



## A comparative study between three methods of the remineralization of the osmosis water produced from desalination plant in the south of Morocco (Etude comparative entre trois méthodes de reminéralisation de l'eau osmosée des stations de dessalement et de déminéralisation au sud Marocain)

M.G. Biyoune<sup>1</sup>, A. Atbir<sup>1\*</sup>, E. Mongach<sup>2</sup>, H. Bari<sup>2</sup>, A. Khadir<sup>3</sup>, L. Hasnaoui<sup>3</sup>, L. Boukbir<sup>1</sup>, M. Elhadek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie des Procédés, Faculté des sciences, Université Ibn Zohr, B.P. 8106, Agadir, Maroc

<sup>2</sup>Office National de l'électricité et de l'eau, Direction de coordination des provinces sahariennes à Laayoune

<sup>3</sup>Office National de l'électricité et de l'eau, Direction contrôle qualité des eaux à Rabat.

Received 20 September 2014, Revised 17 Feb 2015, accepted 17 Feb 2015

\*Corresponding Author. E-mail: [aliatbir@gmail.com](mailto:aliatbir@gmail.com); Tel: (+212661855336)

### Abstract

Desalination is the process of removing salt and other minerals, especially from sea water to produce potable water for household or irrigation purpose. Waters produced by desalination plants cannot be directly used as they are unpalatable, corrosive and unhealthy. Remineralization is essential in order to overcome these problems. This study was conducted to examine the performances of the remineralization process adopted for three desalination units installed by the National Office of Drinking Water and Electricity (ONEE) in Laâyoune, Daoura and Agti Elghazi. Remineralization processes are necessary to equilibrate the water to avoid aggressiveness and corrosion in pipelines and to re-introduce some ions essential for human health. The distillate water produced by reverse osmosis in Laâyoune units is remineralized by adding hydrated lime and carbon dioxide. The remineralization process in Daoura's plant normally requires the application of sodium bicarbonate and calcium chloride. A commonly used operation in the Agti Elghazi's remineralization process is to pass demineralized water dosed with CO<sub>2</sub> through a bed of calcite. In the present study, the evolution of different indicators including Calco-carbonic equilibrium, total alkalinity, pH, pHs Langelier Saturation and Larson index were analyzed to evaluate the quality of the product water before distribution in order to study the efficiency, performance of remineralization in each desalination plant and to compare these methods both qualitatively and economically.

*Keywords:* Desalination, Remineralization, Calco-carbonic equilibrium, Laayoune, Agti Elghazi, Daoura

### Résumé

Le présent travail est effectué au sein de trois stations de dessalement et de déminéralisation installées par l'Office National de l'Electricité et de l'Eau potable (ONEE) dans le sud Marocain. Les techniques adoptées pour la reminéralisation au sein de ces stations sont différentes entre eux. Dans la station de dessalement de Laayoune (SDL), la reminéralisation se fait par l'ajout de la chaux Ca(OH)<sub>2</sub> en présence de CO<sub>2</sub>. Cependant, la reminéralisation dans la station de dessalement Agti Elghazi est effectuée par l'injection des bicarbonates de sodium NaHCO<sub>3</sub> et les chlorures du calcium CaCl<sub>2</sub>, alors que dans la station de déminéralisation de Daoura la reminéralisation se fait par passage à travers d'un lit calcite. Nous avons suivi plusieurs paramètres qualitatifs tels que le pH, pHs, TAC, TACs, teneurs en Ca<sup>2+</sup>, indice de Langelier et indice de Larson afin d'étudier d'une part, l'efficacité et la performance de la reminéralisation dans chaque station et d'autre part, de comparer ces procédés aussi bien de point de vue qualitatif qu'économique.

*Mots-clés:* Dessalement, Reminéralisation, Equilibre calco-carbonique, Laayoune, Agti Elghazi, Daoura

### 1 Introduction

L'eau est devenue une préoccupation majeure dans les régions du sud marocain. Les ressources hydriques conventionnelles (de surface et souterraine) sont très limitées [1,2]. La rareté des ressources en eau et leur mauvaise qualité peuvent avoir des répercussions importantes sur les secteurs socio-économiques dans ces régions. En effet, pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, l'Office National de l'Eau et l'Electricité (ONEE) au Maroc s'est engagé dans la réalisation d'un vaste et ambitieux programme visant la construction de plusieurs stations de dessalement d'eau de mer au sud Marocain [3-4].

Il est donc particulièrement important de noter que au cours de ces trois dernières décennies, l'ONEE suit l'avancement des nouvelles technologies de dessalement afin d'augmenter progressivement les capacités de production des stations en eau potable, figure 1 [5-8].

La première expérience de l'ONEE en matière de dessalement de l'eau dans la région du sud remonte en effet à l'année 1976, lorsque l'Office a réalisé une unité de déminéralisation par électrodialyse avec une capacité de production atteignant 75 m<sup>3</sup> par jour en vue d'approvisionner la ville de Tarfaya en eau potable.

Une année plus tard, 1977, une nouvelle usine de distillation par compression mécanique de vapeur voit le jour à Boujdour pour une capacité de 250 m<sup>3</sup>/jour. Grâce à une capitalisation sur l'expérience de dessalement, l'ONEE revendique la parfaite maîtrise de cette technologie et lance, en 1995, deux autres stations utilisant le procédé d'osmose inverse à Laâyoune (7000 m<sup>3</sup>/j) et à Boujdour (800 m<sup>3</sup>/j). En 2005, ces deux stations ont fait l'objet de travaux d'extension permettant d'augmenter leurs capacités de production pour atteindre 13000 m<sup>3</sup>/j à Laâyoune et 2400 m<sup>3</sup>/j à Boujdour.

En vue d'accompagner les besoins en eau potable des habitants du Daoura (situé à 45 km au nord de Laâyoune), une station de dessalement de l'eau de mer a été réalisée en 2008 pour un débit de près de 240 m<sup>3</sup>/jour. Aujourd'hui, la capacité de la station de Laâyoune double le volume de production qui atteint 26 mille m<sup>3</sup>/j. Au village des pêcheurs Sidi Agti Elghazi dans la province de Boujdour, l'approvisionnement en eau potable est assuré à partir d'une station de dessalement dotée d'une capacité de près de 90 m<sup>3</sup> par jour.

