. Pour les eaux traitées nous remarquons une diminution de la conductivité électrique qui varie entre 120 et 134 μ S/cm à la sortie de l'osmose inverse avec un rendement d'élimination variant entre 56,93 % et 99,46 %, ce qui indique une grande

efficacité d'élimination des sels minéraux des eaux souterraines par l'osmose inverse (Figures 47 et 48).

Selon les gestionnaires de la station dans le cas où la conductivité de l'eau à la fin de la filière de traitement (osmose inverse) est en dessous de 300 $\mu\text{g/l}$, une étape de reminéralisations de l'eau sera nécessaire par mélange de cette eau avec de l'eau brute. De ce fait au niveau de cette station on a recours (Cf. Figure 24 chapitre I) à faire un mélange de 75% d'eau osmosée avec 25 % d'eau filtrée pour obtenir l'eau traitée qui va être envoyée à la consommation. Selon les prélèvements réalisés, la conductivité de cette eau varie entre 1040 et 1362 $\mu\text{S/cm}$. C'est une valeur qui est largement inférieure à la norme de potabilité (2800 $\mu\text{S/cm}$).

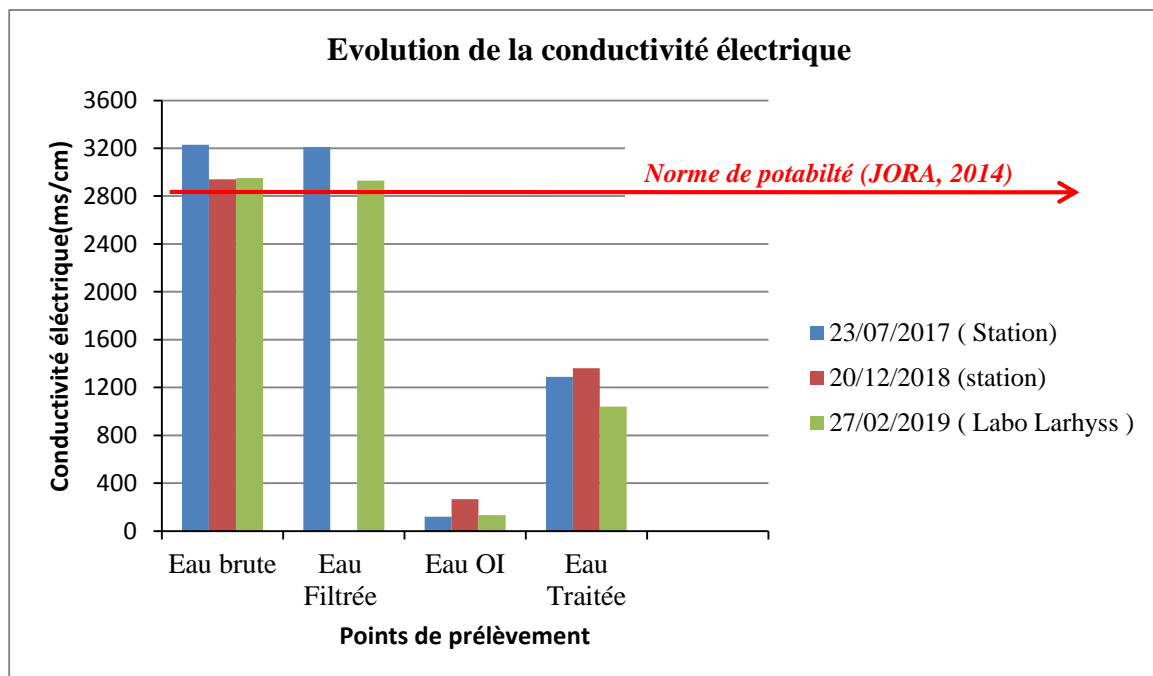


Figure 47: Evolution de la conductivité électrique(CE) de l'eau mesurée dans différents points de la station.

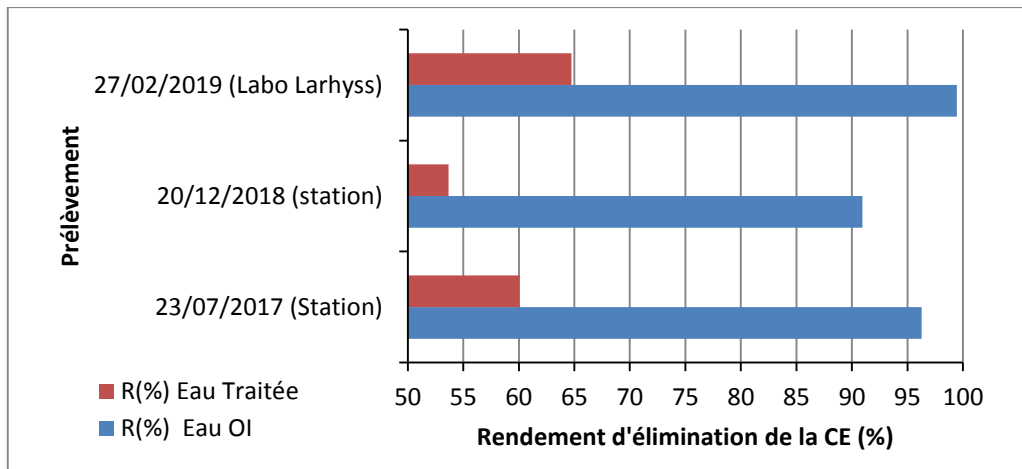


Figure 48 : Rendement de la réduction de la conductivité électrique(CE) de l'eau des forages par l'osmose inverse pour les trois prélèvements

III.3.3 Potassium (K^+)

Le potassium est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium ; il ne prend qu'exceptionnellement le troisième rang des cations. Il est indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux. L'agriculture, il est utilisé comme engrais sous forme de sulfate de potassium, de chlorure de potassium, ou encore de nitrate de potassium (Nouayti et al, 2015).

À l'entrée de la station, la concentration de sodium dans l'eau brute est comprise entre 22 et 35 mg/L. Le suivi de cette teneur à la sortie de l'OI montre que le traitement entraîne un abaissement de la concentration en potassium jusqu'à 2 mg/L (< norme de potabilité) avec un rendement d'élimination qui oscille entre 92,95 % et 93,1 % (Figure 49 et 50).

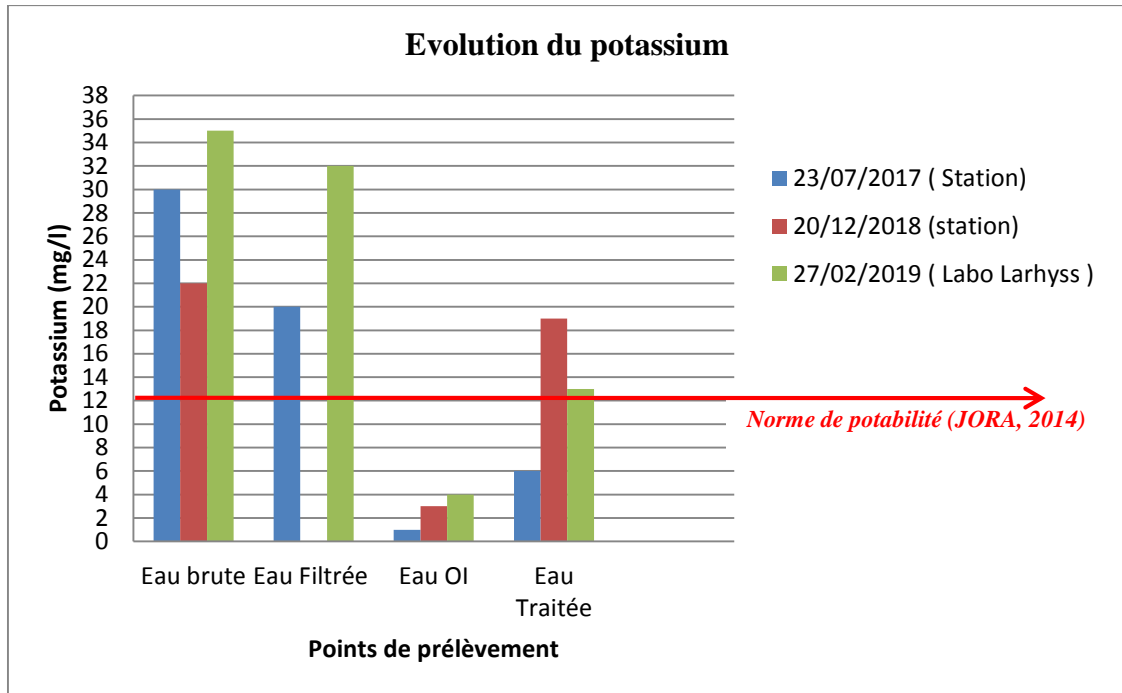


Figure 49: Evolution du potassium (K^+) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

