

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Licence Sciences et Techniques

Département de Géologie

Eau et Environnement

(LST - E.E)

**Essais de nouveaux matériaux pour le
dessalement d'eau saumâtre : cas de
pouzzolane (basalte d'Ourika)**

Réalisé par :

Ouiaam Lahnik

Fatima Ezzahra El Hidaoui

Encadré par :

Mr L.Daoudi (FSTM)

Mr A. Hajajj (CNERE)

Soutenu le : 28/06/2019

Dédicace

A nos très chers parents,

Rien au monde ne pourrait compenser les sacrifices que vous avez consentis pour notre éducation et notre bien-être, veuillez trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et vos efforts.

A nos chers frères et sœurs,

Pour l'amour et le respect qu'ils ont toujours octroyés...

A nos enseignants & professeurs,

Pour leur patience, dévouement et sacrifice.

A nos chers amis,

Pour leurs patiences et leurs soutiens qu'ils n'ont cessés d'apporter au cours de cette formation.

Remerciements

Ce n'est pas par coutume mais par reconnaissance que nous tenons à exprimer notre reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont aidés et Soutenus tout au long de notre travail. Nous remercions notre encadrant Mr. Daoudi professeur à la faculté des sciences et techniques de Marrakech, département des sciences de la terre pour son encadrement pédagogique très consistant ainsi que pour l'intérêt avec lequel il a suivi la progression de notre travail, pour ses conseils efficaces, ses judicieuses directives. Nous exprimons une gratitude toute particulière à Mr. Hajajj notre encadrant au Centre Nationale d'études et de recherches sur l'Eau et l'Energie pour nous avoir donné l'opportunité de passer ce stage dans les meilleures conditions de professionnalisme, matérielles et morales, et pour ses directives et conduites dont elle nous avait épargnée à chaque fois qu'elle était sollicitée. Nos chaleureux remerciements vont également à Mr. Brahim Igmoulan, responsable de notre formation. Nos vifs remerciements s'adressent à Mme. Laila Mandi Directrice du Centre Nationale d'Etudes et de Recherches sur l'Eau et l'Energie et à l'ensemble du personnel de laboratoire du CNEREE pour ses efforts à chercher des matériels de travail et ses orientations pédagogiques. Nous devons une mention bien spéciale à tous les enseignants du département de la terre de la FSTG Marrakech. Enfin, nous tenons à exprimer notre sincère et profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Table de Matières

Introduction :.....	1
Partie I : Synthèse bibliographique.....	2
I. Généralités sur les eaux saumâtres.....	2
I.1. Définition des eaux saumâtre	2
I .2 Notion de salinité.	2
II. TECHNIQUES DE DESSALEMENT :.....	3
II.1. Principe de dessalement :.....	3
II.2. Procédés de distillation :.....	4
II.2.1. La distillation :.....	4
II.2.2. La distillation Multi-Flash :.....	4
II .2.3. La distillation à Effets Multiples :	5
II.2.4. Avantages et inconvénients de la distillation :.....	6
II.3. Procédés membranaires :.....	7
II.3.1. L'osmose inverse :.....	7
II.3.2 L'Electrodialyse :.....	9
II.3.3. La nanofiltration :.....	11
Partie II : la technique d'étude.....	13
I. Présentation de la technique :.....	13
II. Les compositions de filtre imbriqué :.....	13
III. Exemples des matériaux naturels pour le dessalement :.....	15
III.1. Les zéolithes :.....	15
III.2. L'argile :.....	16
IV. Introduction de pouzzolane au système (MSL).....	17
IV.1.Généralités sur La pouzzolane :.....	17
Partie III : Techniques d'analyses et Paramètres étudiés.....	20

I. Prélèvement des échantillons d'eau :	20
II. Matériels et méthodes :	20
III. Analyses physico-chimique	24
IV. Analyse géochimie pour la caractérisation de pouzzolane :	27
Partie IV : Résultats et discussions	29
I. La composition géochimique de pouzzolane :	29
II. Etude de la réduction en fonction la masse de la pouzzolane :	30
III. Etude de la réduction en fonction La taille de la pouzzolane:	34
IV. Etude de la réduction en fonction La concentration de Na Cl:	36
V. Etude de la réduction de Na ⁺ en fonction de la température d'activation de pouzzolane: .	39
VI. Etude de La réduction de Na ⁺ dans les conditions optimales de la da pouzzolane :	41
Conclusion et perspective :	43
Annexe :	44

Liste des figures et tableaux :

Figure 1: Principe de distillation multi-flash (WordPress).....	5
Figure 2: Procédé de distillation à effet multiple (WordPress)	6
Figure 3: Procédé d'osmose inverse (WordPress)	8
Figure 4: Principe d'électrodialyse (WordPress)	11
Figure 5: Principe de nanofiltration (WordPress)	12
Figure 6: Structure de filtre imbriqué. (Latrach, 2014)	14
Figure 7: la composition de filtre imbriqué.....	14
Figure 8: Poudre naturel de la zéolite vue au microscope électronique à balayage. (Wibowo, 2017)	15
Figure 9 : La pouzzolane naturelle.....	17
Figure 10: Appareillage pour le test de batch.....	20
Figure 11: Série de dilution	22
Figure 12 : Photo d'un conductivimètre	25
Figure 13 : Photo du photomètre de flamme.....	26
Figure 14 : Appareil XRF portable.....	27
Figure 15: la réduction de Na ⁺ pour 3g de pouzzolane.....	29
Figure 16: la réduction de Na ⁺ pour 6 g de pouzzolane.....	30
Figure 17: la réduction de Na ⁺ pur 9g de pouzzolane.....	31
Figure 18: les rendements des différentes doses de pouzzolane.....	32
Figure 19: le pourcentage de réduction pour pouzzolane 3mm-5mm.....	33
Figure 20: le pourcentage de réduction du Na Cl pour pouzzolane de 800µm ϕ <math>< 1.25</math>.....	34
Figure 21: le pourcentage de Na ⁺ pour la pouzzolane de différents diamètres.....	35
Figure 22: la réduction de Na ⁺ pour 1g/L de Na Cl.....	36
Figure 23: la réduction de Na ⁺ pour 2g /l de NaCl.....	36
Figure 24 : la réduction de Na ⁺ pour l'eau saumâtre.....	37
Figure 25: la réduction de Na ⁺ pour la pouzzolane activée.....	39
Figure 26 : pouzzolane activé.....	40
Figure 27 : la réduction de Na ⁺ pour la pouzzolane activée à 150° C.....	41
Figure 28 : Photo de broyeur.....	43
Figure 29 : photo des tamis de diamètre 3mm et 5mm.....	44
Figure 30: la pouzzolane avec 2 diamètres de 800µm ϕ <math>< 1.25</math>mm et 3mm ϕ <math>< 5</math>mm.....	44
Figure 31: photo de la pouzzolane rincée.....	45
Figure 32: photo de la gamme étalon utilisée.....	45
Figure 33: photo de la spectrophotométrie à flamme.....	46

Tableau 1:Classification des eaux selon leur salinité.....	3
Tableau 2:les expériences pour différentes doses de pouzzolane non activé.....	20
Tableau 3:les expériences pour la pouzzolane activé	21
Tableau 4:les expériences de différentes concentrations de Na Cl avec pouzzolane non activée.....	21
Tableau 5:l'expérience d'eau saumâtre avec pouzzolane activé.....	21
Tableau 6:les expériences de différent diamètre de pouzzolane non active.....	22
Tableau 7:Différentes conductivité des eaux	25
Tableau 8 : la caractérisation de pouzzolane.....	28
Tableau 9: les conductivités, les ph et les températures des solutions de 3 g, 6g et 9g de pouzzolane	31
Tableau 10 : Le pourcentage et le rendement des différentes expériences	32
Tableau 11: les conductivités, les Ph, et les températures des solutions de pouzzolane de déférente granulométrie	34
Tableau 12: les conductivités, les Ph, et les températures des solutions de pouzzolane de différente granulométrie.....	37
Tableau 13 : Le pourcentage et le rendement pour les différentes concentrations de Na Cl	38
Tableau 14: conductivité, pH et température pour pouzzolane activé	39

Liste des abréviations

MES : Matière En Suspension

MSL : Multi Soil Layering (filtre imbriqué)

ppm : partie par million

pH : Potentiel d'hydrogène

TDS : Total Dissolved Solids (Total de la matière solide dissoute)

XRF : X-Ray Fluorescence (Fluorescence rayon x)

ϕ : Diamètre

Δ : Variation

$\mu\text{S/cm}$: Microsiemens /centimètre

μm : Micromètre

Rs : Réduction de salinité

R : rendement en mg/g de réduction de Na^+

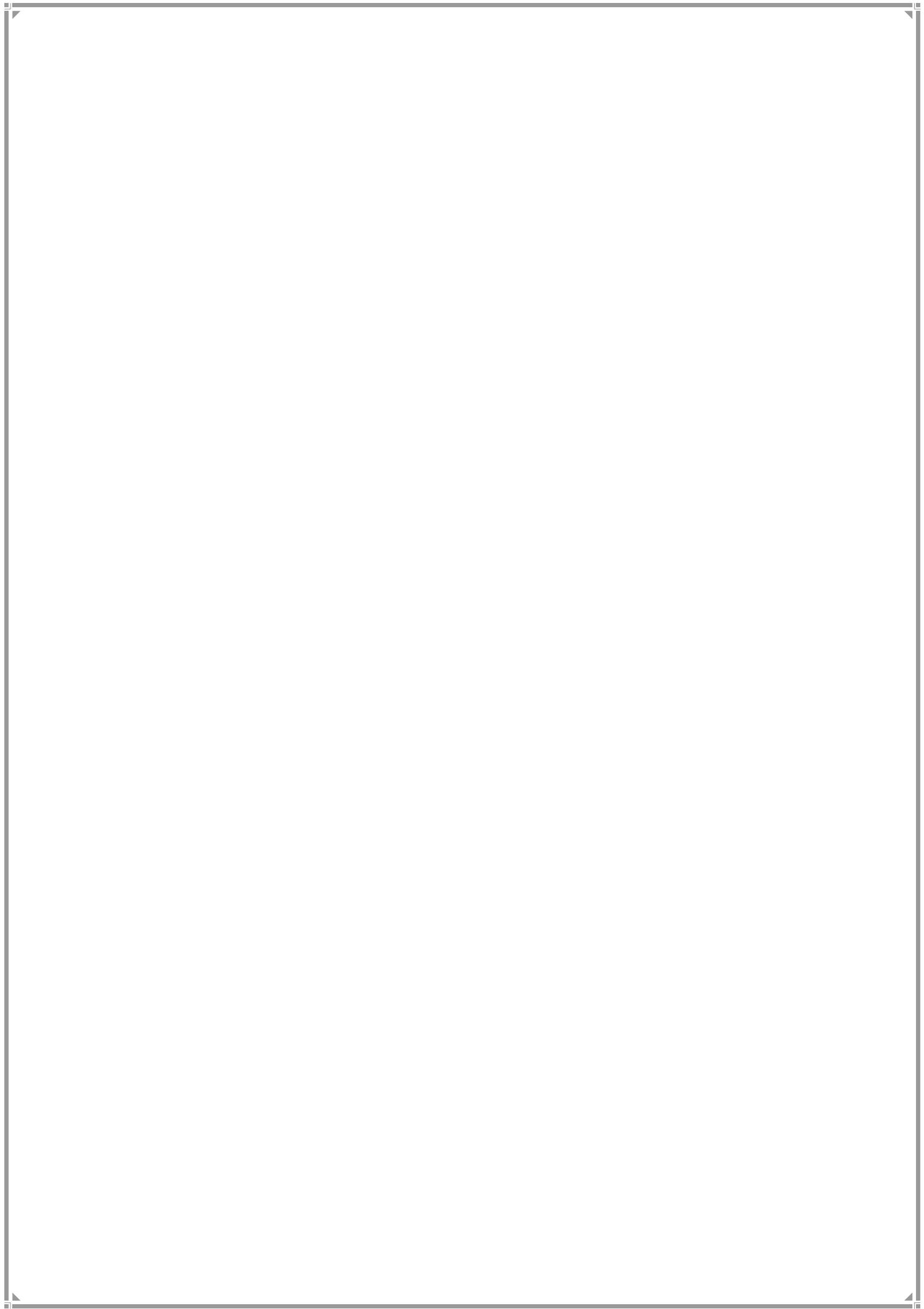
Avant propos :

- ❖ Présentation du Centre National d'études et de Recherche sur l'eau et l'énergie (CNEREE) :

Créé dans le cadre du plan quinquennal de développement économique et sociale 2000-2004 par le ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur, de la formation des cadres et de la recherche scientifique. Le centre national d'études et de recherches sur l'eau et l'énergie (CNEREE) s'inscrit dans le cadre de la politique générale de l'université Cadi Ayyad pour s'intégrer dans l'espace socio-économique de pays et de traduire une volonté d'accompagner les efforts de développement accomplis et de faire de l'université un instrument d'épanouissement technologique et socioéconomique.

- ❖ Missions et objectifs de CNEREE :

- Promouvoir la recherche dans le domaine de l'eau et des énergies renouvelables.
- Développer une expertise dans le domaine de l'eau et des énergies renouvelables.
- Entretenir une collaboration avec les organismes intervenants dans le domaine de l'eau et de l'énergie pour assurer un transfert efficace de la technologie.



Introduction :

L'eau joue un rôle important dans toutes nos activités quotidiennes et sa consommation augmente de jour en jour en raison de l'amélioration du niveau de vie de l'humanité. Certaines régions du globe sont soumises à de graves tensions en raison de la rareté de l'eau et de sa pollution.