Actuellement, la production en eau osmosée est d'environ 100 Mille m<sup>3</sup>/j alors qu'elle n'était que de 75 m<sup>3</sup>/j en 1976 (figure 1). Dans cette même perspective, l'ONEE ambitionne également de tripler sa capacité de production (300 mille m<sup>3</sup>/j) par la réalisation à moyen terme les stations de dessalement planifiées à Laâyoune, à Agadir et à long terme de nouvelles unités à Tiznit, Sidi Ifni, Tan Tan, Guelmim, Essaouira, Safi, El Jadida, AL Hoceima et Saidia.... L'objectif principal étant d'accompagner les besoins croissants en cette matière vitale en raison de la croissance démographique et du développement urbain que connaissent certaines villes.

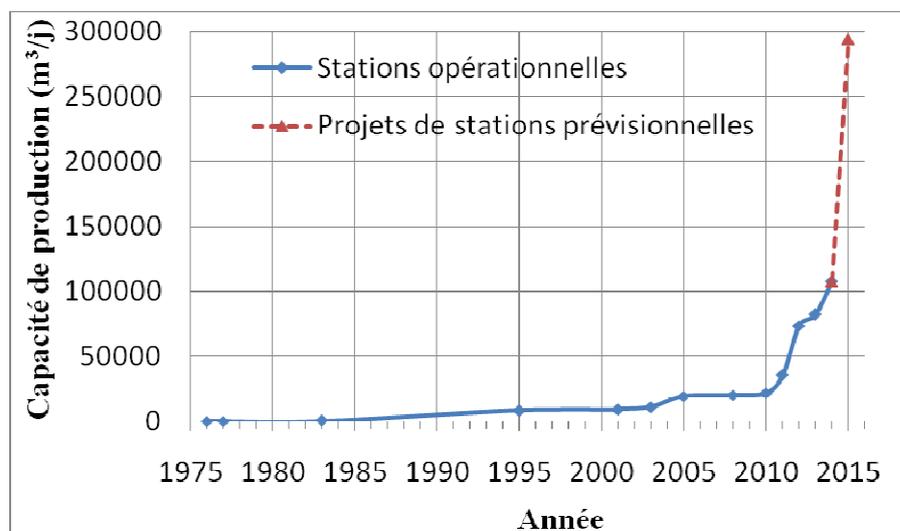


Figure 1 : Evolution de la capacité de production des stations de dessalement au Maroc

A travers le monde, les usines de dessalement actuellement en service et les plus répandus font appel à deux grandes familles de procédés de dessalement conventionnels : Le procédé thermique et le procédé membranaire appelé osmose inverse.

L'ONEE-Branche Eau au Maroc, a adopté la technique de l'osmose inverse aussi bien pour dessaler l'eau de mer que pour déminéraliser des eaux saumâtres. Il s'agit du procédé nécessitant la plus basse mise de fond et les coûts d'opération les plus faibles puisque sa consommation d'énergie est plus basse, sa construction est la plus facile et le procédé est plus simple que la distillation [9].

L'osmose inverse consiste à obtenir une eau douce par l'utilisation des membranes semi-perméables, dans lesquelles l'eau pure traverse les trous des membranes à cause d'une haute pression appliquée. L'eau produite après le dessalement (eau osmosée) est non équilibrée car elle est caractérisée par une faible salinité et une agressivité et corrosivité élevées. De ce fait, elle peut attaquer les conduites et les ouvrages et relargue ainsi des substances indésirables et néfastes pour la qualité de l'eau. Par conséquent, elle peut provoquer des problèmes sanitaires lorsqu'elle est utilisée directement comme source d'eau potable [10-12].

D'où la nécessité d'un post-traitement de reminéralisation permettant de rendre à l'eau osmosée son équilibre calco-carbonique et de préserver ainsi le réseau de distribution de la dégradation par corrosion. En générale, cette reminéralisation conférera à l'eau produite les caractéristiques optimales souhaitées de minéralisation répondant aux normes Marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine [13,14].

Plusieurs méthodes peuvent reminéraliser l'eau osmosée, mais elles ne sont pas toutes applicables à cause du coût élevé d'investissement et de la complexité de la technique. On mentionne ici les principaux procédés les plus utilisables [12, 15] :

- A- Application de la chaux hydratée avec le carbonate du sodium : Cette méthode a tendance de produire le dépôt non-adhérent  $\text{CaCO}_3$ . En plus, elle est non utilisable principalement dans les grandes stations en raison du grand coût d'exploitation associé au prix du carbonate de sodium [12].
- B- Application du bicarbonate de sodium avec les sulfates du calcium : En général, cette méthode n'est pas pratiquée puisque le sulfate de calcium a une faible solubilité dans l'eau. En outre, le bicarbonate de sodium est très coûteux et le stockage de ces deux produits chimiques est difficile car ils sont sensibles à l'humidité [12].
- C- Application du bicarbonate de sodium avec les chlorures du calcium : Il consiste à préparer des solutions en grande quantité [10]. Cette méthode augmente la teneur des ions chlorures dans l'eau, ce qui augmente la conductivité. En plus; ces deux réactifs sont très coûteux [8].
- D- Mélange de l'eau dessalée avec des eaux assez salées : une stabilisation partielle peut être obtenue par le mélange de l'eau dessalée avec une eau riche en minéraux telles que les eaux souterraines saumâtres ou de mer. Cela peut aider à améliorer la qualité organoleptique de l'eau. Il faut souligner que le mélange seul ne suffira pas à atteindre toutes les exigences nécessaires à la qualité de l'eau.
- E- Application du dioxyde de carbone avec un excès de la chaux hydratée : cette méthode consiste à mélanger l'eau de chaux avec l'eau dessalée acidifiée et contenant  $\text{CO}_2$ . L'utilisation de la chaux directement augmente la turbidité et peut dépasser quelques fois 5NTU [12,16-18]. Cependant, l'approvisionnement de l'eau de chaux (la suspension) est relativement complexe [19, 20].
- F- Passage de l'eau dessalée contenant le dioxyde de carbone à travers un lit de calcite : Le processus de dissolution de la calcite est le plus simple et le plus largement utilisé. La calcite est moins chère que la chaux et consomme uniquement la moitié de la quantité de  $\text{CO}_2$  nécessaire dans la méthode de l'ajout de chaux. En outre, l'équipement pour le traitement de la calcite est beaucoup moins cher par rapport au système requis pour la préparation et le dosage des suspensions de chaux [10,12].