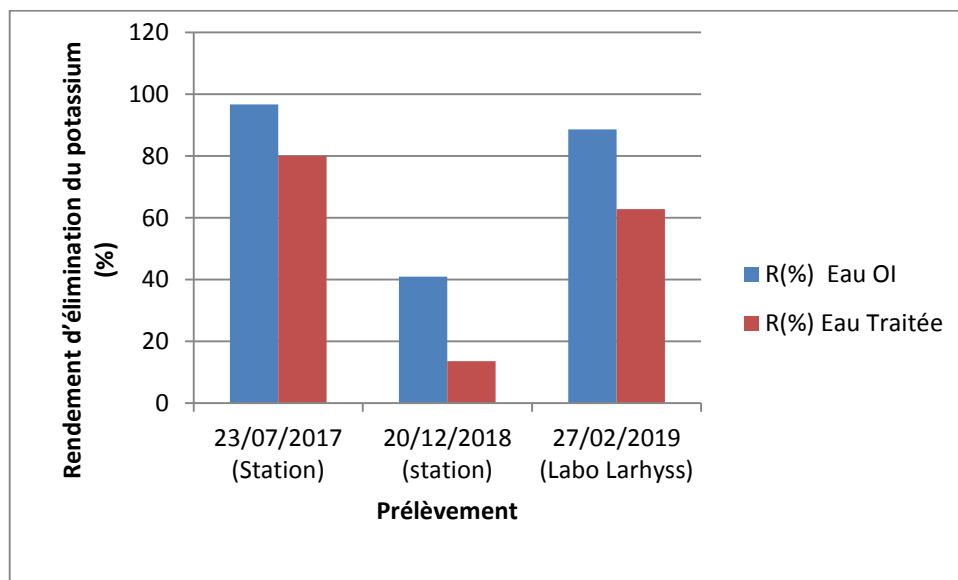


Figure 50: Rendement d'élimination du potassium (K^+) de l'eau des forages par osmose inverse pour les trois prélèvements.

III.3.4 Sodium (Na^+)

Le sodium Na^+ est l'élément le plus dominant dans les cations et il existe dans la totalité des eaux car la solubilité de ses sels est très élevée (Tardat-Henry et Beaudry, 1984).

Dans les échantillons d'eaux prélevées les concentrations du sodium varient entre 490 mg/l et 530 mg/l et la comparaison des concentrations avec les normes de potabilité (JORA, 2014) montre que la totalité des échantillons d'eau possèdent des teneurs supérieures à la norme de potabilité (200 mg/L).

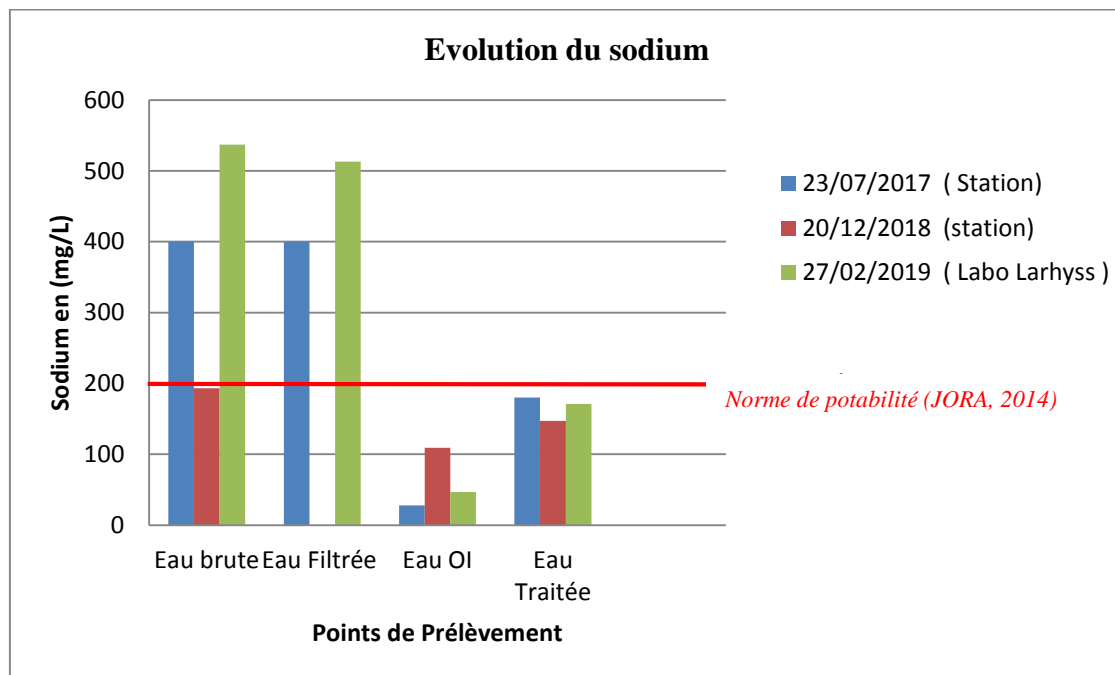


Figure 51 : Evolution de la teneur du (Na^+) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

Ces teneurs élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres (Rodier et al, 2009). Après traitement, la concentration résiduelle en sodium est généralement inférieure à la norme de potabilité. (Figure 51) et avec un rendement d'élimination supérieur à 90% (Figure 52).

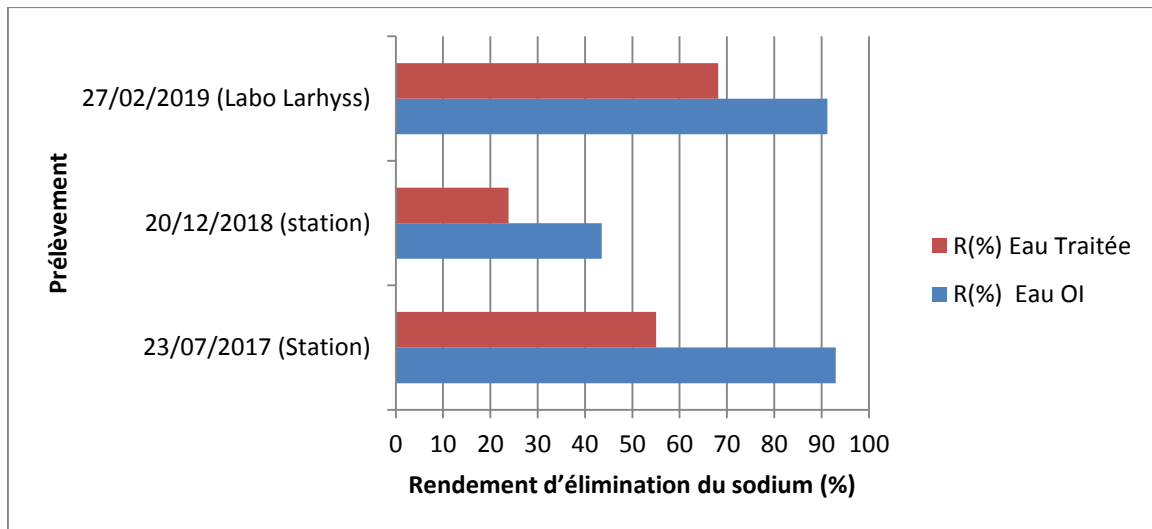


Figure 52 : Rendement d'élimination du sodium (Na^+) de l'eau des forages.

III.3.5 Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates, composés oxygénés de l'azote, sont présents dans les rejets d'eaux usées et dans les engrais. Ils sont le témoin de la dégradation de la qualité de l'eau (Queneau et Habert, 2009). Les nitrates dans l'eau de boisson présentent des risques à la santé suite à l'ingestion des ions nitrates/nitrites tels que la méthémoglobinémie du nourrisson due à l'action des nitrites ainsi que des risques potentiels de cancérogénicité via la formation de composés N-nitrosés (Levallois, 1992). La norme algérienne de l'eau de consommation humaine pour les nitrates, a été fixée à 50 mg/l (JORA, 2014). À l'entrée de la station, les teneurs en nitrates pour les trois périodes de prélèvements varient entre 15,41 et 10,85 mg/L et sont largement inférieures à la norme de potabilité (JORA, 2014) (Figure 53). Cette remarque a été faite également pour l'eau à la sortie de la station.