L'eau douce (qui contient peu de sels dissous, peu de matières solides dissoutes et en outre peu de calcaire contrairement à l'eau de mer et à l'eau dure) est essentielle à la vie, c'est pourquoi on doit se préoccuper des problèmes d'approvisionnement en eau douce pour notre survie. En effet, une personne sur six souffre du manque d'eau potable à l'échelle de la planète, et ce chiffre devrait atteindre le tiers de la population en 2025. Les causes de ce problème sont multiples :

- le réchauffement climatique à l'origine de la sécheresse.
- la surconsommation et le gaspillage de l'eau.

Les besoins en eau douce de l'humanité ne peuvent être entièrement satisfaits que si l'eau salée disponible en abondance est convertie en eau potable par dessalement. (Sharon et Reddy, 2015). Pour faire face à la menace de la crise de pénurie d'eau dans le monde et la demande croissante, les collectivités se tournent vers le dessalement comme stratégie importante pour compléter les sources d'eau douce de plus en plus rares et pour assurer la fiabilité et la qualité de l'eau saumâtre. Le dessalement de l'eau de mer est une source indispensable d'approvisionnement en eau douce dans de nombreuses régions du monde.

Plusieurs techniques sont utilisées pour le dessalement de l'eau, parmi ces techniques on cite la distillation à effets multiples (MED), La distillation Multi-Flash (MFD), osmose inverse (RO), électrodialyse (ED) et nano-filtration. Ces technologies ont permis de produire une eau douce d'une grande pureté. L'une des techniques également utilisée est le dessalement par des matériaux naturels intégrés dans le système filtre imbriqué.

L'objectif de notre projet de fin d'étude, est d'innover le pilote filtre imbriqué, et d'introduire de nouveaux matériaux permettant le dessalement des eaux saumâtres.

Partie I : Synthèse bibliographique

I. Généralités sur les eaux saumâtres

I.1. Définition des eaux saumâtre

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. 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 CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le Na Cl . (Viviane, 2003)

Une eau saumâtre est strictement définie comme étant une eau de teneur en sels moindre que celle de l'eau de mer. Le terme est usuellement appliqué aux eaux contenant un peu plus de 500 mg/L de sels, quantité généralement considérée comme supérieure à la norme pour une eau destinée à la consommation humaine. Mais les termes « saumâtres » et « douces » sont relatifs et la distinction n'est pas clairement définie. (Sene, 1985)

- Teneur en sel minéraux > 2 g /l
- Concentration en chlore > à 750 mg/l

I .2. Notion de salinité :

La salinité mesure la concentration en sels dissous ; elle s'exprime en g/L. Du fait que les quantités de sels dissous sont souvent très inférieures au gramme, l'unité communément utilisée est le mg/L ou encore la ppm. La quantité de sel qui existe dans l'eau est généralement décrite par (TDS = Total Dissolved solids) la concentration totale des solides dissous. Elle regroupe l'ensemble des minéraux, des métaux, des cations et des anions dissous dans l'eau.

L'industrie de dessalement fait une distinction entre l'eau de mer et les eaux saumâtres. Une classification de l'eau de source selon la quantité des solides dissous est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1: Classification des eaux selon leur salinité

Source d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	<1,000
Eau légèrement saumâtre	1000-5000
Eaux modérément saumâtres	5000-15000
Eaux très saumâtres	15000-35000
Eau de mer	35000- 42000

II. TECHNIQUES DE DESSALEMENT :

La disponibilité des eaux douces est l'un des besoins humains les plus importants. La préservation et la disponibilité de l'eau douce sont exigées pour assurer la vie humaine. Pour faire face à la menace de pénuries d'eau et assurer la disponibilité continue de l'eau douce, il est nécessaire d'utiliser une stratégie appropriée qui doit être adaptée au potentiel et aux caractéristiques locales de chaque pays. Le Maroc possède d'abondantes ressources en eau saumâtre. Par conséquent, le dessalement de l'eau salé devient une méthode potentielle pour surmonter la crise de l'eau à l'avenir.

II.1. Principe de dessalement :

Le dessalement est un processus qui permet de séparer les sels dissous de l'eau salée (eau de mer ou saumâtre) via plusieurs technologies pour la rendre douce afin de l'utiliser pour divers usages (consommation humaine, irrigation, industrie). Après avoir récupéré l'eau dessalée, les sels sont concentrés dans un courant d'eau appelé « rejet ou bien saumure » puis jetés à la mer, dans des aquifères salins ou bien dans des étangs d'évaporation.

Le dessalement de l'eau saumâtre consiste à éliminer les sels et les minéraux pour produire de l'eau douce. Plusieurs techniques de dessalement diverses ont été mises au point, comme la distillation éclair à plusieurs étapes (MSF), la distillation à effets multiples (MED), la distillation à la vapeur d'eau et la distillation de la vapeur d'eau distillation par compression

(VCD), osmose inverse (RO) et électrodialyse (ED). Ces technologies ont permis de produire une eau douce d'une grande pureté.

Les procédés de dessalement peuvent être regroupés en deux grandes familles :

- Procédés de distillation (ou d'évaporation),
- Procédés membranaires.

II.2. Procédés de distillation :

II.2.1. La distillation :

La distillation occupe aujourd'hui environ 60% du marché mondial du dessalement. La distillation est la plus vieille et la plus rustique des techniques de dessalement. En fait elle reproduit en milieu industriel le processus naturel de dessalement. Il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de refaire passer cette vapeur à l'état liquide en la refroidissant pour obtenir de l'eau potable. L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer 1 kg d'eau liquide en 1 kg de vapeur à la même température il faut environ 2250 Kilojoules (si le changement d'état se fait dans des conditions de pression normales). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

II.2.2. La distillation Multi-Flash :

La distillation multi-flash est un procédé développé dans les années 70. Il est aujourd'hui le procédé le plus utilisé au monde. L'intérêt du multi flash réside dans son faible coût énergétique. En effet, plus la pression est basse, plus la température à laquelle l'eau passe à l'état gazeux est faible (Figure 1). Pour ce procédé, l'eau de mer est envoyée dans des conduits au bout desquels elle est chauffée à 120 °C, puis elle est ensuite introduite dans un compartiment où règne une pression réduite. L'eau est alors instantanément transformée en vapeur par détente appelée Flash. La vapeur ainsi créée va monter au contact des premiers conduits dans lesquels passent l'eau de mer. Les conduits sont assez froids ce qui provoque la condensation de cette vapeur qui est alors récupérée à l'état liquide. Pour l'eau qui ne s'est pas évaporée dans ces compartiments, elle est récupérée puis transférée dans un deuxième

compartiment du même type mais avec une pression atmosphérique encore plus basse. Et ainsi l'opération est répétée plusieurs fois à la suite (d'où le nom de multi-flash).

Le procédé multi-flash ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour.

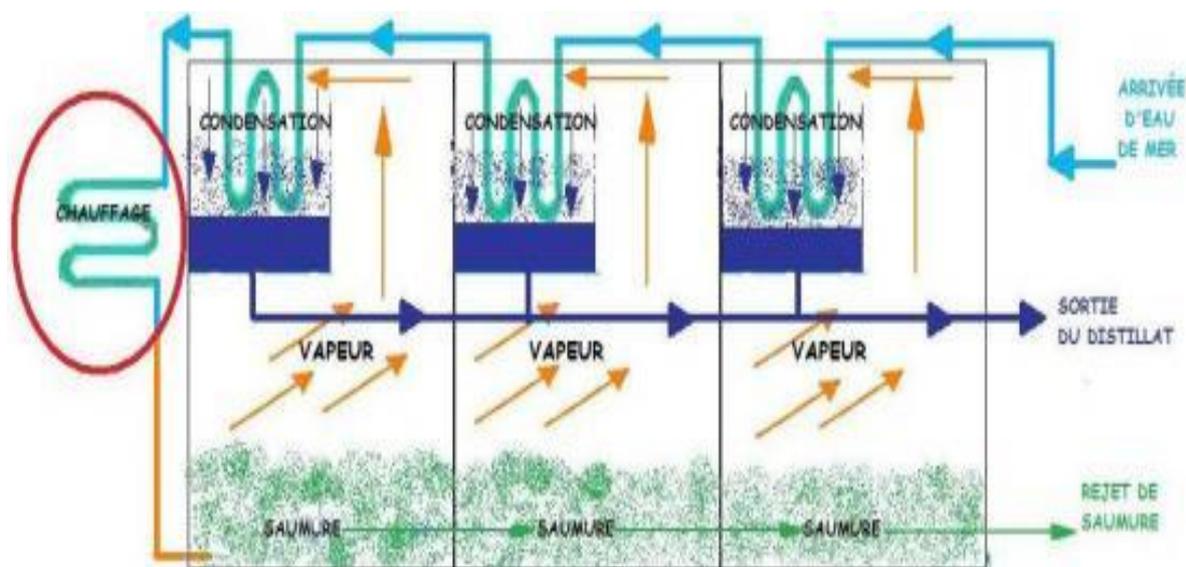


Figure1:Principe de distillation multi-flash(WordPress)

II .2.3. La distillation à Effets Multiples :

La distillation à effets multiples est moins courante car elle ne permet pas de produire de grandes quantités d'eau douce et son installation est délicate et coûteuse. Mais cette technique permet des économies de l'ordre de 15% à 20% par rapport au multi flash. Le principe, simple, consiste en une association en série de modules évaporateur/condensateur dont la disposition permet de limiter les pertes thermiques et assure une grande faisabilité technique. De plus, ce procédé permet d'optimiser la récupération de la chaleur latente de condensation de l'eau.

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C (Figure 2). L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle

est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite. Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite). Son coût est de 5kWh/m³ et pour transformer un kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules.

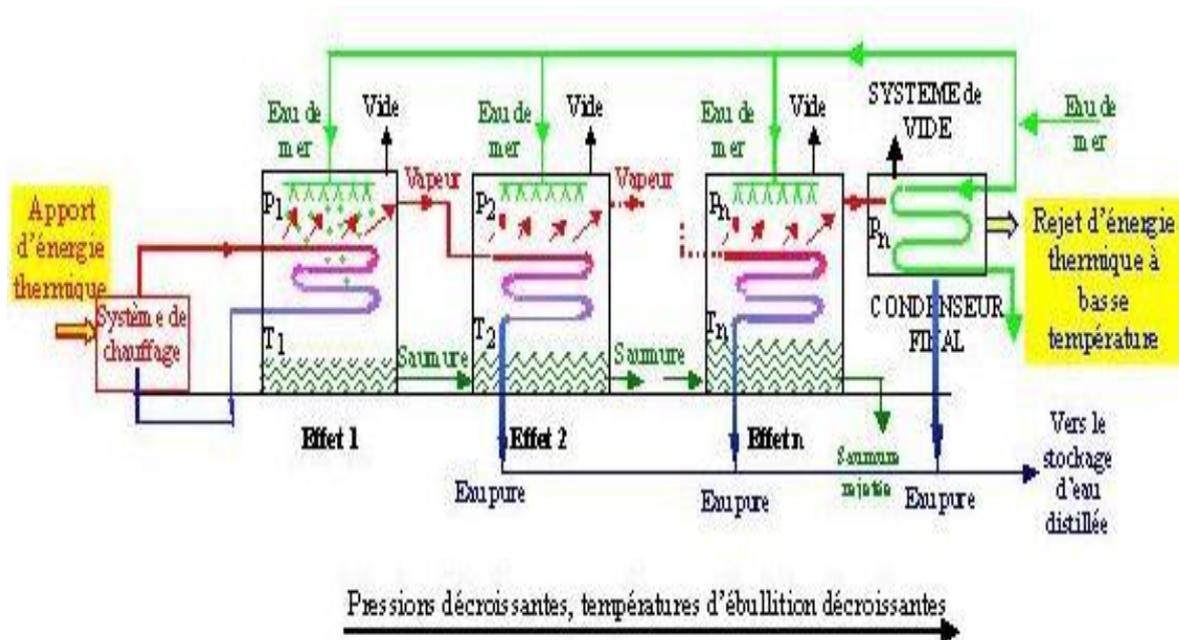


Figure 2: Procédé de distillation à effet multiple (WordPress)

II.2.4. Avantages et inconvénients de la distillation :

Le principal inconvénient de la distillation est que le prix de ce procédé est assez cher. En effet cette technique utilise énormément d'énergie (chauffer l'eau, faire venir du gaz, du pétrole ou encore de l'électricité jusqu'à l'usine). Le prix de l'eau augmente alors d'un euro par m³ d'eau. Ce procédé n'est réellement rentable que si la station de distillation se trouve près d'une source d'énergie bon marché. Cependant, même si le prix de ce procédé est assez cher, il reste le moins cher de tous les procédés. De même, l'avantage est qu'à une température de plus de 100°C, tous les microbes sont éradiqués. (Wordpress, 2008)

II.3. Procédés membranaires :

II.3.1. L'osmose inverse :

II.3.1.1. Définition de l'osmose :

Le procédé de traitement des eaux par membrane d'osmose inverse est une des techniques de filtration membranaire. Il est utilisé en dessalement des eaux saumâtres, des eaux de mer et également pour la réutilisation des eaux usées urbaines et industrielles. L'objectif principal de cette technologie est l'élimination des sels et des substances organiques présentes dans les eaux ainsi qu'une partie des bactéries et des virus. En dessalement des eaux saumâtres, ce procédé a été longtemps en compétition avec diverses techniques comme l'échange ionique, l'électrodialyse. Toutefois, leurs limites technologiques ont progressivement défavorisées par rapport à l'osmose inverse.

II.3.1.2. Le Principe de l'Osmose :

L'Osmose inverse est un procédé de purification de l'eau inspiré du phénomène chimique appelé l'Osmose. Pour mettre en place le principe de l'Osmose, on sépare 2 solutions aqueuses de concentrations différentes par une membrane semi-perméable qui ne laisse passer que l'eau pure. La solution dont la concentration est la plus basse va alors chercher à équilibrer les concentrations des 2 solutions en faisant passer de l'eau pure (H₂O), dans le compartiment de la solution dont la concentration est la plus élevée (Figure 3). Ce phénomène va continuer jusqu'à ce que la différence de hauteur entre les 2 solutions (notée Δh et donnée en mètres) soient égale à la différence de pression osmotique entre les 2 solutions notée « $\Delta \pi$ » qui est définie par la relation :

$$\Delta \pi = \pi_{\text{(solution concentrée)}} - \pi_{\text{(deuxième solution)}}$$

La pression osmotique est définie par :

$$\pi = C.R.T$$

Avec π en Pa, C la concentration en mol.L⁻¹, R = 8,314 et T, la température en Kelvin.