Le but de ce travail est d'effectuer une étude expérimentale sur trois différents procédés de reminéralisation au sein de trois stations de dessalement et déminéralisation installées par l'ONEE au sud marocain :

- La reminéralisation par l'ajout de la chaux en présence du  $\text{CO}_2$  au sein de la station du dessalement de Laâyoune (SDL).
- La reminéralisation par l'injection du bicarbonate du sodium  $\text{NaHCO}_3$  et des chlorures du calcium  $\text{CaCl}_2$  au sein de la station de dessalement d'Agti Elghazi.
- La reminéralisation par passage à travers d'un lit de calcite au sein de la station de déminéralisation de Daoura.

Dans toutes les stations, l'eau produite après la reminéralisation doit répondre aux caractéristiques suivantes pour qu'elle soit équilibrée [21] :

- ✓  $\text{TAC} \geq 8 \text{ °F}$
- ✓  $\text{Ca}^{2+} = 8 \text{ °F}$
- ✓  $8 < \text{pH} \leq 8,5$

D'un autre côté, et pour chaque procédé, nous avons estimé et comparé le coût des produits chimiques utilisés pour la reminéralisation d'un mètre cube d'eau potable.

## 2-Matériels et méthodes :

Le titrage des ions calcium a été effectué à l'aide d'une solution de sel disodique de l'acide EDTA à  $\text{pH}=10$ . L'indicateur coloré est le NET (Noir d'Eriochrome T) qui donne une couleur rouge foncée ou violette en présence des ions calcium.

TA : le titre alcalimétrique permet la mesure de la teneur en hydroxyde et en carbonates.

TAC : titre alcalimétrique complet mesure la somme des alcalins libres ( $\text{OH}^-$ ), carbonates et bicarbonates. L'alcalinité évalue le pouvoir tampon d'une eau.

La détermination du TA et TAC est basée sur le dosage des bases qui se trouvent dans une eau telle que  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{OH}^-$ . Elle se mesure par la neutralisation d'un certain volume d'eau par une solution diluée d'un acide minérale, le point d'équivalence étant déterminé par des indicateurs colorés.

L'anhydride carbonique  $\text{CO}_2$  libre de l'eau est déterminé par la relation [22] :

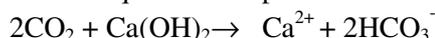
$$\text{CO}_2 = (\text{TACs} - \text{TAC}) \cdot 22$$

Tel que le TAC (titre alcalimétrique complet de l'eau) et le TACs (le titre alcalimétrique complet de l'eau mesuré après le test de marbre). Ils sont exprimés en méq/L.

### 3- Résultats et discussion :

#### 3.1. La reminéralisation par la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence de $\text{CO}_2$ dans la SDL

La station de dessalement de Laayoune (SDL) est installée depuis 1995 assurant une production de 7000  $\text{m}^3/\text{j}$ . Après, en 2005, l'extension de la station a permis de produire 13000  $\text{m}^3/\text{j}$ . Maintenant, la production atteint 26000  $\text{m}^3/\text{j}$ . L'eau osmosée (perméat) est reminéralisée par l'injection de l'eau de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  préparée dans un saturateur de chaux afin d'obtenir une eau équilibrée en présence de  $\text{CO}_2$  selon la réaction :



La quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nécessaire pour équilibrer l'eau est de 59,2  $\text{g}/\text{m}^3$ . En tenant compte d'un taux d'impuretés de 8 %, la quantité du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  additionnée est de l'ordre 64  $\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 3-1-1 -Evolution des paramètres de l'eau traitée :

Afin d'étudier et d'examiner la performance de la méthode exploitée pour la reminéralisation à la SDL, nous proposons de suivre quelques indices pH,  $\text{Ca}^{2+}$ , TH et TAC de façon à entretenir la qualité de l'eau produite. La figure 2 rassemble l'évolution des caractéristiques de l'eau traitée pendant une période de 18 mois, du 04/01/2012 au 15/05/2013.

D'après la figure 2, il apparaît que pendant toute la période, les caractéristiques de l'eau sont en perturbation. Les valeurs du TAC et de la concentration des ions  $\text{Ca}^{2+}$  restent dans la plupart du temps inférieures à 8°F malgré l'ajout d'une quantité suffisante de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  égale à 64  $\text{g}/\text{m}^3$  pour la reminéralisation.

En pratique, il est aussi possible de déterminer indirectement si une eau est agressive, incrustante ou corrosive en utilisant différents indices facilement mesurables :

- Indice de Langelier (indice de saturation): cet indice est défini de la façon suivante :

$$\text{IL} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

Il permet d'apprécier de façon qualitative le caractère agressif ( $\text{IL} < 0$ ) ou incrustant ( $\text{IL} > 0$ ).

Puisque MLSI ou IL (-1,14) est négative, l'eau reminéralisée possède encore un caractère agressif.

- Indice de Leroy : Il est défini de la façon suivante :  $\text{Id} = \text{TAC} / \text{TH}$

TAC (Titre Alcalimétrique Complet) et TH (Titre Hydrotimétrique) sont exprimés en degrés français. Pour que les risques de corrosion soient faibles, il faut que la valeur de ce ratio soit comprise entre 0,7 et 1,3.

L'indice de Leroy ( $\text{Id} = 0,93$ ) est situé entre  $0,7 < \text{Id} < 1,3$  ce qui exprime que cette eau est corrosive. Cela confirme le résultat trouvé préalablement que cette eau non équilibrée malgré l'injection d'une quantité suffisante de la chaux, tableau 1.