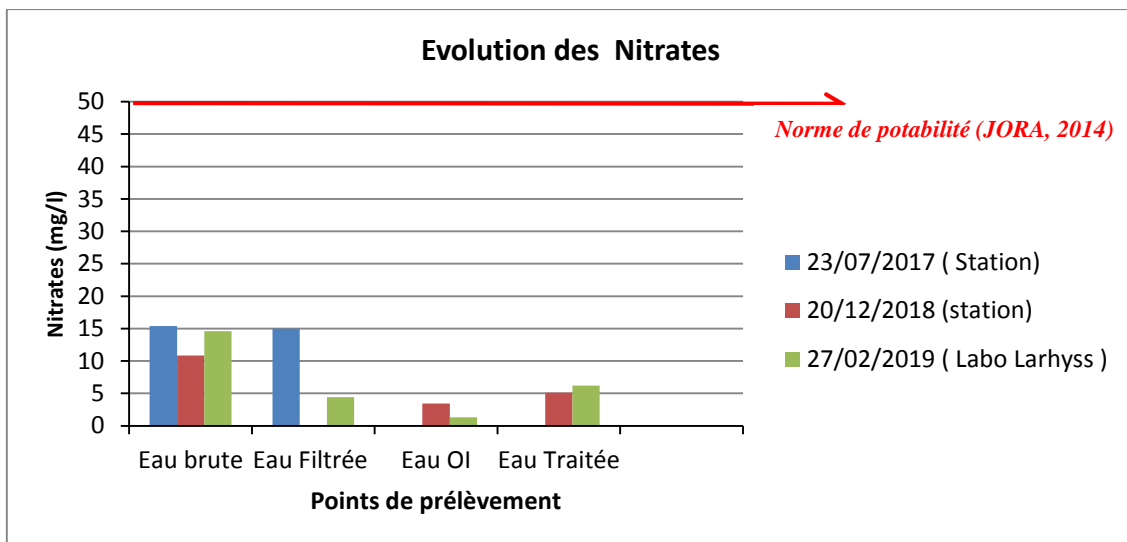


Figure 53 : Evolution des nitrates (NO_3^-) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

Les rendements obtenus d'élimination de nitrates à la sortie de la station sont globalement autour de 50 % et 100 % (Figure 54) permettant ainsi de réduire les concentrations initiales en nitrates à une concentration résiduelle de l'ordre 6 mg/L.

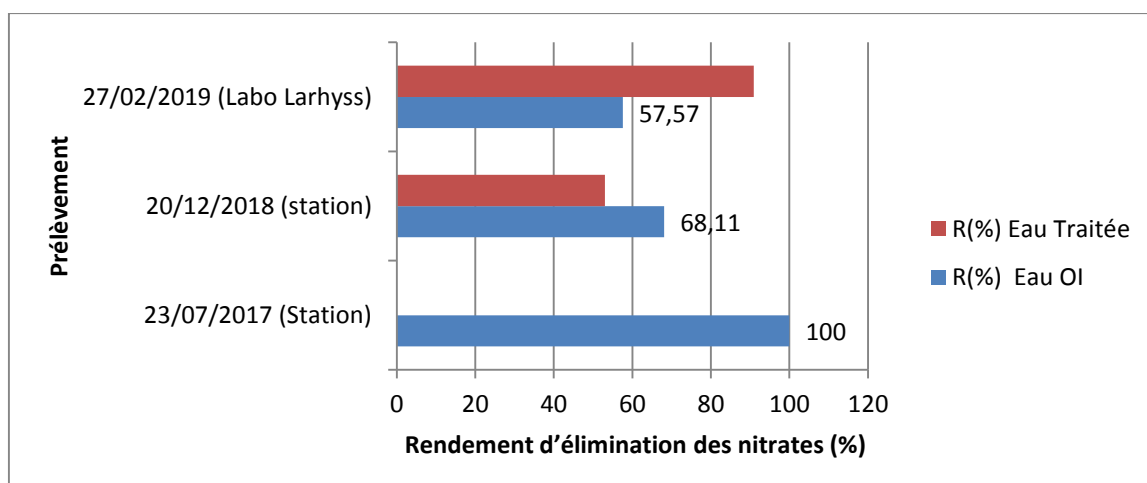


Figure 54 : Rendement d'élimination des nitrates (NO_3^-) pour les trois périodes de prélèvements.

III.3.6 Phosphates (PO_4^{3-})

Au vu des résultats des analyses physico-chimiques, nous avons pu remarquer que la teneur en phosphates (PO_4^{3-}) dans l'eau brute est conforme à la norme de potabilité (Figure 55) et elle devient plus élevée à la sortie de la station sans avoir dépasser la norme de potabilité. L'anti scalant utilisé (Chriwa AS200) est à base de poly phosphates. Ce produit est efficace et bon marché mais il peut éventuellement former des dépôts d'ortho phosphates par suite de phénomènes d'hydrolyse et la libération des phosphates dans l'eau. Rappelons que le point d'injection de l'antitartre est situé dans la conduite de refoulement vers les filtres fins avant l'arrivée de l'eau vers l'osmose inverse.

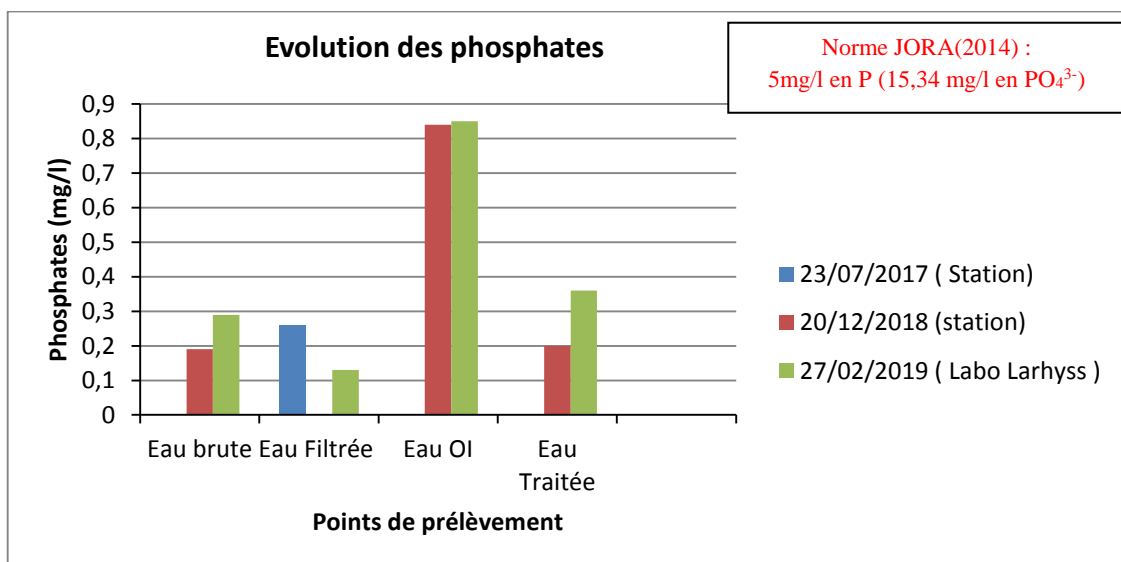


Figure 55 : Evolution des phosphates (PO_4^{3-}) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

III.3.7 Titre hydrométrique (TH)

La dureté totale (TH) dépend principalement de la somme de la concentration des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). La dureté de l'eau dépend essentiellement du contexte géologique. La potabilité d'une eau peut être estimée à partir des valeurs de son degré Hydrotimétrique (Rodier et al, 2009) comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : Classification de l'eau en fonction de la valeur de la dureté totale (TH (°F)) (Rodier et al, 2009).

Dureté totale (°F)	Qualité de l'eau
0-7	Eau très douce
7-14	Eau douce
14-22	Eau moyennement douce
22-32	Eau assez dure
32-54	Eau dure
> 54	Eau très dure

À partir des données des eaux analysées, nous constatons que les taux de TH pour les trois périodes de prélèvements varient entre 76 et 79,6 °F pour l'eau brute. Selon la classification du tableau 10 (Rodier et al (2009)), tous les échantillons d'eau analysés présentent des eaux très dures (TH > 54°F). Les conséquences d'une dureté élevée pour les usages domestiques sont le non moussage du savon, le bouchage des chauffe-bains et la formation des couches jaunes sur les baignoires, l'évier et autres (Tardat-Henry et Beaudry, 1984). La dureté totale diminue progressivement dans la chaîne de traitement jusqu'à une valeur aux alentours de 49 °F à 25 °F pour l'eau à la sortie de la station (eau traitée) (< norme de potabilité (50 mg/l)).