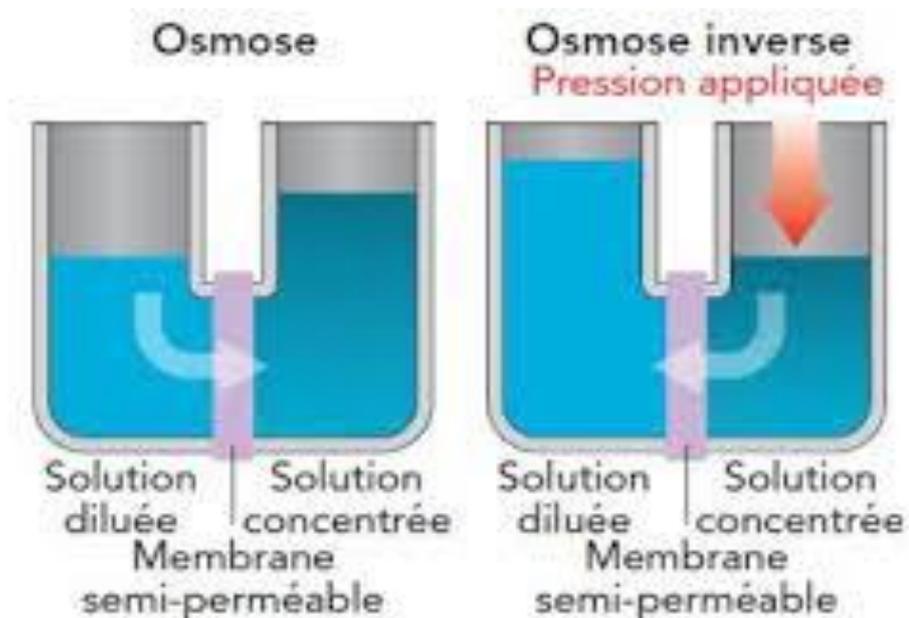


Figure 3: Procédé d'osmose inverse (WordPress)

II.3.1.3. Les Avantages de l'osmose:

Suite à l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bio électroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques à celles des eaux de sources les plus naturelles :

- pH légèrement acide de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments)
- Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins.
- L'eau osmose est antioxydant, alors que l'eau en bouteille est plus oxydée du fait du délai souvent trop long entre la mise en bouteille et la consommation ;
- L'énergie de l'eau osmose (7200 unités Bovins) est nettement supérieure à celle de l'eau en bouteille (5000) qui est en outre chargée de tous les rayonnements nocifs qu'elle subit pendant son transport et dans les lieux de stockage.

II.3.1.4. Les inconvénients de l'osmose :

Le dessalement par osmose inverse présente plusieurs inconvénients parmi lesquels :

- La faible durée de vie des membranes, qui est de l'ordre de 3 ans.
- L'énergie consommée est énorme.

- Les pertes en eau : le rendement n'est que de 75% et ainsi 25% de saumure (solution aqueuse très concentrée en sel) restent à la fin et sont inutilisables.
- La pureté de l'eau est toujours inférieure à 100%.

II.3.2 L'Electrodialyse :

L'électrodialyse est un procédé électrochimique qui permet d'extraire les ions (atomes chargés positivement ou négativement) d'une solution en les déplaçant. Par exemple, par électrodialyse, on peut extraire les ions Na^+ et Cl^- de l'eau de mer. Ce procédé fonctionne avec un appareil nommé électrodialyseur dont le fonctionnement est détaillé ci-après.

II.3.2.1. Fonctionnement :

Un électrodialyseur est constitué d'un grand nombre de compartiments alimentés électriquement en série, et hydrauliquement en série ou en parallèle (Figure 4). Ces compartiments sont séparés par des membranes. L'extraction des ions se fait par migration de ces derniers à travers les membranes dites « sélectives » (qui sont soit anioniques, soit cationiques) sous l'action d'un champ électrique. Ainsi, seuls les anions (chargés négativement) peuvent traverser les membranes anioniques et seuls les cations (chargés positivement) peuvent traverser les membranes cationiques. En plaçant alternativement une membrane anionique et une membrane cationique, puis en créant une charge positive à une extrémité de l'électrodialyseur et une charge négative de l'autre, on va attirer les anions vers la charge négative et les cations vers la charge positive, piégeant ainsi dans certains compartiments les ions qui sont alors retirés de la solution dans les autres compartiments.

Ainsi, le compartiment où il y a l'eau douce à la fin est appelé « compartiment de dilution » et le compartiment où l'on récupère la saumure (solution aqueuse très concentrée en sel) est appelé « compartiment de concentration ».

II.3.2.2. Pré-Traitement :

Souvent, il est nécessaire d'effectuer un pré-traitement avant l'électrodialyse car les solides en suspension avec un diamètre supérieur à 10 mm doivent être éliminés pour ne pas risquer de boucher les pores de la membrane. Seuls les ions sont éliminés dans l'électrodialyse ; les matières en suspension (MES) ne sont pas arrêtées par le procédé, et ne font qu'encrasser les membranes, d'où la nécessité d'un prétraitement de l'eau pour la débarrasser des MES qui

sont capables de neutraliser la membrane comme par exemple les anions organiques de grande taille, les oxydes de fer et de manganèse. Ils perturbent l'effet sélectif de la membrane. En principe une filtration préalable, bien exploitée, est suffisante. Elle peut être précédée d'une floculation, ceci étant fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter. Il est donc nécessaire, pour obtenir une électrodialyse fiable, de procéder à une étude approfondie de l'eau utilisée pour en connaître précisément la composition. De plus, et comme c'est le cas pour tous les traitements d'eaux, une analyse ponctuelle est insuffisante, et il est nécessaire de procéder à une campagne d'échantillonnage dont la durée et la fréquence du prélèvement sont à fixer au cas par cas.

Les traitements préalables de l'eau d'alimentation (cela est aussi valable pour le prétraitement de l'osmose inverse) doivent permettre d'éviter les dégradations dues :

- Au colmatage des membranes.
- Aux fortes pressions aux produits oxydants.
- Aux micro-organismes.
- A la précipitation des sels minéraux.

Les substances non ionisées (qui n'ont pas de charge électrique) qui sont dissoutes dans la solution ont leur teneur qui reste la même durant l'électrodialyse, car le courant électrique n'a aucune influence. L'électrodialyse ne doit être appliquée qu'aux composants ioniques entre les deux seuils de concentration minimum et maximum, pour éviter la cristallisation ou un trop grand résistance ohmique. Il ne faut pas essayer de dépasser la valeur des courants limites : des phénomènes secondaires comme le colmatage (obstruction des pores) peuvent créer des évolutions irréversibles sur les membranes et sur la solution. (wordpress)

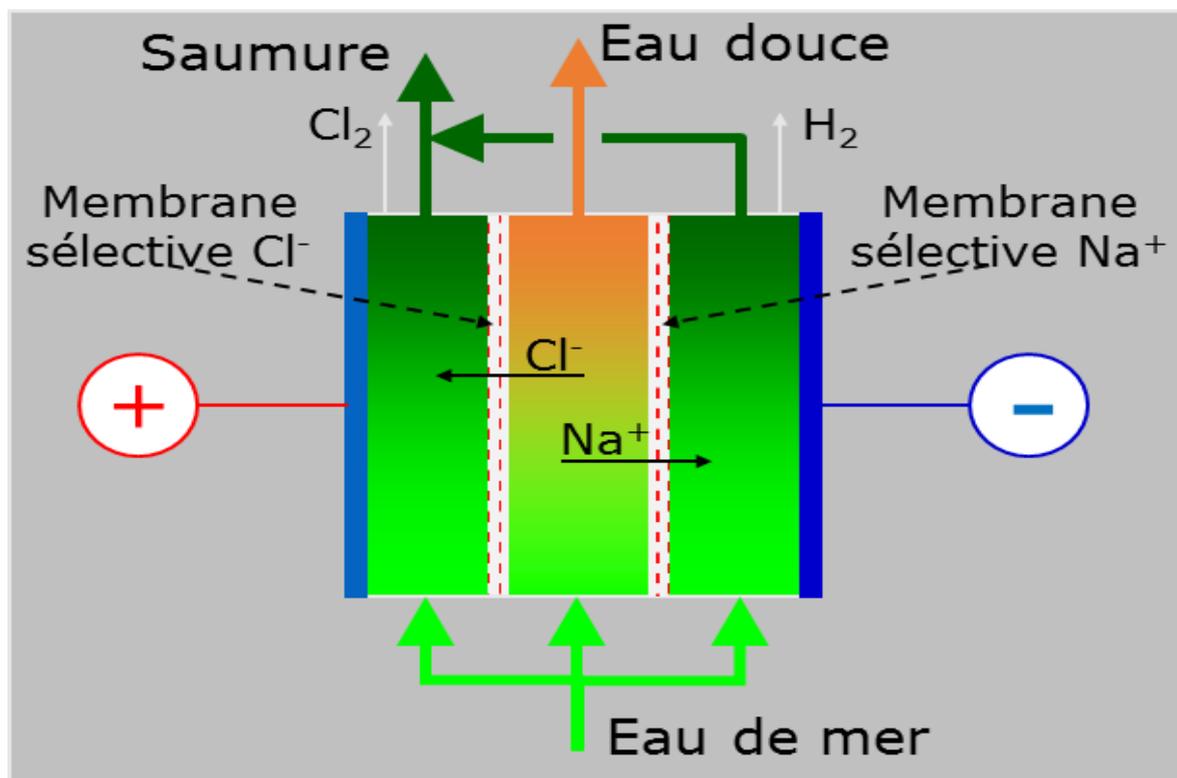


Figure 4: Principe d'électrodialyse (WordPress)

II.3.3. La nano-filtration :

La nano-filtration membranaire est un procédé placé entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle s'est développée grâce à l'amélioration des matériaux membranaires. En effet, elle permet de travailler sous des pressions modérées de 5 à 15 bars et de séparer des solutés de masses molaires comprises entre 300 et 1000, correspondant à des dimensions de l'ordre du nanomètre. Actuellement, la nano-filtration connaît une application considérable pour le traitement des eaux usées, des eaux potables, des eaux colorées et des eaux saumâtres.

Le mécanisme de séparation en nano-filtration du soluté peut être exprimé en fonction de la charge et/ou de l'effet de la taille. Le transport des solutés neutres à travers la membrane se fait par convection, en fonction de la différence de pression et par diffusion en fonction d'un gradient de concentration (figure5). (WordPress)

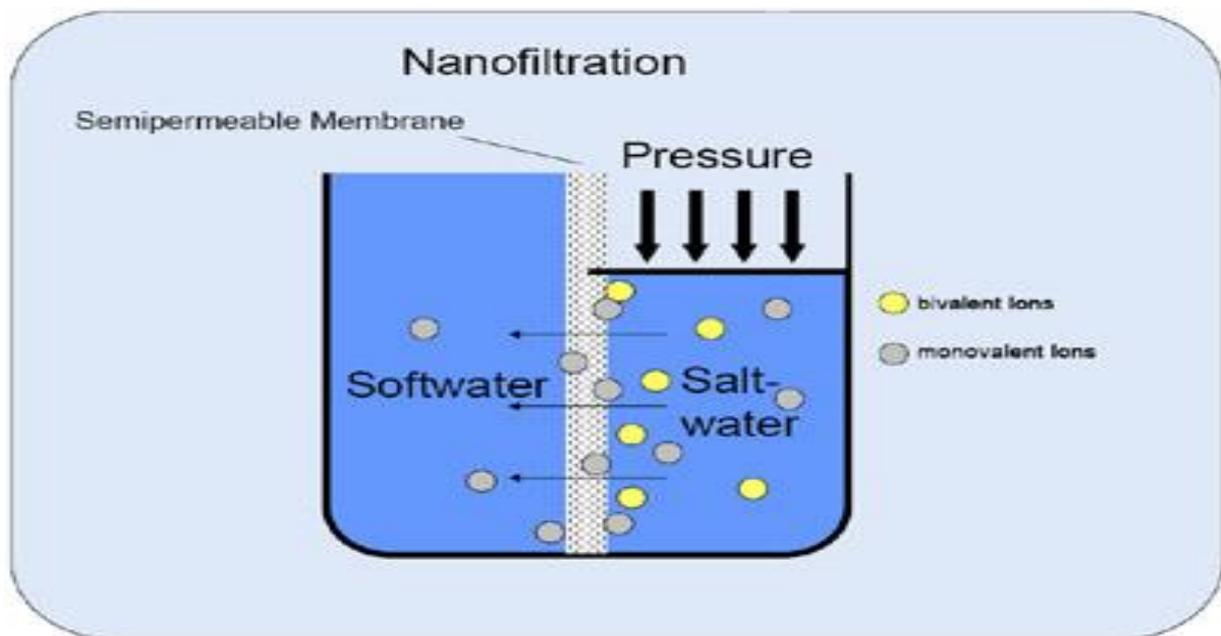


Figure 5: Principe de nano-filtration (WordPress)

A cause du cout élevé d’investissement de ces techniques de dessalement, le Centre national d’études et de recherche sur l’eau et l’énergie (*CNEREE*) de l’Université Cadi Ayyad à Marrakech a développé dans ce sens des technologies innovantes et de moindre cout “*Lowcost technologies*”. Parmi ces techniques “le système filtre imbriqué” (*Multi - Soil - Layering “MSL” system*) est importé du Japon où elle a été développée par *Wakatsukien* 1990. Cette nouvelle technologie basée sur l’infiltration, percolation utilisant la pouzzolane comme moyen de dessalement.