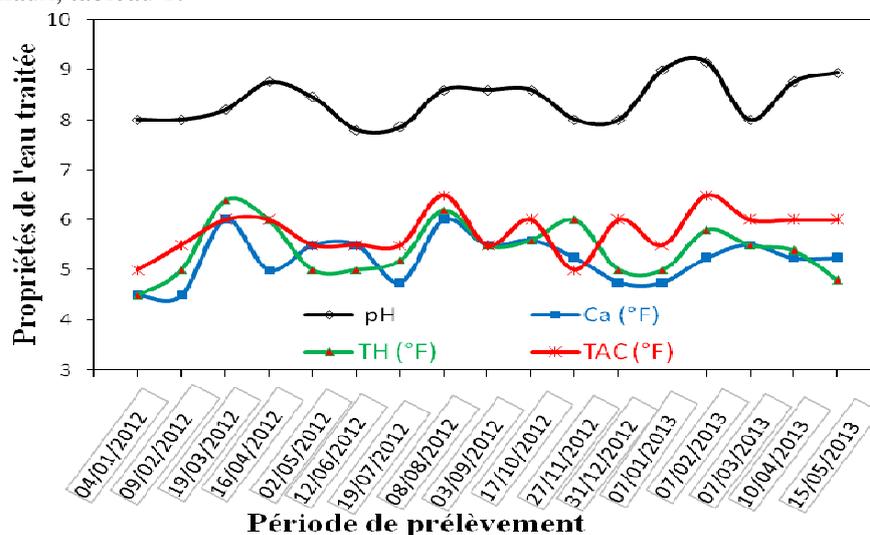


Figure2 : Variation des caractéristiques de l'eau de la SDL

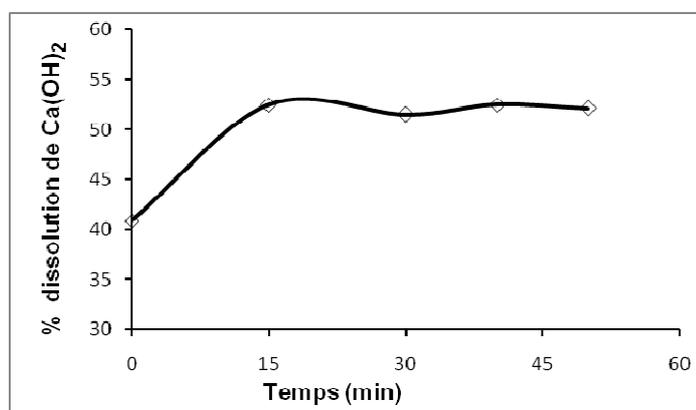
Nous sommes convaincus que la reminéralisation au sein de la station de dessalement de Laâyoune n'arrive pas à atteindre les normes souhaitées. L'eau possède toujours un caractère agressif, tableau 1. Nous nous sommes donc amenés à réaliser une étude complète afin de justifier cette anomalie et éventuellement proposer une solution alternative.

**Tableau 1:** Paramètres physico-chimiques de l'eau reminéralisée de la station de Laâyoune

Paramètres	Eau avant reminéralisation	Eau après reminéralisation	Normes Marocaines sur la qualité de l'eau potable
pH	5,6	7,45	6,5 – 8,5
TAC (mg/L)	14,03	75,65	200
MLSI ou IL	-2,5	-1,4	-0,2<IL< 0,2
Id	0,56	0,93	.....

### 3-1-2 - effet du temps de contact sur la dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

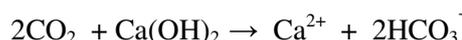
Cette expérience est effectuée au sein du laboratoire, on fait reminéraliser un volume de l'eau osmosée par l'ajout d'une quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en maintenant la même concentration  $64\text{g/m}^3$ . En suite, on fait le dosage de la teneur de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissoute par l'ajout de l'acide chlorhydrique HCl. Nous avons procédé à plusieurs répétitions en modifiant seulement le temps de contact. La figure 3 illustre les résultats trouvés. On note qu'uniquement 52% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se dissocient dans l'eau osmosée pendant une période de 15 min, alors qu'une perte d'environ 48% restent à l'état solide malgré un temps de contact largement suffisant. De ce fait, le reste 48% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en matière solide constitue non seulement un abaissement des valeurs du TAC et de  $\text{Ca}^{2+}$ , mais également un immense gaspillage économique pour la station de Laâyoune.



**Figure3 :** Dissolution de la chaux en fonction du temps

### 3.1.3-Teneur en $\text{CO}_2$ dans l'eau de la SDL

Parmi les paramètres qui peuvent influencer sur la dissociation de la chaux dans l'eau osmosée est la teneur de  $\text{CO}_2$  dissout selon la réaction suivante :

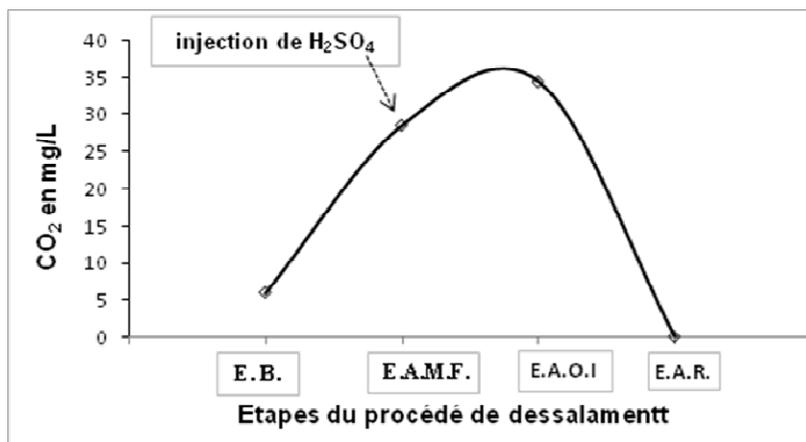


L'approvisionnement de  $\text{CO}_2$  dans l'eau se fait par l'injection de l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  qui transforme les ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  en  $\text{CO}_2$ . Dans la SDL la quantité injectée du  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est de  $40\text{ mg/L}$ .

Pour qu'on puisse conférer à l'eau ses caractéristiques (TAC, TH,  $\text{Ca}^{2+}$ ) optimales de  $8^\circ\text{F}$ , le calcul théorique montre que nous avons besoin au moins d'une quantité de  $\text{CO}_2$  égale à  $70,4\text{ mg/L}$ .

La figure 4 illustre la teneur de  $\text{CO}_2$  mesurée au sein des prélèvements d'eau prise à la station de Laâyoune pour les différentes étapes de dessalement ; eau brute, après microfiltration, après osmose inverse et après reminéralisation.