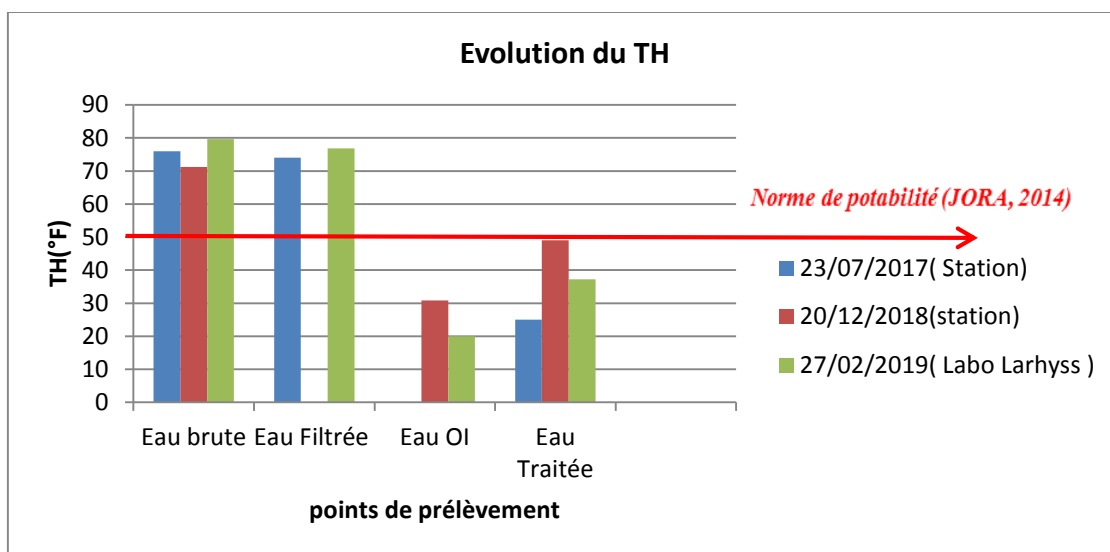


Figure 56 : Evolution de la dureté totale de l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

L'évolution du rendement d'élimination de la dureté totale (TH°F) par la station d'osmose inverse pendant les périodes de prélèvement a été suivies et les résultats sont présentés sur la figure 42. Il semble que l'élimination de la dureté est très efficace par l'osmose inverse, avec des rendements variant entre 50 % et 80 % (Figure 57).

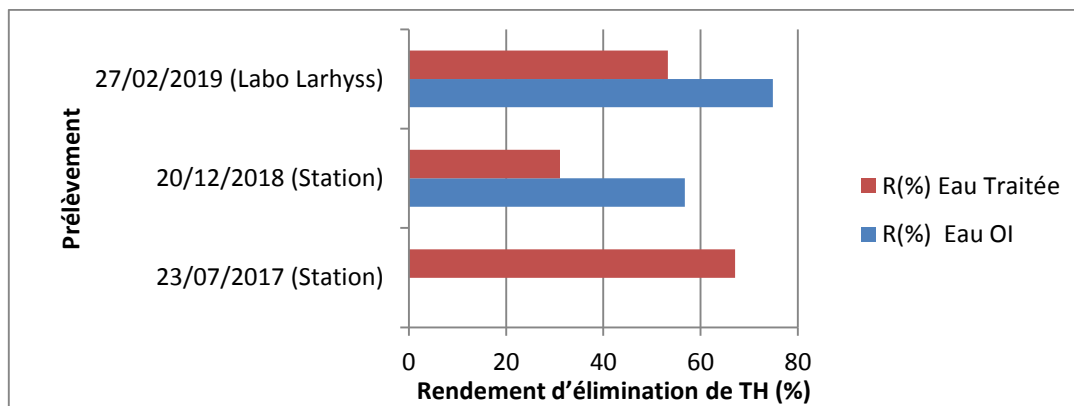


Figure 57 : Rendement d'élimination du TH de l'eau pour les trois périodes de prélèvement.

III.3.8 Calcium (Ca^{2+})

C'est un composant majeur de la dureté de l'eau (TH). Sa teneur varie essentiellement selon la nature des terrains traversés. Le calcium est trouvé en fortes concentration dans les eaux qui ont traversé des roches calcaires (Rodier, 1984). Les teneurs initiales mesurées du calcium pour l'eau brute pour les trois de prélèvements varient entre 148 et 210 mg/l (Figure 58). Ces résultats montrent que les trois analyses présentent des concentrations en calcium conformes à la norme algérienne de potabilité (200 mg/L) (JORA, 2014).

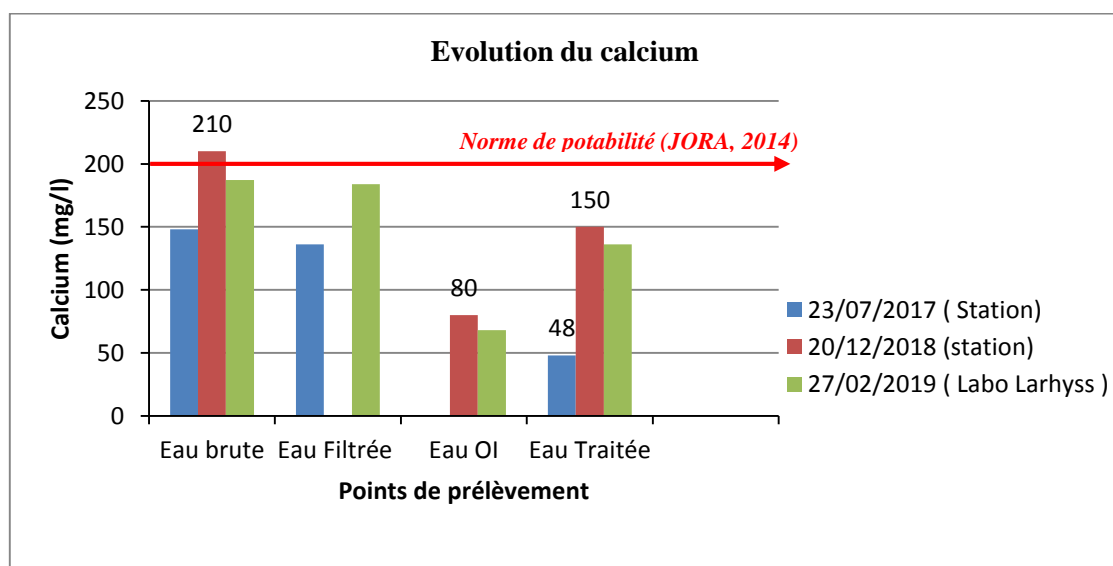


Figure 58: Evolution du calcium dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

Nous avons pu constater également (Figure 59) à la sortie de la station que les rendements d'élimination de calcium sont de l'ordre de 27 % à 57 % et les teneurs résiduelles en calcium sont faibles et varient entre 48 mg/L et 150 mg/l.

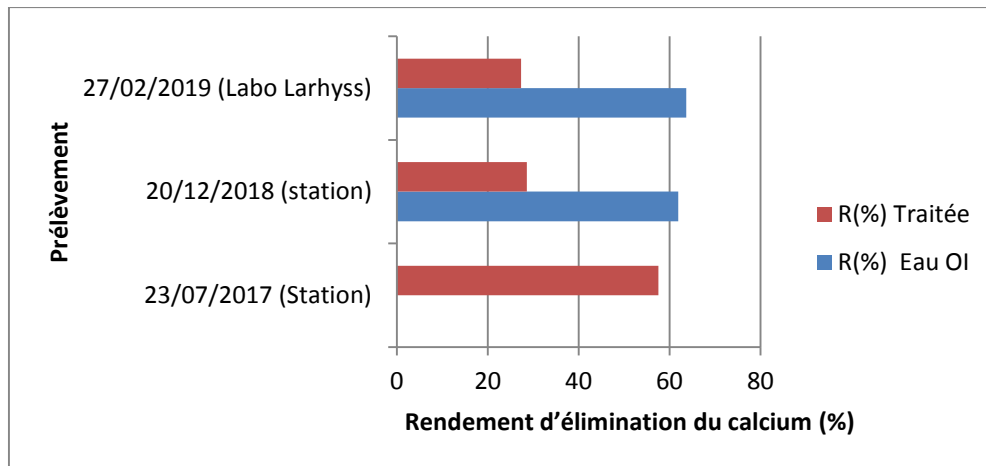


Figure 59: Rendement d'élimination du calcium de par l'osmose inverse pour les trois prélèvements.

III.3.9 Magnésium (Mg^{2+})

L'ion magnésium (Mg^{2+}) constitue un élément significatif de la dureté de l'eau, à partir d'une concentration de 100 mg/L il donne un goût désagréable à l'eau, sa teneur dans l'eau dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium ; magnésite et dolomite (Bremond et Vuichard, 1973). La figure 46 montre que les teneurs en magnésium des trois prélèvements de l'eau de forage varient entre 45 mg/l et 93 mg/l. Il n'existe pas une norme concernant cet élément dans le JORA (2014) ainsi dans le tableau de valeurs indiquées par l'OMS (2006). La comparaison de ces teneurs mesurées avec la concentration maximale admissible en magnésium selon la CEE (1975) montre que les deux échantillons du 23-07-2017 et du 27-02-2018 présentent des concentrations largement supérieures à la concentration maximale admissible de potabilité, qui est de 50 mg/L. D'après la figure 47, la station d'osmose inverse présente un rendement d'élimination du magnésium (Mg^{2+}) entre 40% et 90% avec des teneurs résiduelles en magnésium dans l'eau traitée inférieures à 50 mg/L pour les trois prélèvements.