Partie II : la technique d'étude

I. Présentation de la technique :

La technologie de filtre imbriqué MSL (Multi-soil-Layering) se caractérise par plusieurs avantages, dont de faibles coûts de construction, une occupation de petites surfaces, pas de consommation d'énergie, un entretien simple, pas de colmatage fréquent, et l'application d'une forte charge organique et hydraulique. De plus, la durée de vie effective de la technologie MSL est estimée à environ 20 ans pour le traitement des eaux usées domestiques. La méthode MSL s'est avérée être techniquement et économiquement réalisable pour la gestion de la qualité des eaux usées dans le cadre de l'élaboration du pays, en particulier dans les communautés rurales où les ressources financières sont limitées.

Cette structure améliore l'efficacité du contact et la fonction de filtration, et puis améliore l'élimination des polluants. (Latrach, 2018)

II. Les compositions de filtre imbriqué :

Le système filtre imbriqué principalement composée de couches de blocs de mélange de sol et de couches perméables à l'eau (PL). Le système MSL comble bon nombre des lacunes des systèmes conventionnels de traitement des sols, comme le colmatage facile, l'encrassement important du sol et le faible taux de charge hydraulique. Le document établi par Xin Chen, (2009) résume la structure, le mécanisme de purification et l'application pratique des systèmes pour différents types de traitement des eaux usées.

La structure de la MSL à l'échelle du laboratoire utilisé dans la présente étude, est composée d'une boîte en plastique (hauteur 65 cm, largeur 36 cm, profondeur 30 cm). Le système MSL se composait de couches de mélange de sol et de couches de gravier d'un diamètre de 3 à 5 mm (Figure 6).

Les couches de mélange de sol sont composées d'un sol sableux local mélangé à de la sciure de bois, le fer métallique et le charbon de bois, sur la base du poids sec. Ces couches sont disposées selon un motif de briques, entourées de couches de gravier. La taille de la sciure est inférieure à 2 mm. La sciure de bois est fabriquée à partir de certaines espèces d'arbres

marocains comme le Quercus sp. et le Fraxinus sp. Le charbon de bois est fabriqué à partir d'Eucalyptus sp. La taille du métal de fer est de 2 cm. (Latrach, 2014)

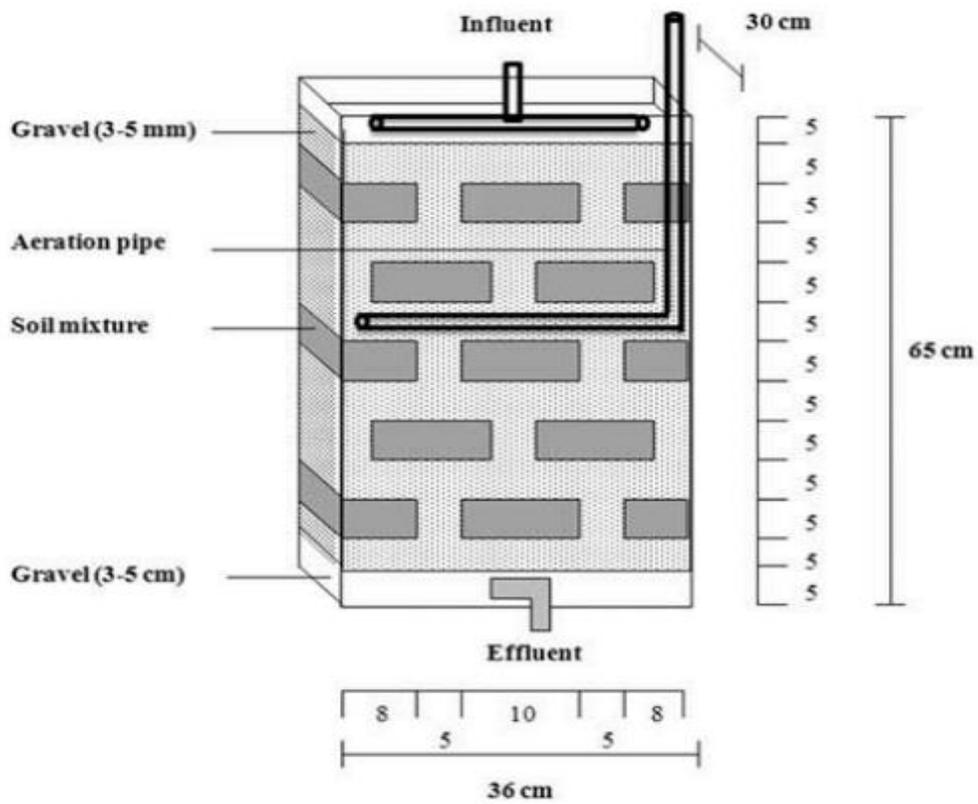


Figure 6: Structure de filtre imbriqué. (Latrach, 2014)



Figure7: la composition de filtre imbrique

III. Exemples des matériaux naturels pour le dessalement :

Les techniques de dessalement artificielles ont permis de produire l'eau douce d'une grande pureté. Toutefois, le coût d'exploitation de ces techniques est toujours considéré comme élevé. Il est donc nécessaire de trouver des matériaux naturels moins coûteux et abondants. Différents types de matériaux naturels sont utilisés, parmi ces matériaux on cite les zéolites et les argiles.

III.1. Les zéolithes :

Les zéolithes naturelles ont été utilisées dans les systèmes de sorption pour de nombreuses applications.

Edy Wibowo utilisé l'eau de mer de Java avec une salinité moyenne de 35,0 ppt. Le processus de dessalement a été réalisé par l'insertion de poudre de la zéolithe activé des températures de 100 à 600 RC dans 100 ml d'eau de mer. La dose de zéolithe a varié à 1,5, 3,5, 5,0 et 7,5 g. Chaque échantillon a été agité mécaniquement pour que les poudres de zéolithe puissent se disperser de façon homogène dans l'eau de mer. D'après cette expérience, Il ne constate que les conditions optimales de modification de zéolithe comme matériau absorbant pour réduire la salinité d'eau de mer dû à l'ajout de zéolithe activée en 225 C pour 3 h. La

valeur la plus élevée de Réduction de Salinité est de 3,2 ppt et 9,14%. Zéolithe à haute température sa surface spécifique possède une sorption élevée. L'efficacité de la réduction du sel peut être facilement améliorée par l'augmentation des émissions de dose de zéolithe. (Wibomo, 2017)

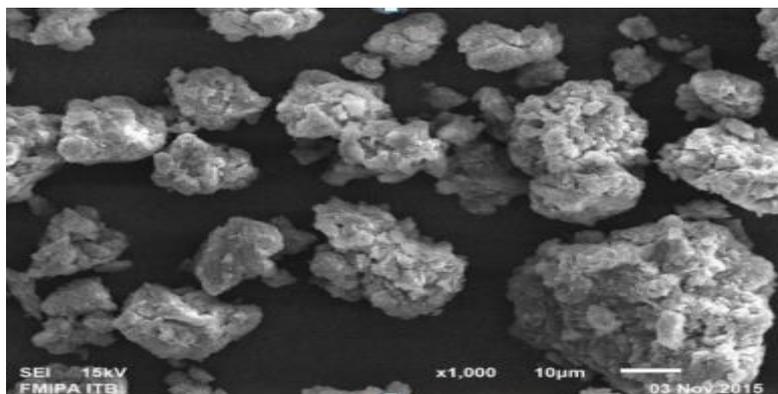


Figure 8: Poudre naturel de la zéolithe vue au microscope électronique à balayage.
(Wibowo, 2017)

III.2. L'argile :

Les argiles sont des minéraux naturels, présente depuis la formation de la Terre, et utilisées par l'homme depuis des millénaires. Contrairement à ce que l'on peut penser, il existe plusieurs types d'argiles. L'utilisation des argiles, et des matériaux à base d'argiles, s'est développée dans de nombreux secteurs d'activité. On les retrouve dans divers domaines, dans la construction, l'alimentation animale et humaine, le plastique, la pétrochimie, dans le milieu de la santé,... Ces matériaux ont prouvé leurs capacités à maintes reprises.

Plusieurs travaux ont testé la possibilité d'utiliser ces matériaux à bas coût comme adsorbant, Tanzakul (2009) a utilisé l'argile minérale (bentonite) soit sous la forme de pré-couche, soit en suspension. Pour les bentonites utilisées, avec une taille moyenne de particules de 4 – 5 μm et dans la gamme des concentrations testées (200 – 1000 mg.L^{-1}) ou l'épaisseur de la pré-couche déposée (40 g.m^{-2}). L'intérêt d'utiliser les bentonites est limité pour cette application ; on obtient un taux de rétention en matières organiques et un colmatage plus important. (Tanzakul, 2009)

IV. Introduction de pouzzolane au système (MSL)

Dans le système MSL (Multi-soil -Layering system), le choix des matériaux est basé sur leurs disponibilités et leur faible coût, ainsi que leurs potentiels d'adsorption élevé et leurs pouvoirs tampon. Parmi les matériaux de choix dans ce sens figure la pouzzolane.

IV.1.Généralités sur La pouzzolane :

IV.1.1.Définition :

Le terme pouzzolane en sens Français provient de Pouzzoles qui est le nom d'une ville italienne de la région de Naples. Il désigne un matériau volcanique cendreuse de composition trachytique et de couleur clair et friable utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment.

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels d'origine volcaniques, pyroclastiques, meubles et peu denses, à structure alvéolaire, essentiellement composés de verre volcanique. Ils entrent dans la catégorie des granulats ou agglomérats légers et se différencient les uns des autres par leur composition chimique et leur texture. (Rocher, 2012)

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires. C'est un matériau poreux à structure alvéolaire, léger car sa densité est inférieure à un.

IV.1.2.Types de la pouzzolane:

➤ Pouzzolane naturelle :

Elle est préalablement calcinée dans un four ou transformée, puis broyée pour obtenir une fine poudre. Actuellement, elle comporte l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin (Ait Jabli et Achag, 2016).



Figure 9 :La pouzzolane naturelle

➤ **Pouzzolane artificielle :**

Les pouzzolanes artificielles correspondent à toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue soit des résidus de fabrication industrielle (tel que le mach fers , cendre de bois ou d'houille) , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures de températures modérées . On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite (Ait Jabli et Achag, 2016).

IV.1.3.Origine et formation de pouzzolane :

Les pouzzolanes sont des roches pyroclastiques formées de fragments de magma (pyroclastites) projetées dans l'atmosphère lors d'éruptions volcaniques et refroidis au cours de leur parcours aérien. La vitesse de refroidissement relativement importante, qui applique un effet de trempe au magma explique que le verre volcanique (matière amorphe, non cristallisée) soit un des composants majeurs des matériaux pouzzolaniques. Les autres constituants sont les minéraux magmatiques (feldspath, pyroxène, olivine amphibole, oxydes de fer...) et les xénolites.

IV.1.4. Propriétés physiques et chimiques :

La pouzzolanite, ou effet pouzzolanique, se définit comme la capacité qu'ont les matériaux, à température ambiante et en présence d'eau, de fixer d'oxyde de calcium (chaux) pour donner des composés stables possédant les propriétés hydrauliques du ciment (Rocher, 2012)

- Caractéristiques chimiques :

Du point de vue chimique, les pouzzolanites se caractérisent par :

- Un PH neutre.
- Une composition chimique composée en moyenne de : 45% de silice, 15% d'alumine et 15% d'oxyde de fer.

Elle contient également, de la chaux, du sodium, du potassium, et de nombreux oligoéléments.

- Caractéristiques physiques :

Du point de vue physique, les pouzzlanites se caractérisent par :

- Une forte porosité fermée, (qui varie volumétriquement de 30 et 60 % selon les granulométries, et très grossières (vacuoles >100 µm).
- La densité varie en fonction de la granulométrie (les éléments les plus fins sont les plus denses), à l'état brute ces matériaux présentent une densité supérieure à l'exception faite des granulométries grossières (au-delà de 10/20 mm).
- Une capacité d'absorption d'eau et d'odeurs.
- Une aptitude à la rétention d'eau.
- Une grande surface spécifique.
- Une résistance à la chaleur.
- Une action filtrante et drainante.

Partie III : Techniques d'analyses et Paramètres étudiés

I. Prélèvement des échantillons d'eau :

Dans le cadre de l'étude de filtre imbriqué pour le dessalement des eaux saumâtre, nous avons choisi un échantillon d'eau saumâtre (2.5g /l de salinité) prélevé d'un puits de la ville d'Ait Ourir située à environ 50 km au Sud-est de Marrakech. Le faciès chimique des eaux de cette zone reflète l'influence de la lithologie des terrains qui sont en grande partie marno-calcaires. De ce fait, les eaux qui les ont traversé présentent un faciès bicarbonaté calcique à bicarbonaté mixte. Plus à l'Est, le faciès des eaux devient chloruré sodique lié à l'existence d'une série permo-triasique contenant des séries évaporitiques.

II. Matériels et méthodes :

On utilise le test de batch comme méthode pour évaluer l'influence spécifique de certains paramètres : température, pH, potentiel d'oxydoréduction. Cependant, dans notre cas on s'intéresse plus à la capacité d'adsorption de pouzzolane. C'est une méthode qui consiste à mettre en contact un volume fixe de solution avec une masse d'adsorbant donnée, l'ensemble [solution +adsorbant] et alors agité pendant un certain temps.

Les méthodes batch sont très utilisées car elles sont simples, faciles à mettre en place et rapide. De plus, elles permettent de faire varier un nombre important de paramètres (granulométrie, masse de particules, temps de contact...). Dans les expériences que nous avons effectuées nous avons varié les paramètres : la concentration, la quantité, la granulométrie, le temps d'activation, selon les procédés décrit ci-dessous.