La teneur de  $\text{CO}_2$  au sein de l'eau osmosée (après OI) est égale à  $34,54\text{ mg/L}$ . Elle reste inférieure à la valeur nécessaire, calculée précédemment,  $70,4\text{ mg/L}$ . Cette déficience en  $\text{CO}_2$  constitue un facteur limitant de la dissolution d'une grande quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .



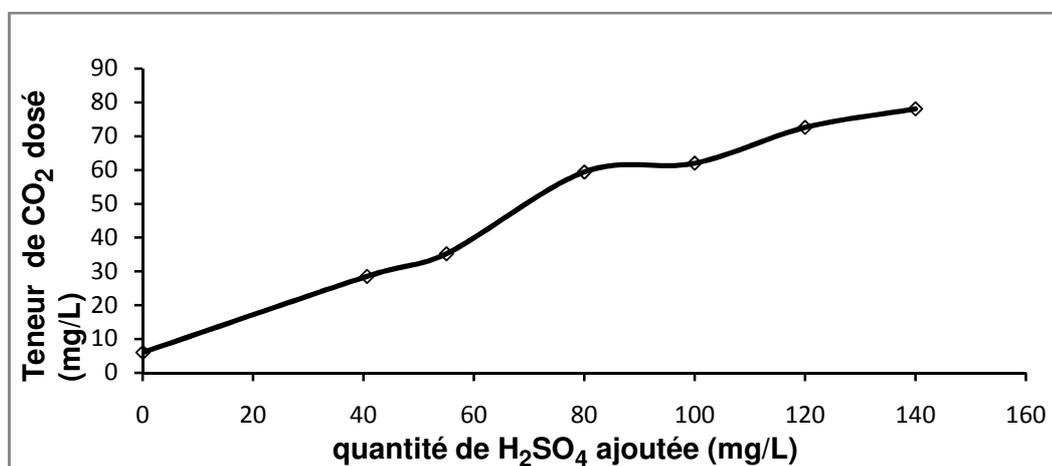
**Figure 4 :** Teneur en CO<sub>2</sub> dans l'eau de la SDL  
 E.B. : eau brute, E.A.M.F. : eau après microfiltration,  
 E.A.O.I. : eau après osmose inverse, E.A.R. : eau après reminéralisation

### 3.1.4 – Effet de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'eau de la SDL.

Dans cette partie, nous envisagerons de déterminer la quantité de CO<sub>2</sub> dissoute au sein de l'eau osmosée. Pour cela, nous avons suivi l'évolution de la teneur en CO<sub>2</sub> formée en fonction de la quantité de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ajoutée, afin de déterminer sa quantité optimale nécessaire pour atteindre une teneur de CO<sub>2</sub> d'environ 70,4 mg/L, figure 5. A partir de cette expérimentation nous constatons que nous avons besoin d'environ 120 mg/L de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pour avoir une quantité de CO<sub>2</sub> suffisante à la reminéralisation.

En conclusion, la reminéralisation par la chaux au sein de la SDL est soumise à des contraintes majeures à cause de la déficience de la quantité de CO<sub>2</sub> correspondant à l'équilibre calco-carbonique.

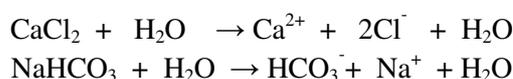
Il est donc souhaitable d'introduire une quantité suffisante d'acide sulfurique pour approvisionner l'eau osmosée en des teneurs relativement suffisantes en CO<sub>2</sub>. L'eau reminéralisée ainsi produite, satisfera toutes les normes sanitaires en pH, TH, TAC et Ca<sup>2+</sup>.



**Figure 5 :** Evolution de la teneur de CO<sub>2</sub> en fonction de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

### 3.2. Reminéralisation par ajout du CaCl<sub>2</sub> et NaHCO<sub>3</sub>

La station de dessalement AGTI ELGHAZI est installée en 2009. Sa production journalière est de 90 m<sup>3</sup>/j, pour une population estimée à 2500 habitants. La méthode adoptée pour la reminéralisation au sein de cette station consiste essentiellement à additionner directement les solutions de bicarbonates de sodium (NaHCO<sub>3</sub>) et des chlorures de calcium (CaCl<sub>2</sub>) dans l'eau osmosée avec des doses bien précises afin de normaliser le TAC, le pH et le TH selon les réactions :



### 3-2-1 -Suivi des paramètres de l'eau traitée

Dans ce paragraphe, nous proposons de suivre les caractéristiques de l'eau produite par la station d'AGTI ELGHAZI pendant une durée de 19 mois du 24/02/2012 au 27/08/2013. La figure 6 représente l'allure de l'évolution des propriétés de l'eau traitée. D'après cette figure, la reminéralisation par l'injection de  $\text{NaHCO}_3$  et  $\text{CaCl}_2$  corrige le pH entre 7,8 et 8,3. Les autres paramètres, TH et TAC sont instables. Ils varient entre 7°F et 9°F, alors que la teneur des ions  $\text{Ca}^{2+}$  ne dépasse pas 7,5 °F.

Cette méthode de reminéralisation est caractérisée par une simple addition et dissolution des produits. En plus, elle présente un faible coût d'investissement pour l'espace requis pour son exploitation. Cependant, certains produits chimiques et en particulier,  $\text{NaHCO}_3$  ont une faible solubilité et nécessitent des grands réservoirs pour les dissoudre.

Dans les grandes stations de reminéralisation, cette méthode demande une grande quantité des réactifs, ce qui impose l'approvisionnement des réactifs et la disponibilité des espaces convenables pour leurs stockages.