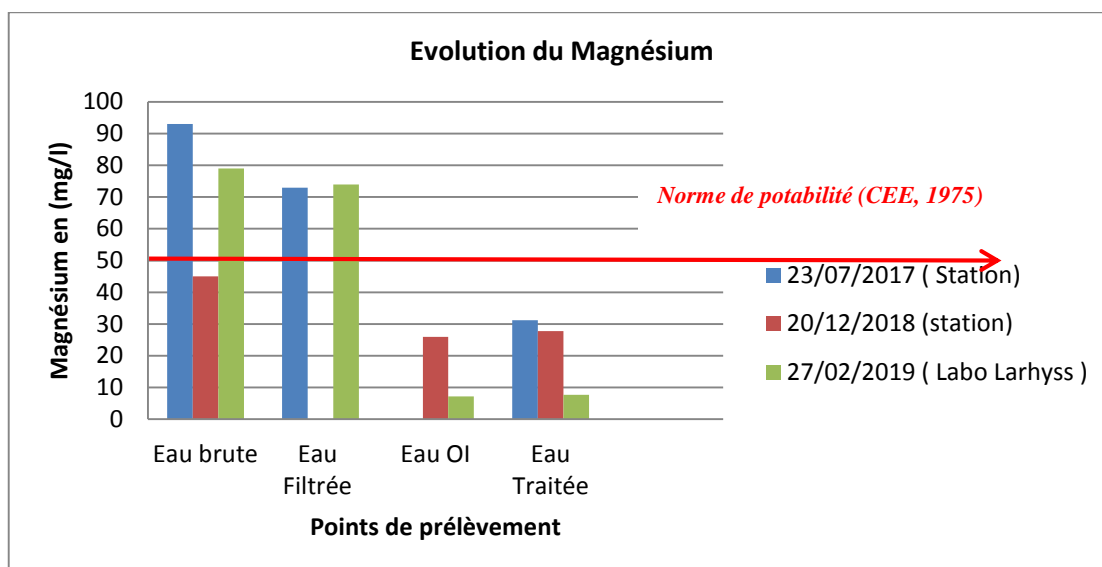


Figure 60: Evolution du magnésium (Mg^{2+}) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station

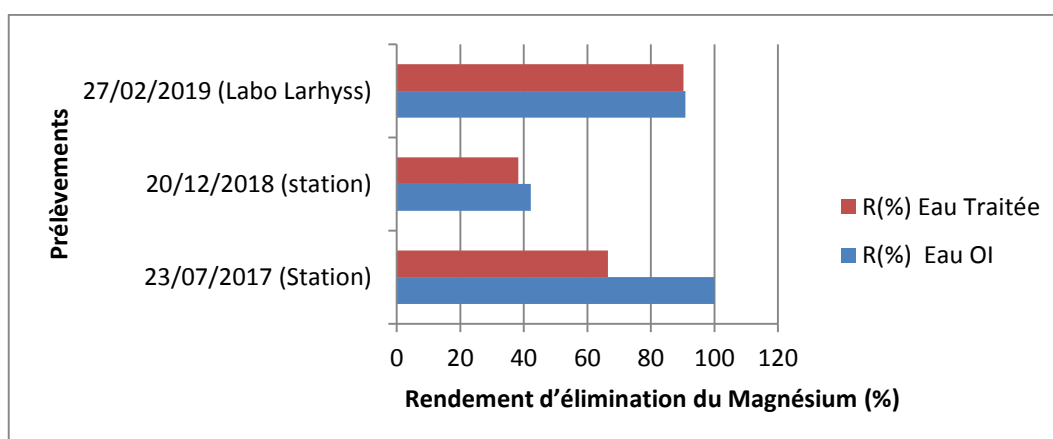


Figure 61: Rendement d'élimination du magnésium (Mg^{2+}) de l'eau de forage par osmose inverse pour les trois prélèvements.

III.3.10 Chlorure (Cl^-)

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres ions minéraux, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Cet élément peut être d'origine géologique et liée principalement à la dissolution des formations salifères ou anthropiques (Ouhmidou et al, 2015). Les teneurs de chlorure dans l'eau brute mesurées durant la période d'étude varient entre 610 mg/l et 702 mg/L et sont supérieures à la norme algérienne de potabilité (Figure 64) qui a été fixée à 500 mg/L (JORA, 2014).

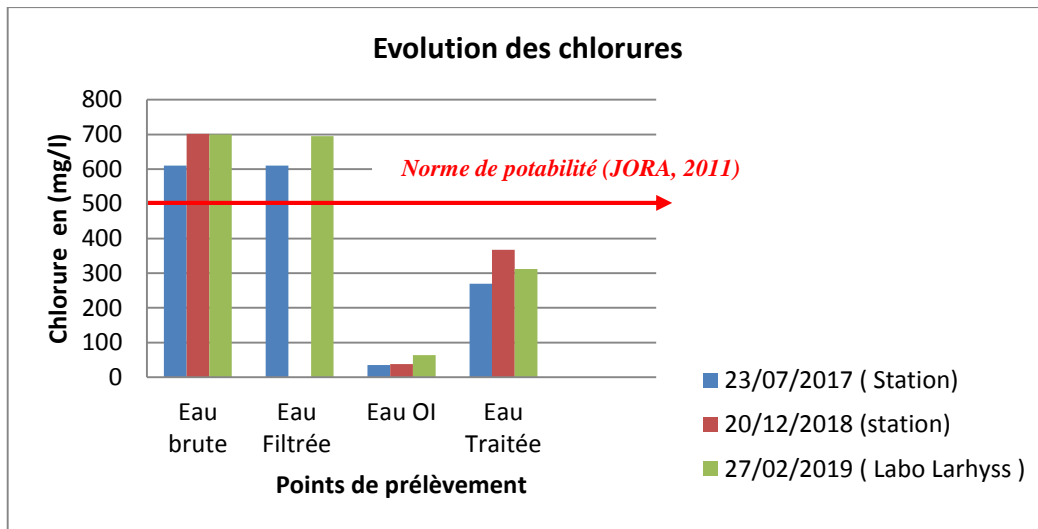


Figure 62 : Evolution des chlorures (Cl^-) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

D'après la courbe présentée sur la figure 63, nous constatons que les rendements d'élimination des chlorures obtenus à la sortie de l'osmose inverse varient entre 90% et 95 % et les concentrations résiduelles correspondantes en chlorures sont très inférieures à 500 mg/L pour l'ensemble des prélèvements.

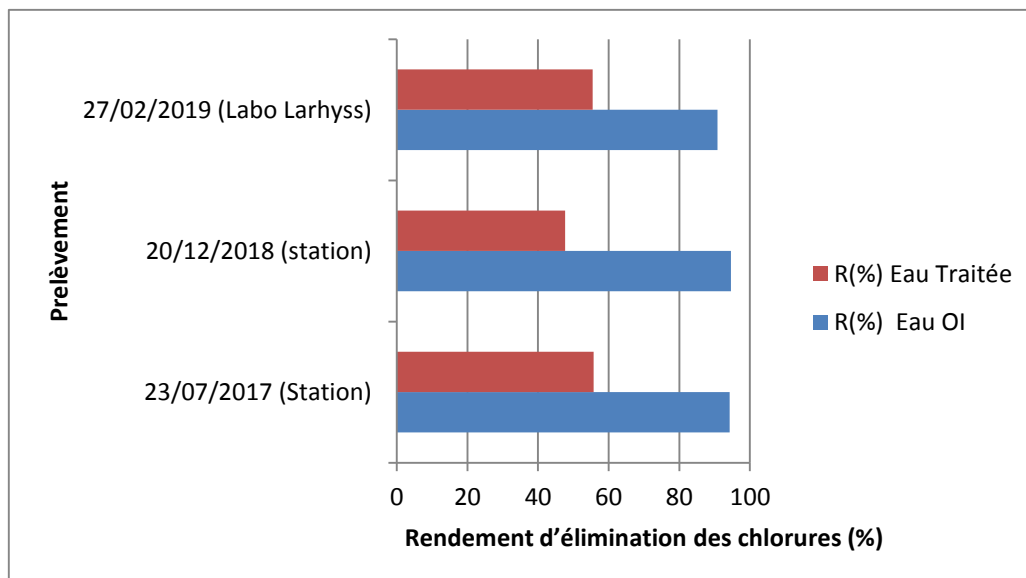


Figure 63: Rendement d'élimination des chlorures (Cl^-) de l'eau de forage par osmose inverse pour les trois prélèvements.

III.3.11 Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates sont des composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) où les sulfures entraînés s'oxydent au contact de l'air en sulfates (Bremond et Vuichard, 1973). Les eaux brutes prélevées sont très sulfatées avec des teneurs en sulfate variant entre 495 mg/l et 650 mg/L. Selon les normes algériennes des eaux destinées à la consommation humaine (JORA, 2014), la valeur indicative pour les sulfates est de 400 mg/L. Les concentrations observées, sont supérieures à la norme de potabilité (400 mg/L). Par ailleurs, les résultats présentés sur la figure 50 et 51 montrent que l'élimination des sulfates par le procédé d'osmose inverse est très efficace (Rendement > 90 %) et aboutit à des teneurs résiduelles en sulfates très faibles (3 à 7 mg- SO_4^{2-} /L) après l'étape de l'osmose inverse et sont largement inférieures à la norme de potabilité (JORA, 2014).