Figure 10: Appareillage pour le test de batch

Tableau 2: les expériences pour différentes doses de pouzzolane non activé

Pouzzolane non activé	Volume de solution Na Cl (1g/l)	Quantité de pouzzolane	Granulométrie	Temps d'agitation	Vitesse
Expérience 1	50ml	3g	800 μ m< ϕ <1.25mm	De 5min à 30 min	200tours /min
Expérience 2	50ml	6g	800 μ m< ϕ <1.25mm	De 5min à 30 min	200tours /min
Expérience 3	50ml	9g	800 μ m< ϕ <1.25mm	De 5min à 30 min	200tours /min

Tableau 3:les expériences pour la pouzzolane activé

Pouzzolane activé	Volume de solution Na Cl (1g/l)	Quantité de pouzzolane	Granulométrie	Temps d'agitation	Vitesse	Température d'activation
Expérience 1	50ml	3g	800 μ m< ϕ <1.25mm	30 min	200tours /min	150 °C
Expérience 2	50ml	3g	800 μ m< ϕ <1.25mm	30 min	200tours /min	225 °C
Expérience 3	50ml	3g	800 μ m< ϕ <1.25mm	30 min	200tours /min	300°C

Tableau 4:les expériences de différentes concentrations de Na Cl avec pouzzolane non activé

Pouzzolane non activée	Volume de solution Na Cl	Quantité de pouzzolane	granulométrie	Temps d'agitation	Vitesse
Expérience 1	50ml (2g/l)	3g	800 μ m< ϕ <1.25mm	De 5min à 30 min	200 tours /min
Expérience 2	50ml (2.7g/l)	3 g	800 μ m< ϕ <1.25mm	De 5min à 30 min	200 tours /min

Tableau 5:l'expérience d'eau saumâtre avec pouzzolane activé

Pouzzolane activée	Volume d'eau saumâtre	Quantité de pouzzolane	granulométrie	Temps d'agitation	Vitesse
150°C	50 ml	3g	800 μ m< ϕ <1.25mm	De 5min à 30 min	200 tours par min

Tableau 6: les expériences de différent diamètre de pouzzolane non activé

Pouzzolane non activée	Volume de solution Na Cl (1g/l)	Quantité de pouzzolane	granulométrie	Temps d'agitation	Vitesse
Expérience 1	50ml	3g	$800\mu\text{m} < \phi < 1.25\text{mm}$	De 5min à 30 min	200 tours /min
Expérience 2	50ml	3 g	$3\text{mm} < \phi < 5\text{mm}$	De 5min à 30 min	200 tours /min

On effectuée une série de dilution adapté à la gamme étalon d'appareil spectrophotomètre à flamme.



Figure 11: Série de dilution

III. Analyses physico-chimique

II.1. Potentiel d'hydrogène :

Le potentiel hydrogène, plus connu sous le nom de "pH" permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Le pH de l'eau pure à 25°C, qui est égal à 7, a été choisi comme valeur de référence d'un milieu neutre.

Il existe de nombreuses façons de mesurer le pH d'une solution aqueuse. On peut tout d'abord le mesurer par électrochimie à l'aide d'un appareil appelé pH-mètre. On peut aussi utiliser des indicateurs de pH ou indicateurs acide-base : il s'agit de substances qui ont la propriété de changer de couleur en fonction de l'acidité du milieu environnant. Ces indicateurs colorés sont utilisés dans les domaines de la chimie, la biologie ou la médecine mais aussi dans les classes de lycée pour réaliser des expériences. Le mélange de plusieurs indicateurs colorés permet d'obtenir un indicateur universel c'est-à-dire un produit qui change graduellement de couleur en fonction du pH. Le papier pH, très utilisé pour mesurer l'acidité, est en fait un papier imbibé d'un indicateur universel. Quand on le trempe dans une solution, il prend instantanément la couleur correspondant à un certain pH.

II.2. Température :

La température de l'eau est critique car c'est une qualité importante dans les paramètres environnementaux. Il est important de mesurer la température de l'eau. En faisant cela, nous pouvons voir les caractéristiques de l'eau telles que les propriétés chimiques, biologiques et physiques de l'eau, ainsi que les effets possibles sur la santé. La température de l'eau est un facteur important en déterminant si une masse d'eau est acceptable pour la consommation et l'utilisation humaine. La température présente plusieurs caractéristiques :

- elle régit les types de vie aquatique qui y vivent.
- elle régule la concentration maximale d'oxygène dissous dans l'eau.
- elle influence le taux de réactions chimiques et biologiques.
- elle affecte le niveau d'oxygène dissous dans l'eau, la photosynthèse des plantes aquatiques, les taux métaboliques des organismes aquatiques et la sensibilité de ces organismes à la pollution, aux parasites et aux maladies.

Pour effectuer les mesures nécessaires au traitement de l'eau, nous utilisons un thermomètre à mercure de bonne qualité, gradué en degrés Celsius.

II.3. Conductivité électrique :

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement, autrement dit à permettre le passage du courant électrique.

Dans le domaine de l'eau, la conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à celle de résistivité électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en micro siemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou millisiemens (mS/cm). La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux et non les matières organiques) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissout est importante, plus la conductivité sera élevée.

Une eau douce accusera généralement une conductivité basse et bien au contraire une eau dite dure affichera une conductivité élevée. Cette mesure détermine la quantité des ions liés contenue dans cette solution qui sont réparties en 2 groupes : Les cations (Calcium, Magnésium, Potassium, Sodium...) et les anions (Bicarbonates, Chlorures, Sulfates, Sulfates, Nitrates...).

Pour la technique de mesure, on utilise un courant alternatif de très basse tension entre deux électrodes. On plonge la cellule de mesure dans l'eau et on lit la valeur. Le résultat de mesure est le plus souvent indiqué en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une élévation de la température augmente la mobilité des ions dans l'eau, la valeur mesurée est alors plus élevée. Le résultat de la mesure doit toujours comporter l'indication de la température à laquelle elle a été faite, surtout si elle est différente de la température de référence de 20°C. L'instrument de mesure qui possède une sonde de température incorporée, corrige automatiquement la valeur obtenue en fonction de la température de l'eau.



Figure 12: Photo d'un conductivimètre

Tableau 7: Différentes conductivité des eaux

Valeur de Conductivité pour L'eau	
Eau de robinet	644 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Eau Distillée	2,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Eau de Montagne	1,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Eau Courante	500 à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Max. Pour l'eau potable	<u>1055 $\mu\text{S}/\text{cm}$</u>
Eau de Mer	56 mS/cm
Eau saumâtre	7,12 ms/cm

II.4. Dureté totale :

Une eau est dite « dure » lorsqu'elle est fortement chargée en ions calcium (Ca^{2+}) et Sodium (Na^+) et potassium (K^+).

Pour le dosage des cations alcalins Na^+ et K^+ , Li^+ et Ca^{2+} on utilise la photométrie de flamme.



Figure 13 : Photo du photomètre de flamme

II.2.1.1 Principe

Un échantillon dilué à l'aide de l'eau distillée est nébulisé et aspiré dans la flamme bleue dans un mélangeur d'air et de gaz. L'intensité de l'émission transmise à travers un filtre pour un élément comparée avec celle d'un blanc selon lequel l'appareil est normalisé, indique directement la concentration de l'élément dans l'échantillon.

IV. Analyse géochimie pour la caractérisation de pouzzolane :

Caractérisation des matériaux par XRF :

La spectrométrie de fluorescence X (XRF) permet la détermination de la composition élémentaire de l'échantillon de manière qualitative et quantitative, c'est-à-dire de déterminer la nature et la quantité des atomes qui sont présents dans l'échantillon.

Principe :

En analyse ED-XRF, les échantillons sont irradiés avec des photons à haute énergie provenant d'un tube à rayons X ou d'une source radio-isotopique. Le faisceau de rayons X primaire excite les électrons de l'échantillon, l'amenant à émettre des rayons X secondaires, c'est-à-dire à émettre une fluorescence lors du retour d'électrons vers leurs orbites. Les rayons X émis se produisent à des énergies spécifiques aux éléments de l'échantillon, apparaissant sous forme de pics sur un spectre d'énergie donné. La hauteur ou l'intensité d'un pic donné reflète en partie la concentration de cet élément dans l'échantillon et peut être convertie en unités de

concentration, généralement par comparaison à une ligne de régression basée sur des normes bien caractérisées après la détection.



Figure 14 : Appareil XRF portable

Partie IV : Résultats et discussions

I. La composition géochimique de pouzzolane :

Le tableau 8 montre la composition élémentaires de pouzzolane après caractérisations par XRF.

Tableau 8 : la caractérisation de pouzzolane

Elément	En ppm	Incertitude +/-
Al	2787	520.62
Ca	2.97%	0.0224%
Cd	127	10.36
Cl	9.60	0.0995%
Fe	121	20.44
K	1651	62.45
Le	85.69%	0.1294
Mo	11	1.59
Ni	-	-
P	2070	85.53
Pb	11	2.53
Rb	-	-
S	1023	46.78
Si	7258	199.29
Sr	17	1.09
Th	21	5.05
Ti	2233	159.28
Zn	51	4.38

Etude de la réduction en fonction la masse de la pouzzolane : Erreur !
Signet non défini.

L'essai réalisé pour une masse de pouzzolane de 3 g, montre que le taux de réduction de Na Cl de la solution suit la fonction exponentielle (figure15). Au début, le taux de réduction augmente rapidement de 0 mg/l à 107 mg/l, puis s'allonge lentement jusqu'à atteindre la condition de saturation à 145mg/l. La saturation se produit lorsque le champ électrique de la pouzzolane n'est pas assez puissant pour attirer un autre ion Na Cl

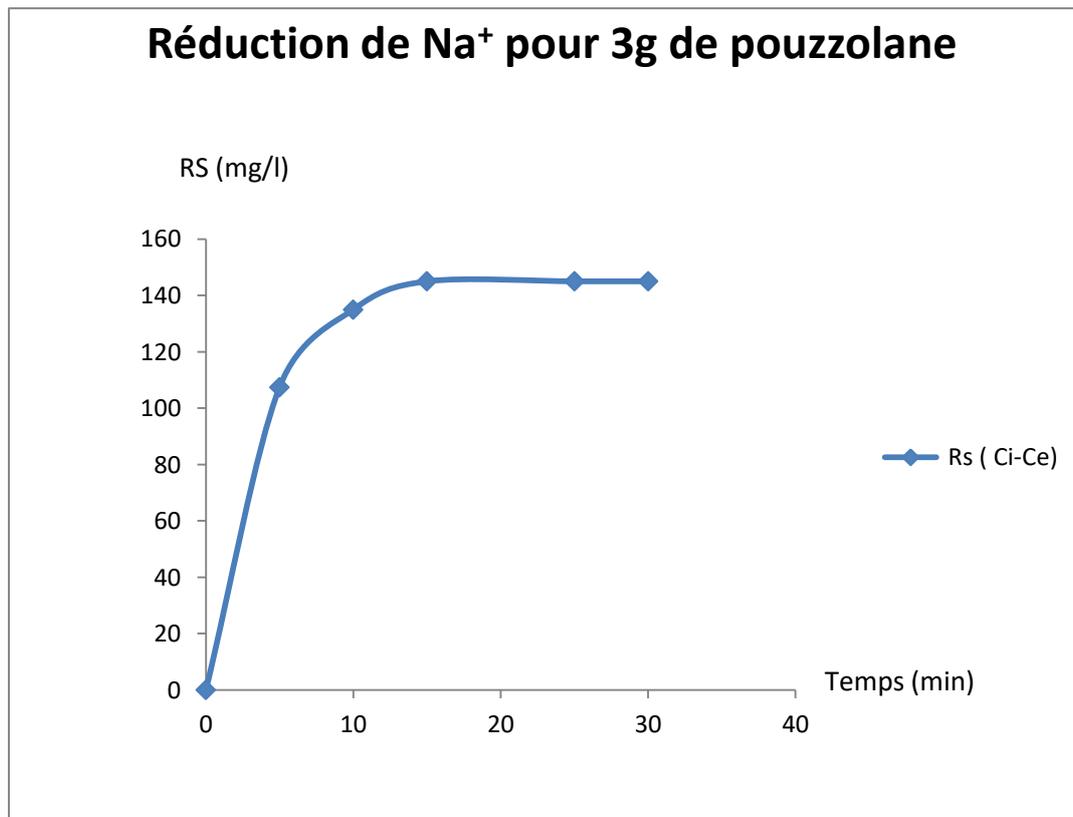


Figure 15:la réduction de Na⁺ pour 3g de pouzzolane

D'après l'expérience réalisée pour une masse de pouzzolane de 6 g, on constate que le taux de réduction de Na Cl de la solution suit la fonction exponentielle (figure16). Au début, on a une augmentation progressive de taux de réduction de 0 mg/l à 232 mg/l, puis s'allonge lentement jusqu'à atteindre la condition de saturation à 250 mg/l.