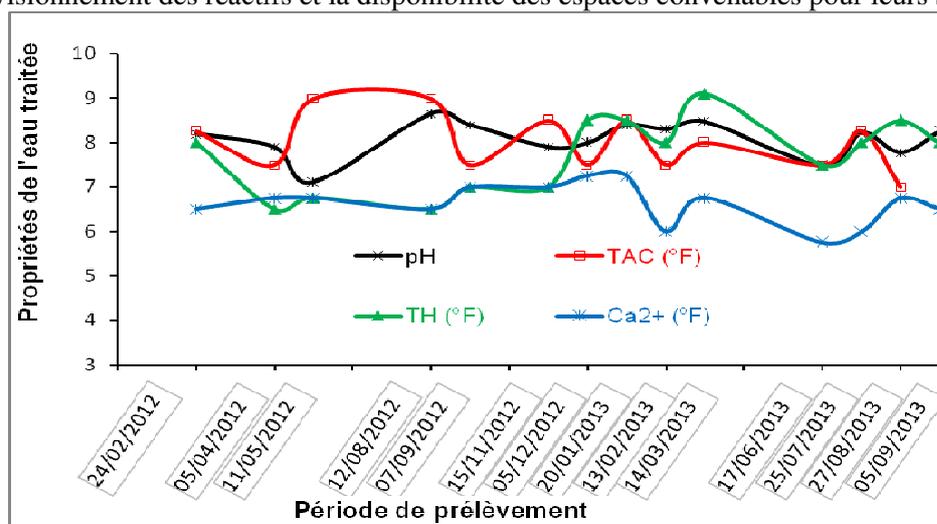
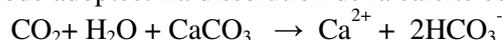


Figure 6 : Variation des caractéristiques de l'eau de la station Agti Elghazi

### 3.3. Reminéralisation par passage à travers un lit de calcite

Doura est un petit village situé au nord de la ville de Laâyoune. Depuis 2009, L'ONEE a installé dans ce village une station de déminéralisation de l'eau provenant des puits saumâtres pour la production de l'eau potable. Cette station dessert une population de plus de 8000 habitants par une production journalière de 240 m<sup>3</sup>/jour. Notre étude s'intéresse spécialement à la reminéralisation adoptée au sein de cette station. Elle consiste à passer l'eau osmosée à travers un lit de calcite du bas vers le haut par un débit de 10 L/h afin que l'eau sortante soit reminéralisée. Nous nous intéressons aux différents paramètres pH, TAC,  $\text{Ca}^{2+}$ , de l'eau traitée qui donnent une idée sur la performance de la méthode adoptée. La dissolution de la calcite est réalisée selon la réaction :



En conséquence, l'alcalinité (concentration en  $\text{HCO}_3^-$ ) et la dureté (teneur en  $\text{Ca}^{2+}$ ) de l'eau augmentent.

#### 3-3-1 Suivi des paramètres de l'eau traitée :

Dans un premier temps, nous avons suivi l'évolution des différentes caractéristiques de l'eau produite après la reminéralisation à travers un lit de calcite sans ajout de l'acide sulfurique. Les résultats sont affichés sur la figure 7.

Dans ce cadre et à l'issue de la période d'expérimentation fixée du 19/01/2012 au 30/06/2013, on observe une stabilité de tous les paramètres physico-chimiques de l'eau produite après reminéralisation à travers le lit de calcite.

Cette technique semble efficace du fait que la dissolution de la calcite  $\text{CaCO}_3$  se fait sans acidification de l'eau osmosée. Toutefois, quelques paramètres comme le calcium et le TH restent inférieurs à 8 °F.

Afin de maîtriser l'influence de l'acide sulfurique sur la reminéralisation, nous avons fait une nouvelle étude sur ces mêmes caractéristiques de l'eau en ajoutant dans ce cas, une quantité de 30 mg/L de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de manière que la concentration en sulfate de l'eau reminéralisée soit très inférieure aux normes suggérées par l'OMS (250 mg/L).

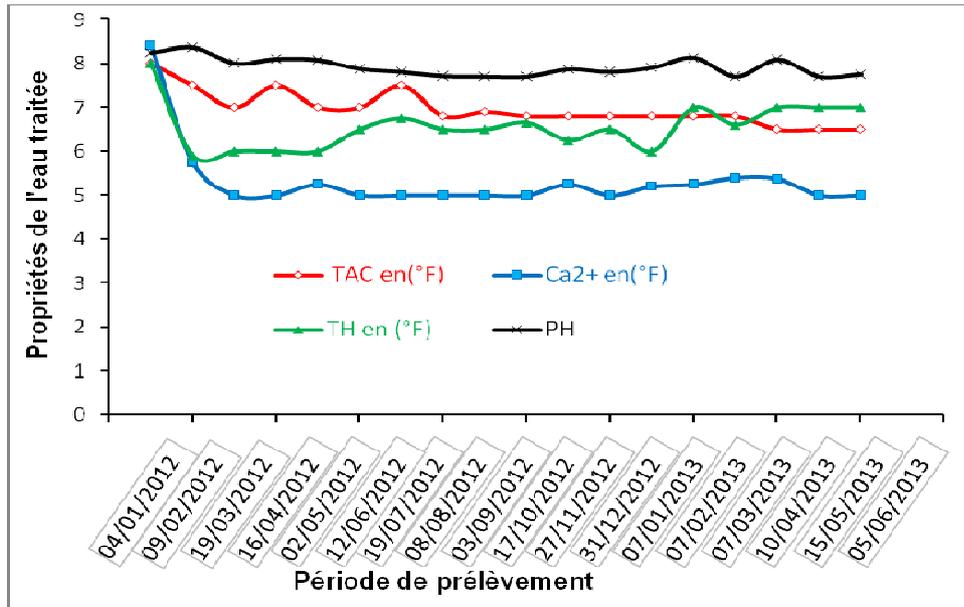


Figure 7 : Variation des caractéristiques de l'eau de la station de Daoura avant acidification

Cette étude a mis en évidence que l'addition de l'acide sulfurique a augmenté d'avantage la dissolution de la calcite. Le processus a finalement contribué à ajuster l'ensemble les paramètres physico-chimiques de l'eau osmosée, figure 8.

Sachant que 1 degré français correspond à une concentration de 1/5 de milliéquivalent par litre ( $1^{\circ}\text{F}=2.10^{-4}$  éq./L).

D'après le tableau 1, les normes Marocaines sur la qualité de l'eau potable pour le TAC est inférieure à 200 mg/L. Une solution qui contient 200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (de masse molaire de  $100 \text{ g.mol}^{-1}$ ) renferme donc  $200.10^{-3}/100 = 2.10^{-3} \text{ mol/L}$  de  $\text{CaCO}_3$ . C'est-à-dire :  $4.10^{-3} \text{ éq./L}$ , soit encore 20 °F.

De ce fait, la valeur trouvée du TAC (8 °F) après reminéralisation est conforme aux exigences de qualité des eaux de consommation Marocaines (20 °F).