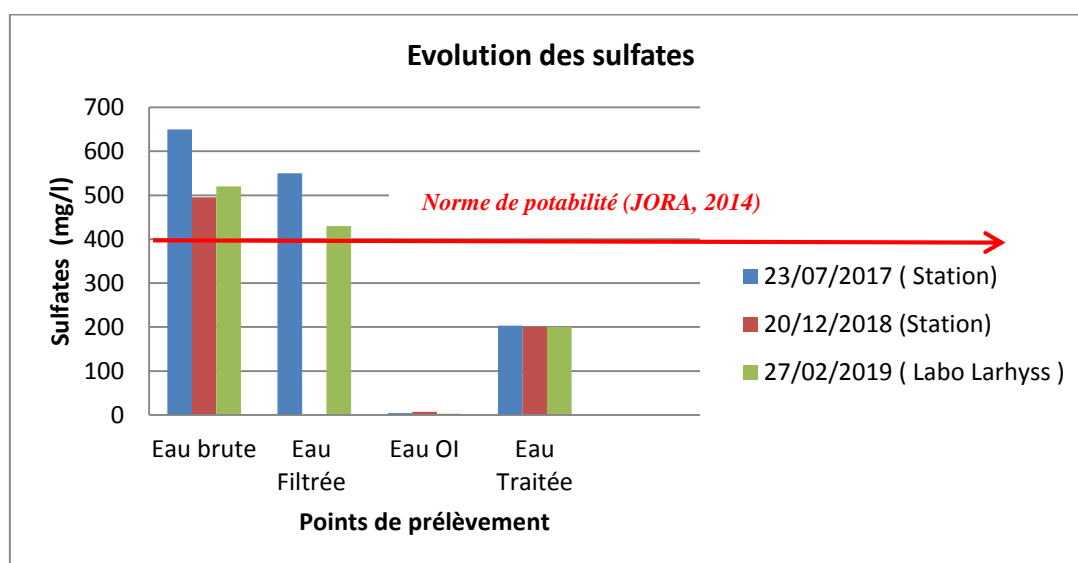


Figure 64 : Evolution de sulfates (SO_4^{2-}) dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

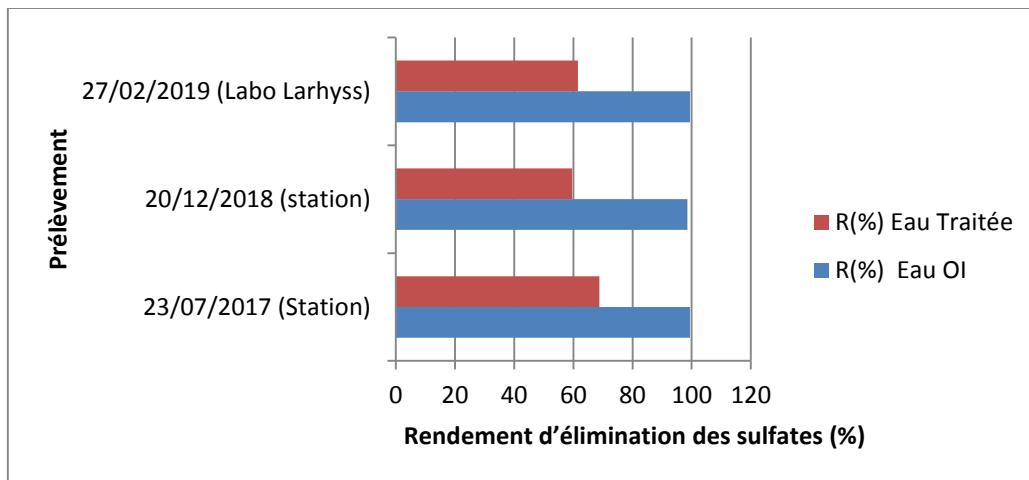


Figure 65 : Rendement d'élimination des sulfates (SO_4^{2-}) par osmose inverse pour les trois prélèvements.

III.3.12 Titre alcalimétrique complet (TAC)

La présence des ions bicarbonate dans les eaux naturelles est due à la dissolution des formations carbonatées (Calcite ou aragonite) par l'intervention de l'anhydride carbonique dissous dans l'eau et proviennent de l'air atmosphérique (Rodier, 2009). Pour l'eau de consommation, Les valeurs déterminées du TAC des eaux prélevées varient globalement entre 10 °F et 17,45 °F et sont supérieures à 6,5 °F valeur indicative pour les eaux dessalée ou déminéralisée (JORA, 2014) (Figure 66). En effet, d'après les résultats présentés sur la figure 53 nous pouvons constater que la technique d'osmose inverse est fiable pour l'élimination du TAC et les rendements obtenus varient entre 52 % à 95 %.

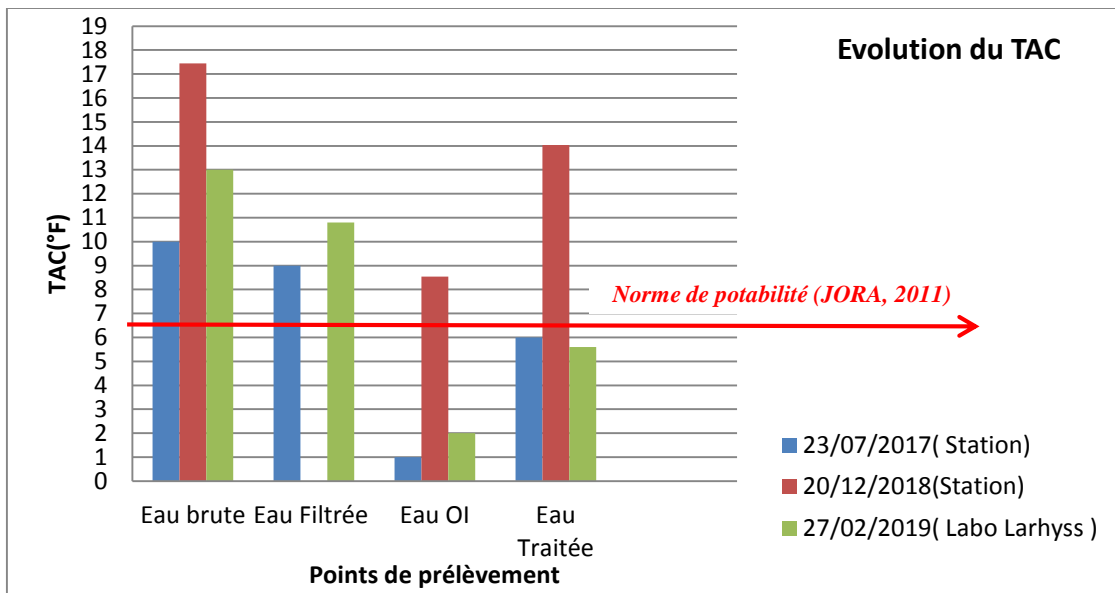


Figure 66: Evolution du TAC dans l'eau entre l'entrée et la sortie de la station.

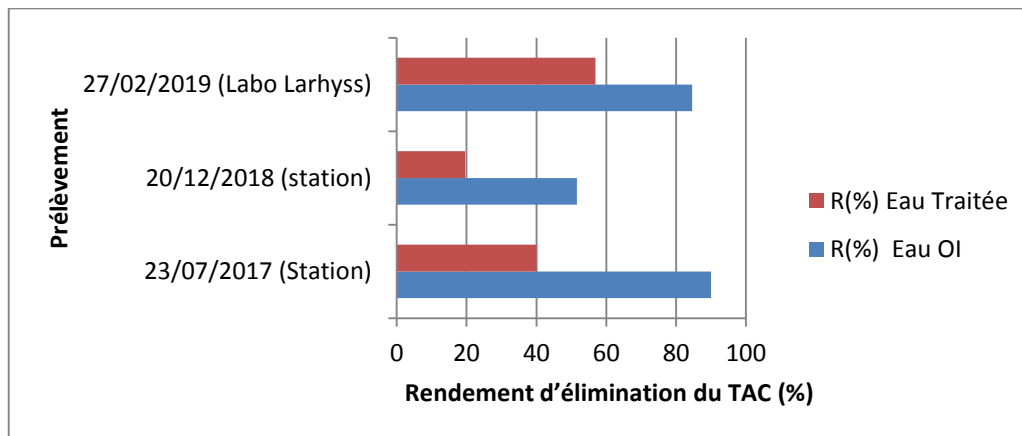


Figure 67 : Rendement d'élimination du TAC par osmose inverse pour les trois prélèvements

III.4 Résultats d'analyse de la saumure (eau à l'arrivée du bassin d'évaporation)

Les bassins d'évaporation (Figure 33) sont essentiellement conçus pour faire évaporer l'eau efficacement grâce à l'exposition au soleil.