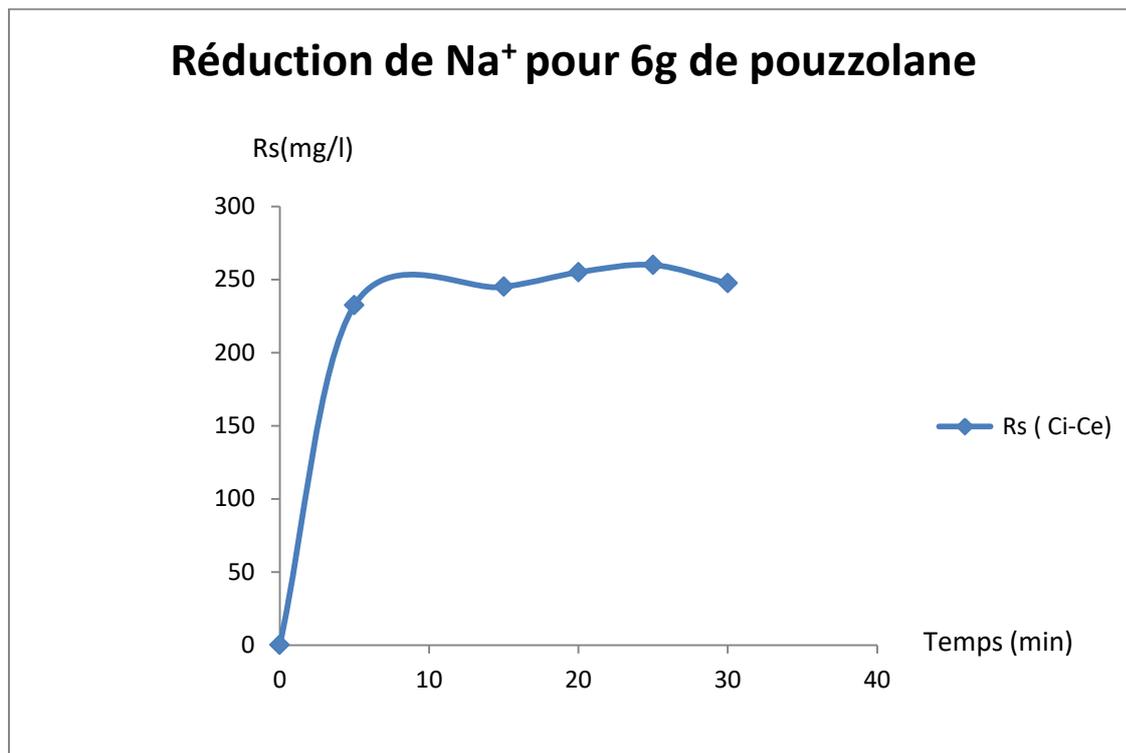


Figure 16: la réduction de Na⁺ pour 6 g de pouzzolane

D'après l'expérience réalisée pour une masse de pouzzolane de 9 g, on observe que le taux de réduction de Na Cl de la solution suit la fonction exponentielle (figure17). Au début, on a une augmentation progressive de taux de réduction de 0 mg/l à 210 mg/l, puis s'allonge lentement jusqu'à atteindre la condition de saturation à 260 mg/l.

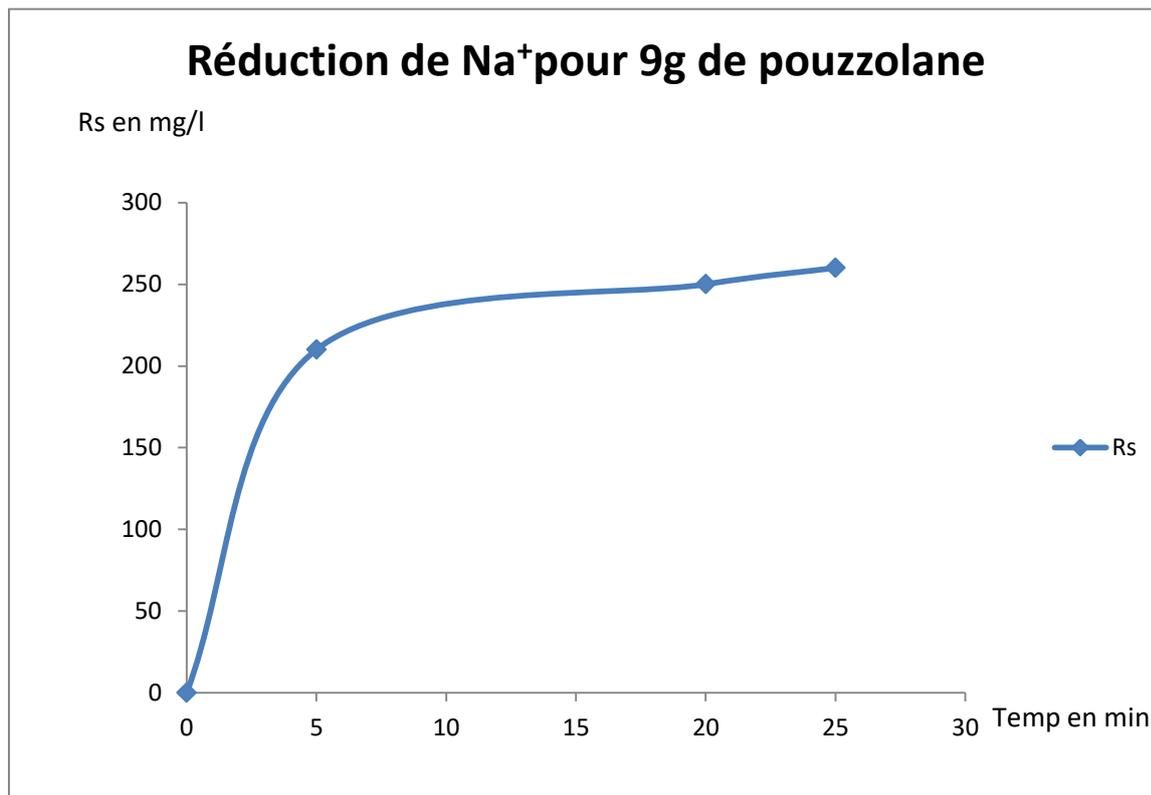


Figure17: la réduction de Na⁺ pur 9g de pouzzolane

Le tableau 9 montre que les conductivités des solutions de 3g, 6g et 9g de pouzzolane diminuent respectivement de 1772 μ s/cm, 1799 μ s/cm, 1845 μ s/cm par rapport la solution mère de Na Cl sans l'ajout de pouzzolane qu'est de 1862 μ s/cm. Ce qui peut être expliqué par la diminution de minéralisation et par conséquent l'augmentation de réduction des ions Na⁺.

Tableau 9: les conductivités, les ph et les températures des solutions de 3 g, 6g et 9g de pouzzolane

Temps d'agitation (min)	La quantité de pouzzolane(g)	La conductivité (μ s/cm)	pH	Température (°C)
5	3	1772	6.35	29.3
	6	1799	6.49	31.1
	9	1845	6.49	29.8
La solution mère de Na Cl sans ajout de pouzzolane		1862	6.28	24.9

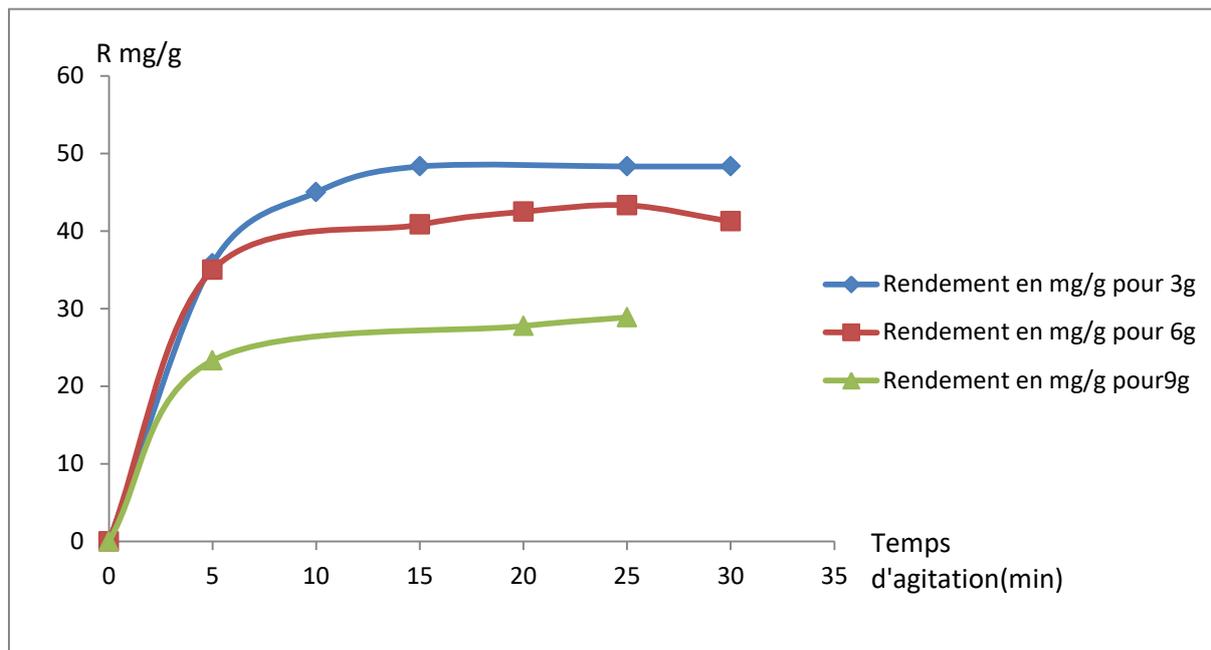


Figure 18:les rendements des différentes doses de pouzzolane

Tableau 10 : Le pourcentage et le rendement des différentes expériences

Echantillon	Réduction de Na ⁺ en %	Rendement en mg/g
3g de pouzzolane+Na cl 1g/l	15.03	48.33
6g de pouzzolane+Na cl 1g/l	25	41.25
9g pouzzolane de+Na cl 1g/l	27.37	28.89

Synthèse : On peut constater d'après les résultats expérimentaux trouvés que le taux d'absorption de l'ion Na⁺ par la pouzzolane est rapide. C'est une propriété importante pour le matériau absorbant. Un taux de sorption rapide indique que l'interaction coopérative entre les ions de Na⁺ et les particules de pouzzolane se produit rapidement après le temps de contact.

Dans le tableau 10 montre que le pourcentage de réduction de Na Cl augmente en fonction l'augmentation de la quantité de pouzzolane. En effet à 3 g de pouzzolane, le pourcentage de Rs est 15.03% alors que pour des quantités de 6 g et 9 g le pourcentage de réduction est respectivement de 25% et 27.37 %. Ce qui peut être corrélé avec la surface active disponible en fonction de l'augmentation de la quantité de la pouzzolane.

D'après le figure 18, on conclut que la meilleur quantité de pouzzolane de point de vue rendement est de 3 g avec une valeur de 48mg/g par contre la masse 6g et 9g ont des rendements respectivement de 42 mg/g et 27 mg/ g.

II. Etude de la réduction en fonction La taille de la pouzzolane:

Les expériences ou nous avons utilisé 3 g de pouzzolane avec variation de la taille des particules de $3\text{mm} < \phi < 5\text{mm}$ et $800\mu\text{m} < \phi < 1.25\text{mm}$; montre que pour les petites tailles de pouzzolane on une augmentation rapide de pourcentage de réduction de Na^+ de 0% à 12 %, pour atteindre l'état d'équilibre à 15%(figure19). Et le pourcentage de pouzzolane de granulométrie $3\text{mm} < \phi < 5\text{mm}$ augmente rapidement de 0% à 9% et atteindre la saturation à 10 % (figure20).

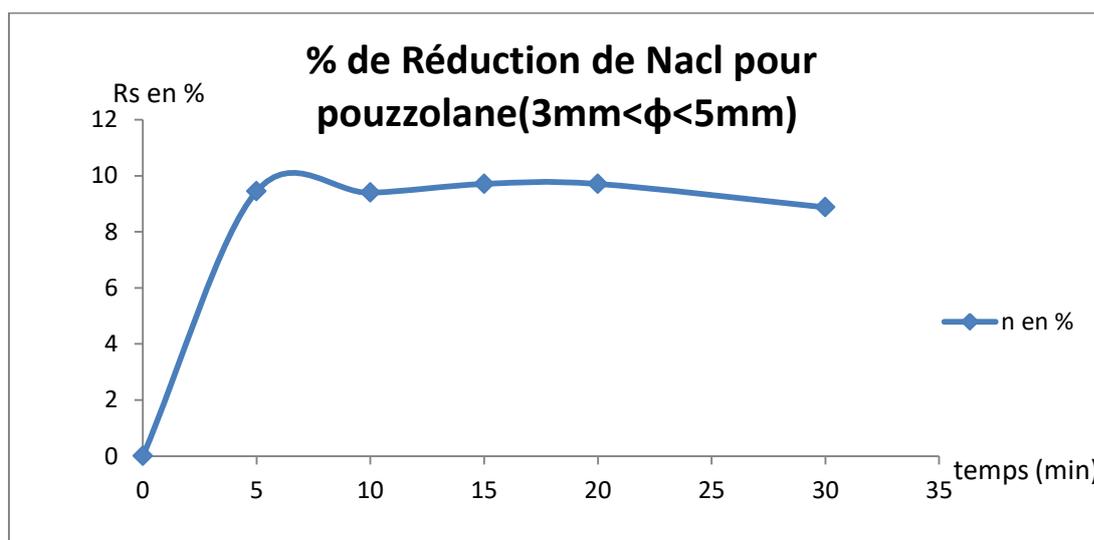


Figure 19:le pourcentage de réduction pour pouzzolane 3mm-5mm

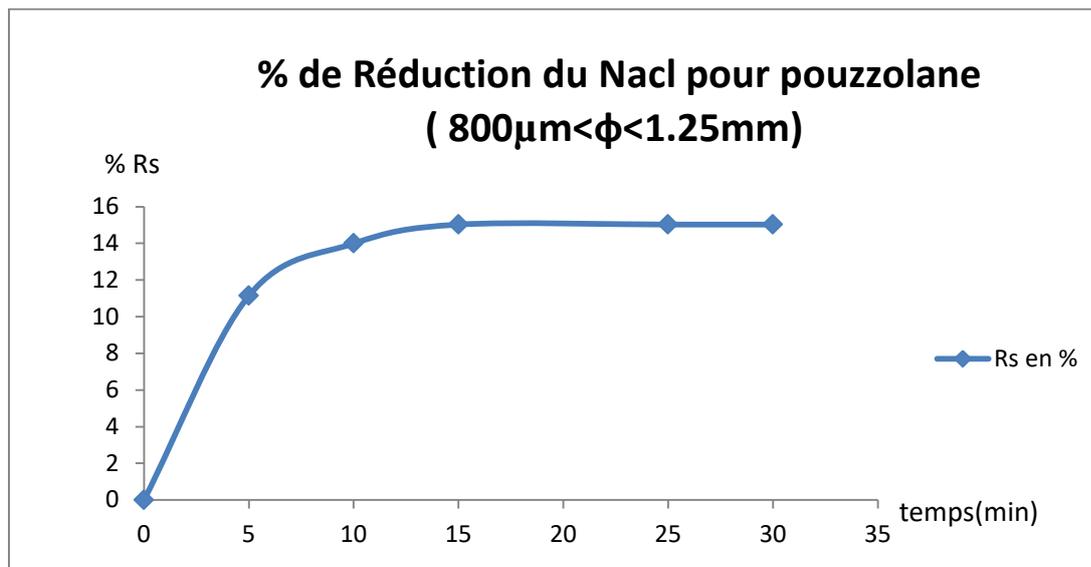


Figure 20: le pourcentage de réduction du Na Cl pour pouzzolane de 800µm ϕ <math><1.25</math>

Le tableau 11 montre que les conductivités des solutions de pouzzolane de granulométrie 800µm ϕ <math><1.25\text{mm}</math> et 3mm ϕ <math><5\text{mm}</math> diminue respectivement de 1772µs/cm et 1832µs/cm, par rapport à la solution mère de Na Cl sans l'ajout de pouzzolane qu'est de 1862 µs/cm. Ce qui peut être expliqué par la diminution de minéralisation et par conséquent l'augmentation de réduction des ions Na⁺.