La reminéralisation à travers un lit de calcite est efficace et simple. Elle nécessite une quantité minimale en  $\text{CO}_2$ , presque la moitié de celle réellement exigée par la méthode utilisant la chaux.

Elle n'exige pas d'efforts majeurs ou des précautions dans son exploitation. En plus, cette méthode permet de prendre toutes les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des personnels.

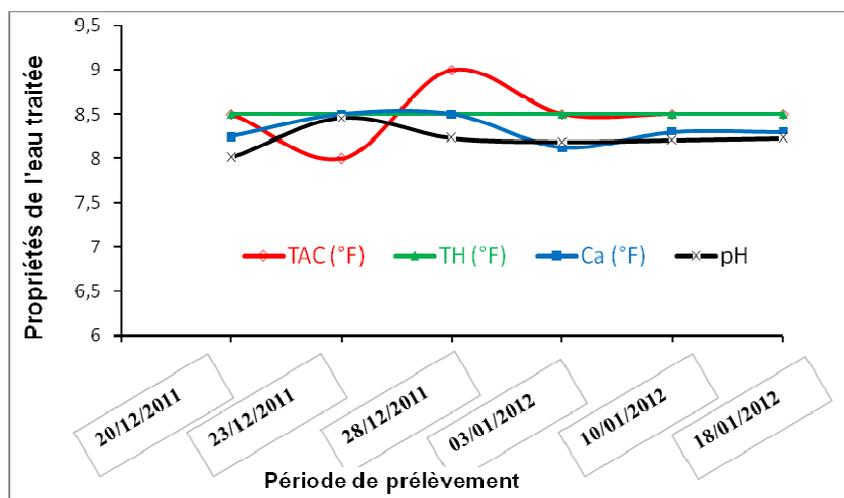


Figure 8 : Variation des caractéristiques de l'eau de la station Daoura après acidification

### 3.4 Suivi de la variation de la conductivité de l'eau produite pour les trois stations

Le rôle de la reminéralisation est de faire passer des ions dans une eau osmosée de manière que l'eau devient douce et équilibrée. Toutefois, tout procédé de reminéralisation qui engendre une eau dure, sera considéré

comme un inconvénient majeur de la méthode adoptée. C'est pour cela, nous proposons de suivre un nouveau paramètre, la variation de la conductivité (TDS) de l'eau traitée.

La conductivité électrique est un moyen important d'investigation en dessalement. La variation de la conductivité est étroitement liée aux modifications de la minéralisation des eaux. Elle définit par :

$$\text{Variation de la conductivité} = (\text{conductivité}_{\text{eau reminéralisée}} - \text{conductivité}_{\text{eau osmosée}})$$

Cette variation permet de traduire la quantité des ions passant dans l'eau pendant la reminéralisation. Par conséquent, on peut comparer l'efficacité des trois procédés adoptés par l'ONEE en fonction de la dureté de l'eau produite. Les résultats de la variation de la conductivité mesurés pendant la même période sont affichés sur la figure 9. On remarque que la reminéralisation à travers un lit de calcite donne une eau plus douce (la plus basse variation de la conductivité), figure 9. Alors que la reminéralisation par les méthodes utilisant les réactifs chimiques engendre une augmentation significative de la conductivité de l'eau à cause de la quantité des ions passant dans l'eau lors de la reminéralisation. Ces dernières méthodes engendrent ainsi une augmentation significative de la dureté de l'eau.

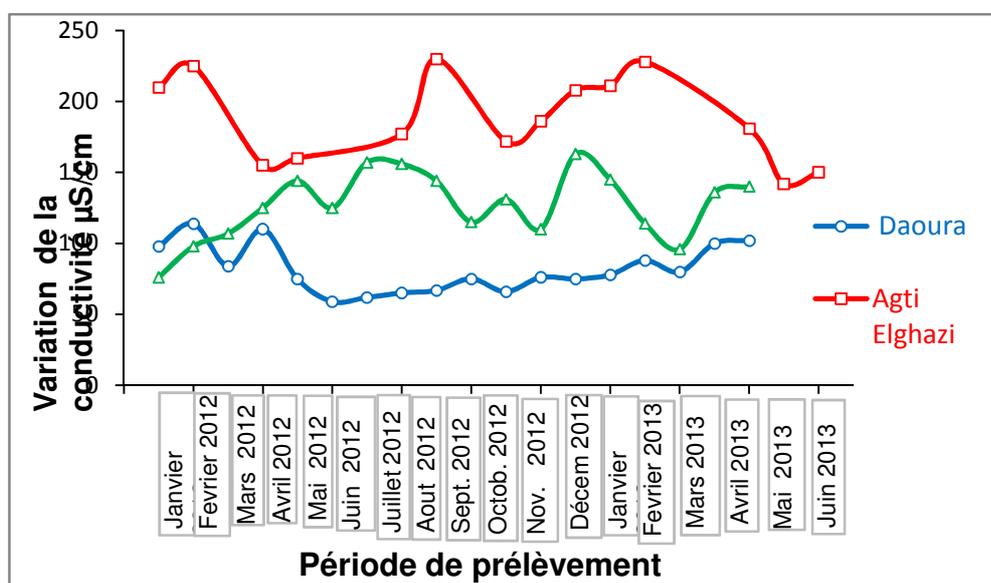


Figure 9 : Variation de la conductivité pour les stations de Laâyounne, Agti Elghazi et Daoura

#### 4 -Le coût d'exploitation de chaque procédé

L'économie d'exploitation constitue un problème de grande complexité et d'importance capitale surtout pour les stations de dessalement de l'eau de mer.

Dans ce qui suit, la comparaison portera sur les seuls réactifs chimiques mises en œuvre dans les procédés de reminéralisation. Connaissant les prix des produits consommés, il sera aisé d'évaluer le coût d'exploitation utilement adopté. Les conclusions saillantes d'une telle comparaison résultent du tableau 2 ci-contre.