Ces bassins reçoivent un débit moyen journalier de la saumure d'environ $Q_{\text{saumure}} \approx 6000 \text{ m}^3/\text{jour}$. En comparant nos résultats d'analyse de la saumure à ceux de l'eau brute et de l'eau à la sortie de la station de traitement (eau traitée), on peut distinguer une très forte concentration des éléments chimiques dans la saumure par rapport aux deux autres échantillons (Tableau 11).

Tableau 11 : Qualité des eaux à l'entrée des bassins d'évaporation
(Échantillons prélevés le 27-02-2019)

	pH	Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ⁻³ (mg/l)	TH (°F)	Ca ⁺² (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	TAC (°F)
Eau brute	7,51	2450	35	537	14,619	0,29	79,6	187,2	79	695,00	520	13
Eau Traité	7,49	1040	13	171	1,329	0,36	37,2	136	7,68	312,40	200	5,6
Eau à l'entrée des Bassins d'évaporation	7,79	17900	144	5760	10,8	49	500	1200	480	3274	4500	46,5

La cause de cette différence est due au fait que l'eau du bassin d'évaporation est remplie de produits chimiques résultant de différentes phases des processus de déminéralisation et de la concentration des sels à la sortie des osmoseurs.

Nous en concluons que ces eaux si elles sont rejetées directement dans la nature elles peuvent causer des effets indésirables sur la faune, la flore et le sol du milieu récepteur.

Dans la figure 68 on a pu résumer les paramètres qui contribuent aux effets néfastes sur l'environnement induits par la déminéralisation des eaux fortement minéralisées.

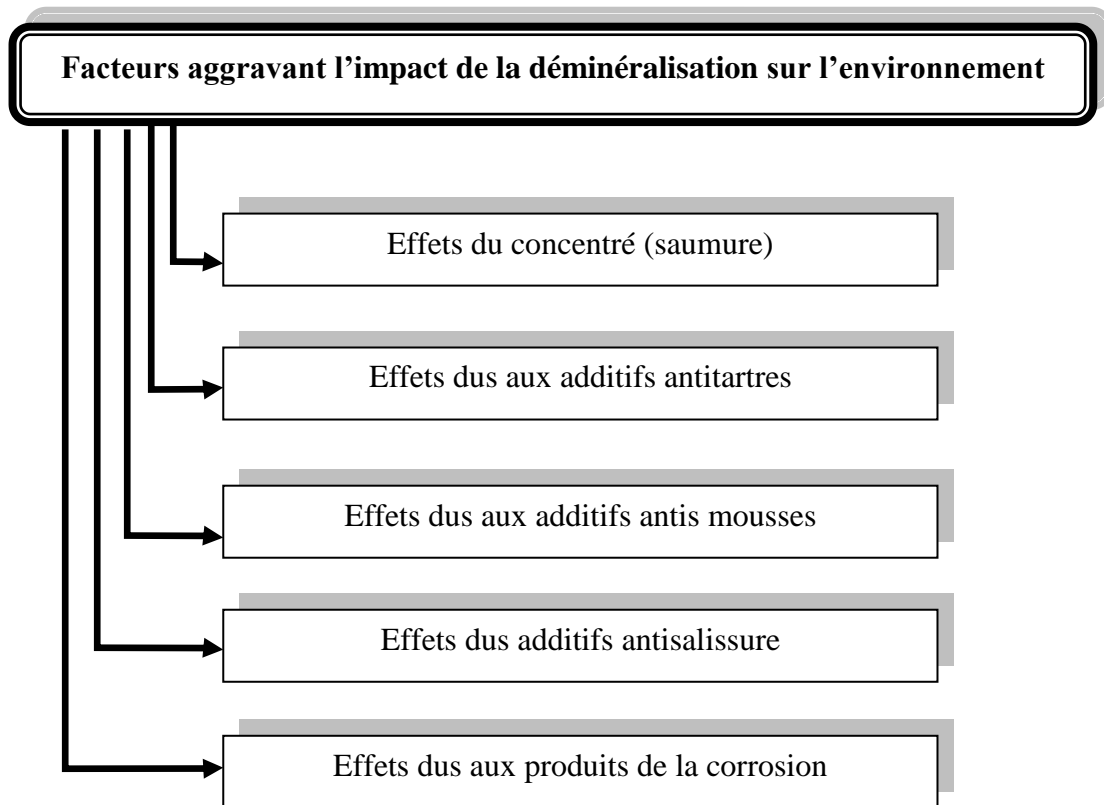


Figure 68 : Causes de la concentration de la saumure à la sorties des osmoseurs (Diagramme établi par l'auteur du mémoire à partir du document UNEP/MAP, 2003).

III.5 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer la performance de la station de déminéralisation des eaux de forages de la station de d'osmose inverse située à In Salah-wilaya de Tamanrasset. Cette étude a été possible par le suivi de l'évolution des différents paramètres de qualité physico-chimique des eaux des différentes étapes de traitement.

Le suivi de certains paramètres physico-chimiques (le potentiel d'hydrogène pH, la conductivité électrique de l'eau et les concentrations en K^+ , Na^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , TH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et TAC) a montré que l'eau à la sortie de la station de traitement des eaux est de très bonne qualité en comparant les valeurs mesurées pour chaque paramètre aux normes de potabilité. La technique de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse est une technique de choix qui nécessite une étude sérieuse pour la généralisée dans le territoire Algérien. Cela s'explique par l'efficacité :

- Du système de prétraitement appliqué.
- De l'entretien et du nettoyage permanent de l'installation.
- Des bonnes conditions techniques de fonctionnement des ouvrages.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude a été d'observer l'efficacité de déminéralisation des eaux par la technique d'osmose inverse. Ceci par le suivi de la qualité physico-chimique des eaux brutes et traitées au niveau de la station de déminéralisation des eaux des forages de la station de « In Salah ».

L'étude bibliographique est présentée en deux chapitres. Le premier chapitre a permis de donner une synthèse bibliographique sur la situation de l'eau en Algérie (Actuelle et avenir). Le deuxième chapitre a permis de donner une synthèse bibliographique d'une généralité sur les techniques et les procédés existants qui sont pratiqués à l'échelle industrielle pour le dessalement et de la déminéralisation des eaux,

La filtration sur membrane est une technique de séparation qui fait intervenir une membrane semi-perméable et sélective sous l'effet d'une force motrice. Cette force motrice peut être soit un gradient de pression (cas de l'osmose inverse (OI), de la nano filtration (NF), d'Electrodialyse (ED), Le procédé de déminéralisation par osmose inverse est une technique de filtration membranaire. Il est utilisé pour le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres. Il en ressort également que dans le Sud Algérien la déminéralisation des eaux fortement minéralisées est un sujet préoccupant actuellement, et penser à réaliser des unités de déminéralisation devient jour après jour une nécessité car il permet la satisfaction des besoins des consommateurs en eau potable. Selon la synthèse réalisée sur les données existantes sur les stations de dessalement des eaux en Algérie, il semble que notre pays a une bonne expérience dans le domaine de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres par adaptation de la technique de l'osmose inverse.

L'étude expérimentale que nous avons réalisée a été structurée en trois chapitres. Nous avons commencé par la description des différentes étapes de traitement au niveau de la station de déminéralisation des eaux des forages de champs de captant « In Saleh » Ensuite nous avons donné une idée sur le mode opératoire pour la détermination des paramètres physico-chimiques des échantillons prélevées après différentes étapes de traitement.

Les résultats des essais d'analyses physico-chimiques a permis de faire les conclusions suivantes:

- Le rendement de l'abaissement de la conductivité électrique à la sortie de l'osmose inverse dépasse 90% avec une concentration des éléments minéraux qui nécessite une reminéralisations ultérieure (un mélange de l'eau osmosée et l'eau filtrée à un rapport respectivement de 75% et 25%).
- L'eau à la sortie de la station de traitement des eaux est de très bonne qualité en comparant les valeurs mesurées pour chaque paramètre aux normes de potabilité. A titre d'exemple :
 - Le rendement d'élimination du sodium de l'eau a été supérieur à 90 %
 - Le rendement d'élimination de la dureté totale (TH) dépasse 50%.
- La technique de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse est une technique de choix qui nécessite une étude sérieuse pour la généralisée dans le territoire Algérien.