Tableau 11: les conductivités, les Ph, et les températures des solutions de pouzzolane de différente granulométrie

Temps d'agitation (min)	La taille de pouzzolane	La conductivité (µs/cm)	pH	Température (°C)
5	800µm ϕ <math><1.25\text{mm}</math>	1722	6.87	24.3
	3mm ϕ <math><5\text{mm}</math>	1832	6.35	29.3
La solution mère de Na Cl sans ajout de pouzzolane		1862	6.28	25.9

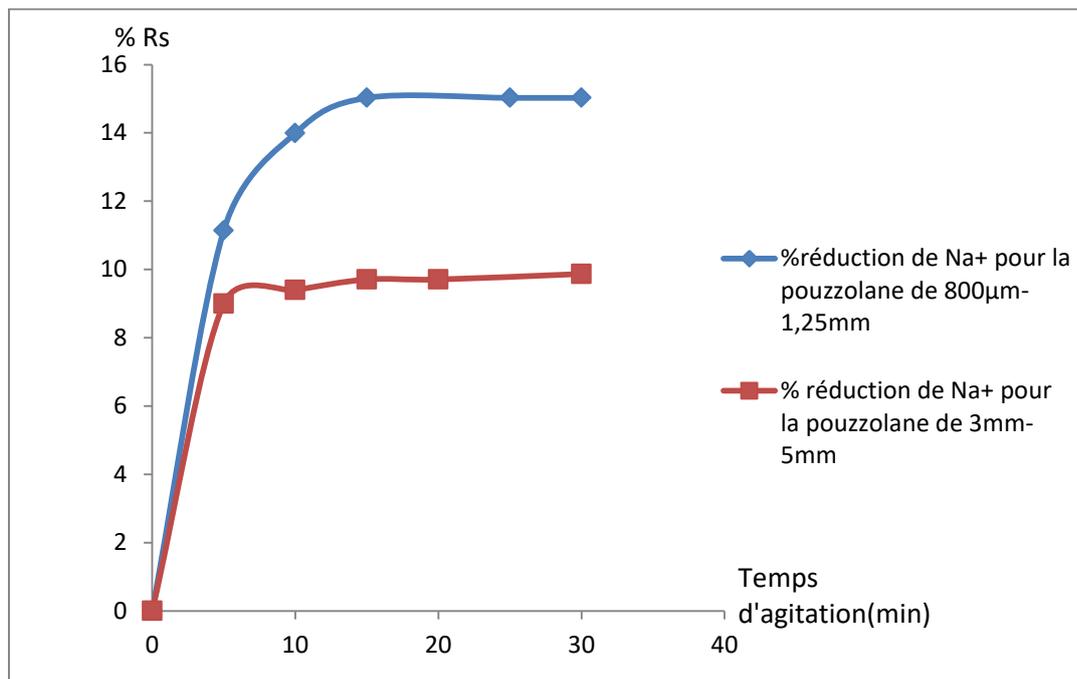


Figure 21: le pourcentage de Na+ pour la pouzzolane de différents diamètres

Synthèse : on constate que la pouzzolane de granulométrie fine conduit à une efficacité de réduction élevée, tandis que les particules de plus grosses tailles produisent un pourcentage de réduction plus faible. Cette diminution de la taille des particules de pouzzolane engendre l'augmentation de la surface de contact et par conséquent l'augmentation de pourcentage de réduction de Na^+ . (figure21)

III. Etude de la réduction en fonction La concentration de Na Cl:

D'après l'expérience réalisée par la concentration de Na Cl de 1 g/l avec la pouzzolane, on voit que la réduction suit une fonction exponentielle, augmente rapidement de 0mg/l à 110mg/l et se stabilise dans 150mg/l.(figure22)

Réduction de Na⁺ pour 1g/l de NaCl

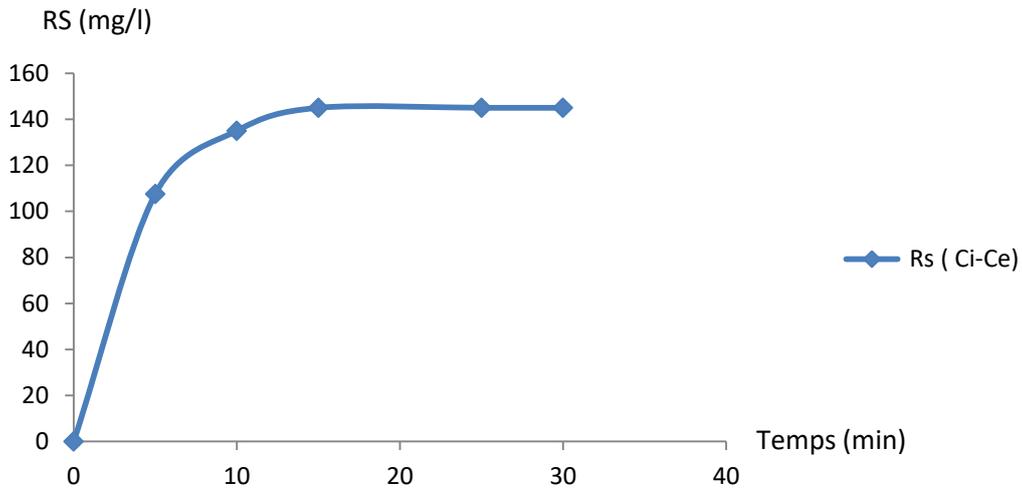


Figure 22: la réduction de Na⁺ pour 1g/L de NaCl

D'après l'expérience réalisée par la concentration de NaCl de 2 g/l avec la pouzzolane, on voit que la réduction de NaCl suit une fonction exponentielle, augmente rapidement de 0mg/l à 297mg/l et se stabilise dans 270mg/l.(figure23)

Réduction de Na⁺ pour 2g/l de NaCl

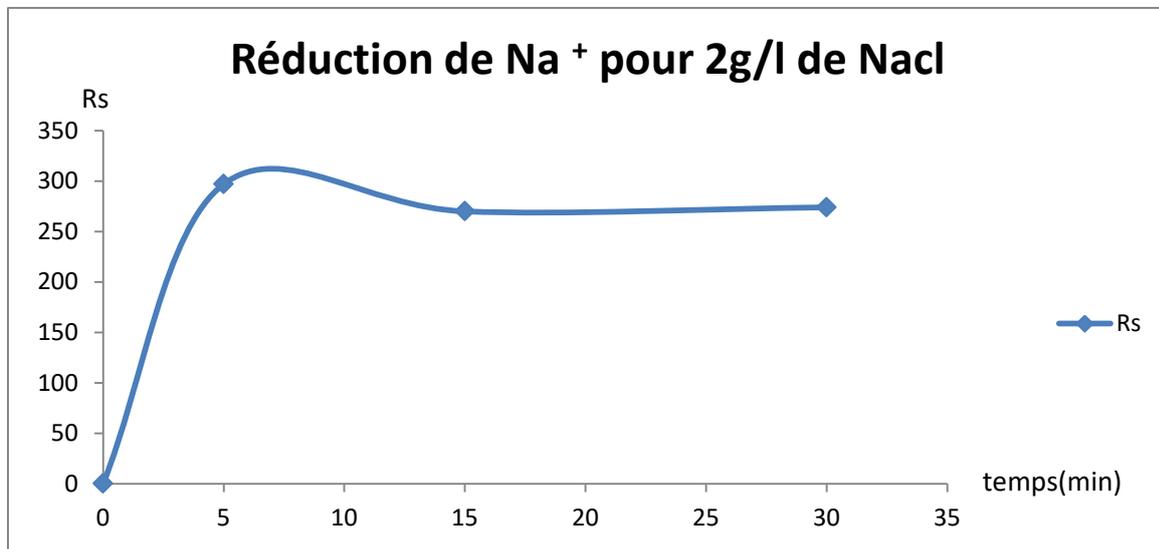


Figure 23: la réduction de Na⁺ pour 2g /l de NaCl

D'après l'essai réalisé par l'eau saumâtre de concentration de NaCl de 2.7g/l avec la pouzzolane, on observe que la réduction d'ion Na⁺, augmente rapidement de 0mg/l à 110mg/l et se stabilise dans 150mg/l.(figure24)

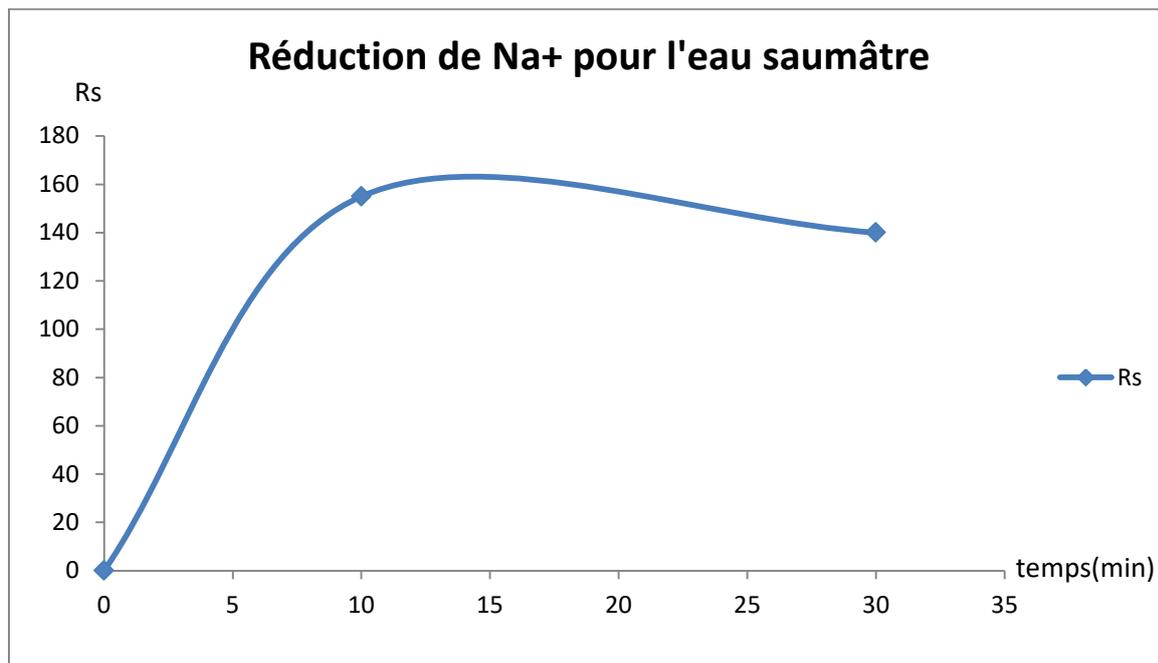


Figure 24: la réduction de Na⁺ pour l'eau saumâtre

Le tableau 12 montre que les conductivités des solutions de pouzzolane de concentrations 1g/l, 2g/l et 2.7g/l diminue respectivement de 1772 μ s/cm, 3.45ms/cm et 6.06ms/cm par rapport à les solutions mère de Na Cl sans l'ajout de pouzzolane, qu'ils de 1862 μ s/cm, 3.55ms/cm et 6.64ms/cm. Ce qui peut être expliqué par la diminution de minéralisation et par conséquent l'augmentation de réduction des ions Na⁺.

Tableau 12: les conductivités, les Ph, et les températures des solutions de pouzzolane de différente granulométrie

Temps d'agitation (min)	La concentration de Na Cl (g/l)	La conductivité	pH	Température (°C)
5	1	1722 μ s/cm	6.35	24.3
	2	3.45ms/cm	6.55	29.4
	2.7	6.06ms/cm	7.68	25.5
La solution mère sans l'ajout de pouzzolane	1	1862 μ s/cm	6.28	29.3
	2	3.55ms/cm	6.44	29.1
	2.7	6.64ms/cm	7.68	27.7

Tableau 13: Le pourcentage et le rendement pour les différentes concentrations de Na Cl

Echantillon	3g pouzzolane+Na cl 1g/l	3g pouzzolane+Na cl 2g/l	3g pouzzolane+eau saumâtre
Réduction de salinité en %	15.03	14.12	5
Rendement en mg/g	48.33	91.33	46.27

Synthèse : dans le tableau 13 ; Nous pouvons voir que la pouzzolane avec la petite concentration de Na cl (1g/l) conduit à une efficacité de réduction élevée, tandis que les grandes concentrations de sel (2 g/l et 2,7 g/l) produisent un pourcentage de réduction plus faible. On effet pour les concentrations élevées la pouzzolane sature rapidement, car le champ électrique de la pouzzolane n'est pas assez puissant pour attirer un autre ion Na^+ . Donc il faut augmenter la quantité d'adsorbant.