Tableau 2 : prix en (€/m<sup>3</sup>) de la reminéralisation pour chaque procédé adopté

Produits chimiques	Reminéralisation par la chaux	Reminéralisation par NaHCO <sub>3</sub> + CaCl <sub>2</sub>	Reminéralisation par lit de calcite
NaHCO <sub>3</sub>	-----	0,0122	-----
CaCl <sub>2</sub>	-----	0,0691	-----
Ca(OH) <sub>2</sub>	0,0132	-----	-----
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,0145	-----	0,0079
CaCO <sub>3</sub>	-----	-----	0,0050
Total(€/m <sup>3</sup> )	0,0278	0,0814	0,0129

Pour chaque station, nous proposons dans ce paragraphe de calculer le coût du maintien à 8°F des paramètres physico-chimiques (pH, TAC, TH et Ca<sup>2+</sup>..) d'un m<sup>3</sup> d'eau produite après reminéralisation de l'eau osmosée dans chaque procédé de reminéralisation afin de les comparer d'un point de vue économique.

Selon la stœchiométrie des réactions, la reminéralisation par :

- $\text{NaHCO}_3$  et  $\text{CaCl}_2$  nécessite  $135 \text{ g/m}^3$  de  $\text{NaHCO}_3$  et  $88,8 \text{ g/m}^3$  de  $\text{CaCl}_2$
- la chaux nécessite  $64 \text{ g/m}^3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  et  $120 \text{ g/m}^3$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- le lit de calcite nécessite  $10 \text{ g/m}^3$  de  $\text{CaCO}_3$  et  $60 \text{ g/m}^3$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$

Le tableau 2 rassemble le prix en ( $\text{€}/\text{m}^3$ ) pour chaque méthode. Parmi ces trois procédés adoptés, Il est clair que la reminéralisation par le  $\text{NaHCO}_3$  et  $\text{CaCl}_2$  est la plus coûteuse, alors que la reminéralisation par le lit calcite est la moins chère.

## Conclusion

L'ONEE a adoptée la technique de l'osmose inverse aussi bien pour dessaler l'eau de mer à Laâyoune et Agti Elghazi que pour déminéraliser des eaux saumâtres à Daoura. L'eau produite après le dessalement (eau osmosée) est non équilibrée car elle est caractérisée par une faible salinité et une agressivité et une corrosivité élevées.

Un post-traitement de reminéralisation est nécessaire pour rendre à l'eau son équilibre calco-carbonique et de préserver ainsi le réseau de distribution de la dégradation par corrosion. Ce traitement est généralement réalisé par différentes méthodes.

La reminéralisation à travers un lit de calcite donne une eau plus douce, alors que la reminéralisation par les méthodes utilisant les réactifs chimiques engendre une augmentation significative de la conductivité de l'eau produite. La reminéralisation à travers un lit de calcite est efficace et simple. Elle nécessite une quantité minimale en  $\text{CO}_2$ , presque la moitié de celle réellement exigée par la méthode utilisant la chaux. Elle n'exige pas d'efforts majeurs ou des précautions dans son exploitation. En plus, cette méthode permet de prendre toutes les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des personnels.

En fin, l'étude de l'évaluation économique réalisée sur le coût des produits chimiques ayant servi au post-traitement montre que la reminéralisation à travers un lit de calcite pour la station de DAOURA est la moins coûteuse.

**Remerciement** - Ce travail a été effectué dans le cadre d'un projet de convention pour exécution de Doctorat entre la faculté des sciences d'Agadir et l'Office National de l'Electricité et de l'Eau (ONEE), direction de coordination des provinces sahariennes à Laayoune et de la direction contrôle qualité des eaux à Rabat. Les auteurs expriment leurs gratitude pour ce soutien.

## Références

1. Schriver-Mazzuoli L., La gestion durable de l'eau : Ressources - Qualité - Organisation, Dunod, (2012)
2. Ministry EMWE, Rabat, Morocco, Stratégie Nationale de l'Eau, Available: [http://www.minenv.gov.ma/PDFs/EAU/STRATEGIE\\_EAU.pdf](http://www.minenv.gov.ma/PDFs/EAU/STRATEGIE_EAU.pdf) (2011)
3. Jariri S., *Rencontre Entrepreneuriale Internationale Africagua, Fuerteventura, Iles Canaries, Espagne, 15-16 novembre* (2012)
4. El Azhar F., Tahaikat M., El Azhar M., Jalili Z., Zouahri A., Hafsi M., Tahri K. and El Midaoui A., *Int. J. Chem. Sci.*, 11(4) (2013) 1595
5. El Azhar F., Elamrani M., Taky M., Hafsi M., Elmidaoui A., *Int. J. Env. Sc.* 3(2) (2013) 2139
6. El Azhar F., El Harrak N., El Azhar M., Hafsi M., El Midaoui A., *J. App. Chem.*, 5(1) (2013) 35
7. El Harrak N., El Azhar F., Zdeg A., Zouhri N., El Azhar M., El Midaoui A., *Amer. J. App. Chem.*, 1(3) (2013) 43
8. Hafsi M., *Desalination* 134 (2001) 93
9. Al-Subaie K.Z., *Desalination*, 206 (2007) 29
10. Hasson D., Bendrihem O., *Desalination* 190 (2006) 189
11. Delion N., Mauguin G., Corsin P., *Desalination* 165 (2004) 323
12. Withers A., *Desalination*, 179 (2005) 11
13. Normes Marocaines NM 03.7.001, *Bulletin Officiel*, N° 5404 du 16 Mars (2006)
14. Gabbrielli E., Gerofi J.P., *Desalination*, 49 (1984) 95
15. Gude J.C.J., Schoonenberg Kegel F., Van de Ven W.J.C., de Moel P.J., Verberk J.Q.J.C., Van Dijk J.C., *J. Water Supply Res. Technol.* AQUA 60 (2011) 469
16. Seacord R.C., Wide-character format string vulnerabilities, *Dr. Dobbs J.* 30 (12) (2005) 63
17. Fritzmann C., Lowenberg J., Wintgens T., Melin T., *Desalination* 216 (2007) 1
18. Birnhack L., Voutchkov N., Lahav O., *Desalination* 273 (2010) 6
19. Glade H., Meyer J.H., Will S., *Desalination* 182 (2005) 203
20. Souza P.F. de, Plessis G.J. du, Mackintosh G.S., *Water SA Special Edition: WISA Proceedings South Africa* (2002)
21. Lahav O., Birnhack L., *Desalination* 207 (2007) 286
22. Office National de l'Eau Potable ONEP, *Rapport interne* (1976)

(2015) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>