Références bibliographiques

Références de la partie bibliographique

- **Amitouche. M (2016).** Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.
- **Ahmouda I et Biaa H (2016).** Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer cas de "Les Dunes" Oran, Mémoire de Master, université de Larbi tebssi – tebessa.
- **Arnaud H (2007).** Mise au Point de Procédés Membranaires Pour L'étude de La Matière Organique Dissoute en Milieux Côtiers, Thèse de doctorat, Spécialité : chimie analytique et environnement, Université Bordeaux 1.
- **Algérienne des Eaux (ADE) (2019)** .web site: [www.ade.dz].
- **Baha S et Bensari F (2014)** . épuration des eaux usées domestique par les boues activées : étude de la performance de la STEP d'Ain el houtz, Mémoire de Master, Université de Abou bekrbelkaid –Tlemcen.
- **Bechki. D (2011).** Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, Thèse de doctorat, Génie Mécanique, Université Hadj Lakhdar Batna.
- **Benaissa F (2013).** Etude sur le procédé d'osmose inverse pour le dessalement des eaux faiblement saumâtres, Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.
- **Bikai J (2015).** Etude de l'évolution des propriétés de surface d'un matériau minéral à porosité contrôlée lors de sa mise en œuvre dans des tests d'ultra/nano filtration, Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace.
- **Bourouga M (2015).** Déminéralisation des eaux de forage de la région d'Ouled abbès et son impact sur l'environnement (Souk-Ahras, extrême nord-est algérien), Mémoire de magister, Université badji mokhtar-Annaba.
- **Bouchedja A (2012)** . «La politique Nationale de Léau en Algérie », directeur général de l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinois- Seybousse -Mellegue (ABHCSM), EURO-RIOB 2012 :10^{ème} conférence internationale, Istanbul-Turquie - 17au 19 Octobre 2012.
- **Bouainah M (2015).** Problèmes de l'eau en Algérie, Mémoire de Master en Hydraulique, option Hydraulique urbaine, Université Mohamed Khider – Biskra.

- **Berlan JM et 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 rural et de la forêt- France.
- **Belhaouari B et Belguermi A et Achour T (2017)**. Protection des eaux de surfaces continentales en Algérie : quelle stratégie faut-il adopter pour les dix prochaines années ?, Office des publications universitaires, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31, Sept 2017.
- **Dahmani FZ (2017)**. Etude computationnelle de la déminéralisation des eaux par osmose inverse, Mémoire de Master, filière chimie, option chimie physique et analytique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.
- **Degrémont Suez (2005)**. « Mémento technique de l'eau 2^{ème} édition Tome1 » ; Lavoisier-Lexique technique de L'eau, Paris, ISBN 2-7430-0717- 6.
- **Dridi A (2018)** . Commande et supervision par API d'une unité d'osmose inverse, Mémoire de master, Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra.
- **Fathalli B (2011)**. Influence des paramètres opératoires sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse, Master professionnel source alternatives en eau. Ecole national des ingénieurs de Tunis.
- **Fezzani Ch (2003)**. «Système Aquifère du Sahara Septentrional», gestion commune d'un bassin transfrontière, 1^{er} édition, rapport de synthèse- janvier 2003, observatoire du Sahara et du sahel(OSS), ISBN : 9973-856-03-1.
- **Fidali S (2008)**. Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales, Mémoire de magistère, Génie Mécanique, Université Hadj Lakhdar Batna.
- **Issaadi M et Khebat A (2015)**. Contrôle du procédé combiné osmose inverse-électro dé ionisation CEDI par analyses physicochimiques des eaux de process de CEVITAL.
- **Kameche H et Madani K (2017)** . Gestion de la saumure de dessalement – cas de la station de cap-djinet – wilaya de Boumerdes, Thèse de Master, Université de M'hamed bougara Boumerdes.

- **Ladjal R (2013)**. Problématique de la mobilisation et de la préservation des ressources hydriques dans le Sersou (Bassin Cheliff amont Boughzoul), Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen.
- **Mandri Y (2011)**. Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, Thèse de doctorat, génie des procédés Université Claude Bernard Lyon 1.
- **Maurel A (2006)**. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, 2^{ème} édition Tec et Doc Lavoisier, ISBN- 10: 2-7430-0890-3.
- **Noureddine N (2008)**. Etude d'impact des rejets des déminéralisations de Brédeah sur L'environnement, Mémoire de Master, Université Es-Sènia –Oran, Algérie.
- **Patrick D (2003)**. « dessalement de l'eau de mer » Ingénieur ENSIA Ancien Chef de Projet chez Degremont, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, J2700.
- **PUNE/MAP (United nations Environment Programme/ mediterranean action plan). (2003)**. Dessalement de l'eau de mer en méditerranée: évaluation et lignes directrices. de la Série des rapports techniques No. 139, Athènes.
- **Ray Mond Desjardins (Janvier 1990)**. « le Traitement des eaux ».2^{ème} édition Tec et Doc Lavoisier, ISBN 2-553-00643-8. et revue et améliorée, L'école polytechnique de Montréal.
- **Remini B (2010)**. La Problématique de L'eau en Algérie du Nord, Office des publications universitaires, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010.
- **Samaké O (2016)**. Analyse Thermo-Économique d'un Système de Dessalement par Thermo compression de vapeur et conception de L'éjecteur, Thèse de doctorat(Ph.D), génie mécanique, Université de Sherbrooke (Québec) Canada.
- **Senhadji M (2017)**. «Teneurs en bore, nitrites et métaux lourds dans l'eau dessalée traitée par osmose inverse dans la Station de Dessalement de Souk Telata, Mémoire de master, Université de Tlemcen.
- **Si Mohammed F (2013)**. Etude expérimentale de l'efficacité d'une membrane en film mince de type spirale pour le dessalement des eaux saumâtres, Mémoire de projet de fin d'Etudes, Mémoire de master en Hydraulique, Option : Technologies de Traitement des Eaux, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.

- **Tata F (2009)**. Dessalement de Léau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; analyse critique en fonction des contextes, Synthèse technique, Office international de l'eau, Agro Parise Tech.
- **Violleau V(1999)**. Déminéralisation par électrodialyse en présence d'un complexant application au lactosérum, Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- **Zemali S (2004)**. Comparaison entre l'osmose inverse et ultrafiltration pour le dessalement de l'eau de forte concentration en sel, Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen.
- **Zitouni W (2013)**. L'influence de la technique d'échange d'ion sur l'amélioration de la qualité des eaux épurée de la STEP d'Ain El Houtz. Mémoire de master, Université de Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.
- Web Site: [<http://physiogeo.revues.org>].
- Web Site: [<https://www.ecotoxicologie.fr>].
- Web Site: [<https://www.alposmose.com/arti..>].
- WebSite: [[http://www.fumatech.com/EN/Membrane-technology/Membrane processes/Nanofiltration/.](http://www.fumatech.com/EN/Membrane-technology/Membrane%20processes/Nanofiltration/)]

Références de la partie expérimentale

- **Bremond R., Vuichard R. (1973).** Paramètres de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEPE, Paris, 179.
- **CEE (1975).** Normes européennes de potabilité des eaux CEE, Web Site: [<https://hydrologie.org/MISC/gest/norpotab.htm>].
- Manuel d'exploitation Pour unité d'osmose inverse, Système: [CHRIWA, Le : 01-11-2016, Pour: ADE-In-Salah.].
- **JORA (Journal Officiel de la République Algérienne). (2014).** Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine. Décret exécutif N° 13 du 7 Jomada El Oula 1435 ; 9 mars 2014. Imprimerie Officielle. Les Vergers : Bir-Mourad Raïs. Alger. Algérie.
- **Levallois P., Phaneuf D. (1992).** Risques associés à la contamination de l'eau potable par les nitrates, Réseau de la santé publique du Québec, Bulletin d'information en santé environnementale, Vol.3, Iss.3, pp. 1-3.
- **Nouayti N, Khattach D, Hilali M. (2015).** Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc). Journal of Materials and Environnemental Science. J. Mater. Environ. Vol 6, N° 4, pp.1068-1081.
- **OMS, (2006).** Directives de qualité pour l'eau de boisson, troisième édition. Recommandations. Organisation mondiale de la Santé, Genève, 78 p.
- **Ouhmidou M, Chahlaoui A, Kharroubi A, Chahboune M. (2015).** Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage Hassan Addakhil d'Errachidia (Maroc). Journal of Materials and Environnemental Science. J. Mater. Environ. Vol 6, N° 6, pp.1663-1671.
- **Queneau P., Hubert J. (2009).** Place des eaux minérales dans l'alimentation. Rapport de l'académie national de médecine. Société française de l'hydrologie et climatologie médicale. France, pp.175- 220.
- **Rejsek F. (2002).** Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques, Collection biologie technique, Série Sciences et techniques de l'environnement. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.
- **Rodier J. (1984).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7ème édition, Ed. Dunod- Paris.

- **Rodier J., Legube B., Merlet N ; Coll. (2009).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9ème édition (Entièrement mise à jour), Ed. Dunod, Paris-France.
- **Tardat-Henry M ., Beaudry J. P. (1984).** Chimie des eaux, Ed. Le griffon d'Argile INC- Canada.