IV. Etude de la réduction de Na^+ en fonction de la température d'activation de pouzzolane:

Dans la figure 25, on peut voir que la réduction d'ion Na^+ par la pouzzolane activée ; elle augmente de 125mg/l à 167.5mg/l avec l'augmentation de la température à 150 °C et elle diminué respectivement de 120mg/l et 50mg/l lorsque la température activée est augmentée jusqu'à 225 °C et 300°C.

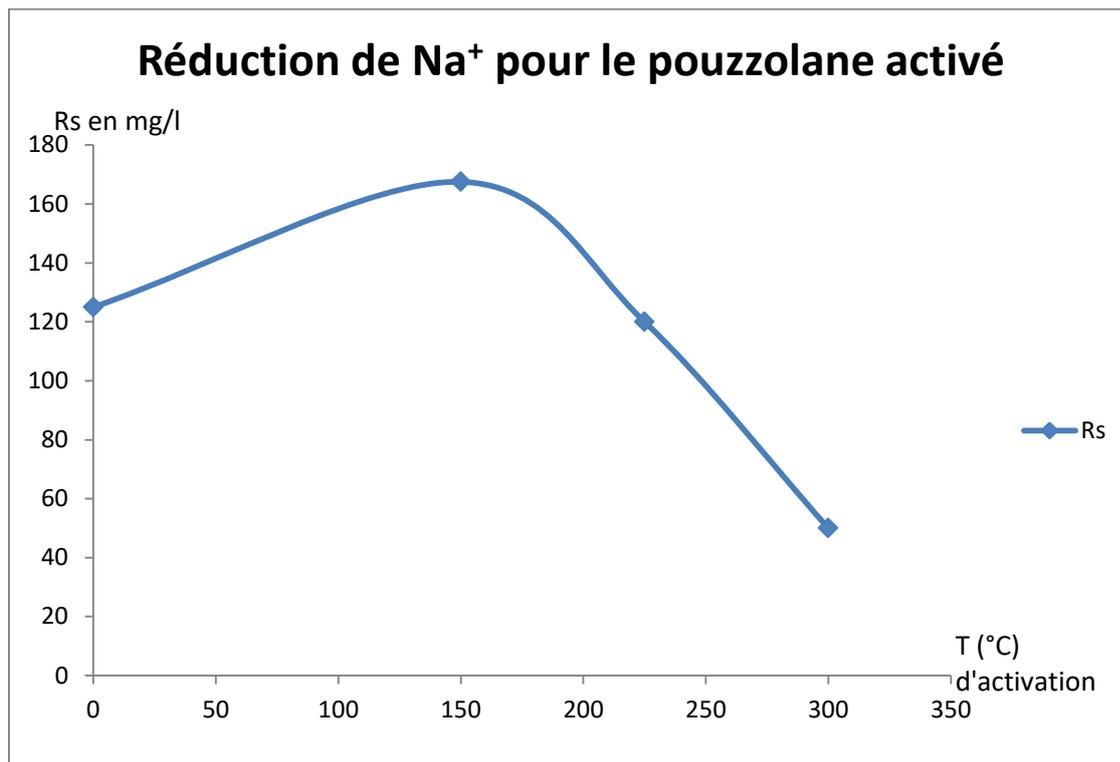


Figure 25: la réduction de Na⁺ pour la pouzzolane activée

Le tableau 14 montre que les conductivités des solutions de pouzzolane activée dans 150°C, 225°C et 300 °C diminuent respectivement de 1763µs/cm ,1815µs/cm et 1832µs/cm, par rapport à la solution mère de Na Cl sans l'ajout de pouzzolane qu'est de1870 µs/cm. Ce qui peut être expliqué par la diminution de minéralisation et par conséquent l'augmentation de réduction des ions Na⁺.

Tableau 14: conductivité, pH et température pour pouzzolane activé

Temps d'agitation	La température d'activation (°C)	pH	Température (°C)	Conductivité
30min	150	6,68	24	1763
	225	6,69	24,1	1815
	300	6,76	23,9	1816
La solution Mère de Na Cl Sans ajout de Pouzzolane	0	6.20	23.3	1870

Synthèse : d'après les résultats expérimentales, la pouzzolane naturelle activée à 150°C possède la plus forte réduction d'ion Na^+ . Cette réduction prise en compte en raison de l'augmentation de la surface superficielle due à l'élimination de substances organiques qui obstruent les canaux ou contaminent la surface effective de pouzzolane. Cette pouzzolane activée possède une capacité de sorption et d'échange d'ions significative ce qui améliore l'efficacité de la sorption des ions Na^+ sur la structure de la pouzzolane. Cependant, quand la température d'activation a encore été augmentée de 225 °C à 300 °C, l'efficacité de réduction de la pouzzolane naturelle a diminué. Il était probablement dû à la destruction de la structure de la pouzzolane en raison de la température élevée (figure 26).



Figure 26 : pouzzolane activé

V. Etude de La réduction de Na^+ dans les conditions optimales de la pouzzolane :

Dans l'essai de 3g de pouzzolane de diamètre $800\mu\text{m} < \phi < 1.25\text{mm}$ de activé à 150°C pendant 3 heures avec 50 ml d'eau saumâtre, on observe que la réduction de Na^+ augment de 0mg/l à 160mg/l puis se stabilise dans 220mg/l suit une fonction exponentielle.(figure 27)

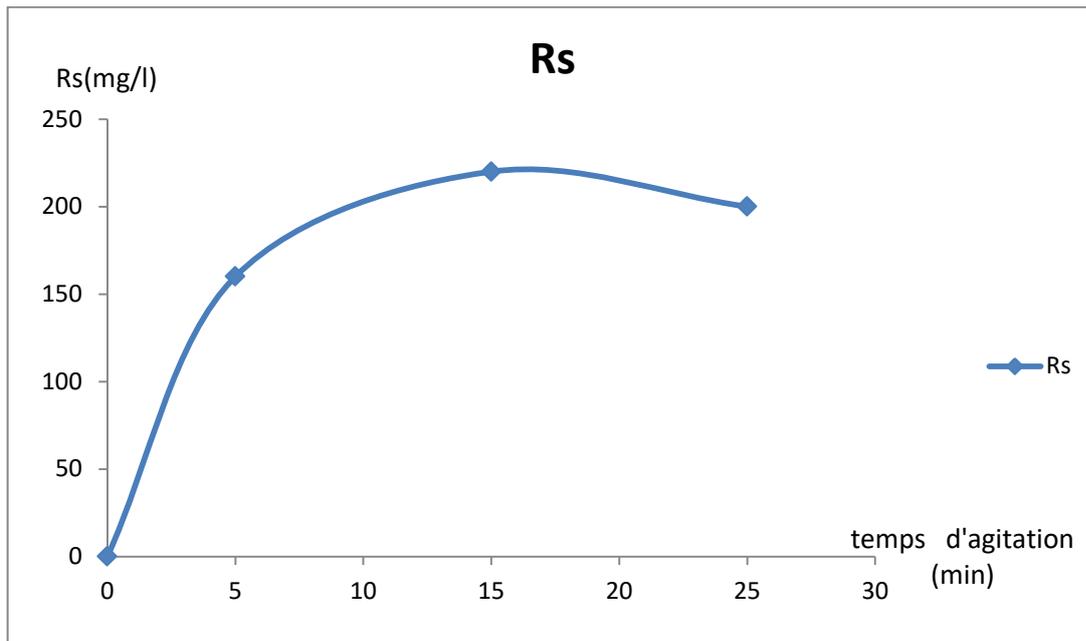


Figure 27 : la réduction de Na⁺ pour la pouzzolane activée à 150° C

Synthèse : D'après toutes les résultats précédentes, on conclut que les conditions optimales de modifications de pouzzolane pour obtient une meilleur réduction des ions Na⁺ sont : 3g de pouzzolane activé à 150°C pendant 3h avec une granulométrie de 800µm<φ<1.25mm.

Conclusion et perspective :

Nous avons modifié la pouzzolane naturelle de la région d'Ourika, en tant que matériau absorbant pour réduire la salinité de l'eau de saumâtre de la région d'Ait Ourire

La condition optimale de modification est de l'activer à 150°C pendant 3 h avec un granulats de $800\mu\text{m} < \phi < 1.25\text{mm}$. Les valeurs les plus élevées de R_s et de pourcentage R_s sont de 167,5 mg/l et de 17.72%. La pouzzolane à surface spécifique élevée possède une grande sorption et l'augmentation de la dose de pouzzolane peut facilement améliorer l'efficacité de la réduction du Na^+ . Par conséquent, la pouzzolane naturelle d'Ourika présente un potentiel élevé en tant que matériau absorbant économique pour le dessalement de l'eau saumâtre.

En se basant sur notre étude de testé la pouzzolane comme matériau absorbant pour l'intégré à l'avenir dans un pilote de filtre imbriqué permettre le dessalement des eaux saumâtres.

Annexe :

Préparation de pouzzolane :

- **Broyage de pouzzolane dans l'atelier de géologie :**



Figure 28 : Photo de broyeur

- **Essai granulométrique (tamisage) de pouzzolane :**

Tamiser la pouzzolane à l'aide des tamis (grilles à maille circulaire) de dimensions entre 3mm – 5mm et 1,25 mm - 800 μ m, après on prend le refus restant dans le tamis 3mm et 800 μ m.



Figure 29 : photo des tamis de diamètre 3mm et 5mm



Figure 30: la pouzzolane avec 2 diamètres de $800\mu\text{m} < \phi < 1.25\text{mm}$ et $3\text{mm} < \phi < 5\text{mm}$

Après le tamisage, nous avons rincé la pouzzolane avec l'eau potable, et le sécher dans l'étuve à 100°C .



Figure 31: photo de la pouzzolane rincée

- **Préparation des solutions d'étalonnages pour la spectrophotométrie a flamme :**
 - Préparation de la solution mère : une solution de 250 ml de 1g/L de Na^+ , K^+ et Ca^{2+} doit être préparée respectivement à base de Na Cl et K Cl et CaCO_3 .
 - Préparation de la gamme étalon : une série de dilution à préparer de 5, 10, 15, 25 et 50 mg/L

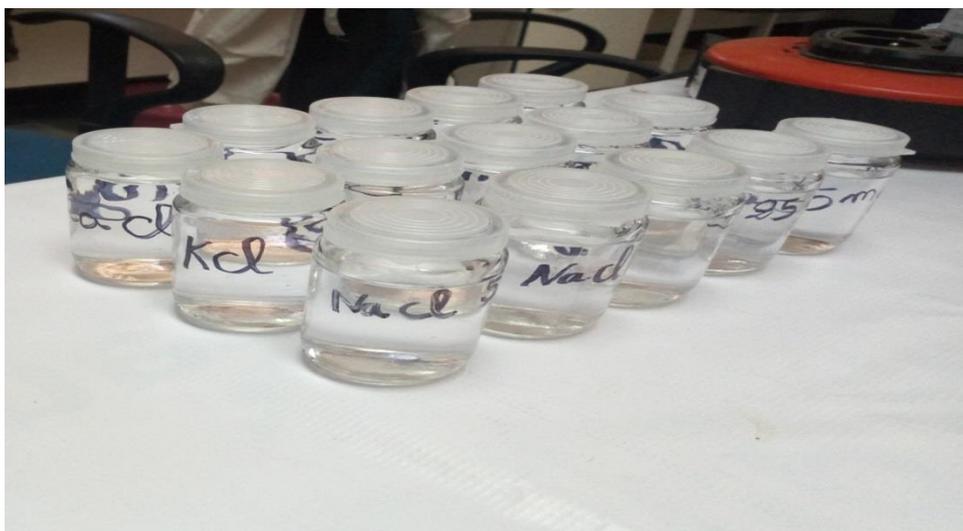


Figure 32: photo de la gamme étalon utilisée

1. Initialisation

- Démarrer l'appareil.
- Déclencher le régulateur de gaz en le tournant d'un quart dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.
- Déclencher l'arrivée d'air à partir du compresseur, la DEL Air **vert** s'allumera quand la pression devient > 7 psi.
- Ajuster le régulateur d'air à une pression de 10psi : La DEL **rouge** de gaz s'allumera et la sonnerie donnera une alarme qui s'arrêtera après 3 secondes.
- Le démarrage automatique de la flamme s'enclenche. La DEL **jaune** de la flamme s'allumera.
- Ajuster le régulateur de gaz pour arriver à une flamme non-étincelante au bout avec des cônes bleus aigues d'une hauteur approximative de 8 à 10 mm.
- Attendre 20 minutes pour la stabilisation de la flamme.



Figure 33: photo de la spectrophotométrie à flamme

2. Etalonnage de l'appareil : fonction 'Etalonner'

- Sélectionner la fonction 'Etalonner'
- Sélectionner mode de mesure : 1.GEN. 2.SERUM 3.URINE
- Utiliser les touches actives <1 à 3> pour sélectionner le mode souhaité.
- Noter la date d'enregistrement des gammes étalons.
- Sélectionner les éléments destinés à l'analyse : 1.Na/K 2.Li 3.Ca
- Utiliser les touches actives <1 à 3> pour sélectionner l'élément souhaité.
- Enregistrement de la gamme étalon.

Références

(s.d.). Consulté le 1 2008, sur wordpress: <https://dessalement.wordpress.com/>

(s.d.). Récupéré sur file:///D:/L'eau%20saum%C3%A2tre.html

Latrach, L. (2014). Removal of bacterial indicators and pathogens from. *Soil Science and Plant Nutrition* .

Naziha, K. (2017). *Contribution à la synthèse d'une membrane à base.*

TANSAKUL, C. (2009). *Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer.*

Viviane. (2003). Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. . *culture sciences chimie* .

Wibomo, E. (2017). Utilization of natural zeolite as sorbent material for seawater desalination.

Wibowo, E. (2017). Utilization of natural zeolite as sorbent material for seawater desalination.

D.Khawaji, A. (2007). Advances in seawater desalination technologies. *Desalination* , 47-69.