

Besoins et Procédés pour le dessalement de l'eau de mer (15 Novembre 2007)

Frédéric Livet

SIMaP, UMR CNRS 5266, INPG-UJF, BP 75 38402-St Martin d'Hères, France*

On montre les besoins du dessalement de l'eau de mer pour les pays arides. La technique qui semble devoir se généraliser est l'osmose inverse. Celle-ci utilise l'électricité et son développement nécessite des centrales électriques de grande taille. Pour des raisons économiques et écologiques, l'énergie nucléaire paraît très bien adaptée à cette tâche. C'est vers ce choix que semble s'orienter la Libye, très affectée par le manque d'eau.

A. Introduction

L'évolution des conditions climatiques et l'augmentation de la population amènent de nombreuses régions du monde à se trouver en manque d'eau. Le premier phénomène semble conduire à de puissantes sécheresses du monde méditerranéen, correspondant à la migration vers le Nord des zones désertiques dans notre hémisphère, qui gagnent l'Espagne du Sud. Dans l'hémisphère Sud, le même mécanisme semble menacer l'Australie. Cela se combine évidemment avec l'augmentation de la pression anthropique due à la fois à l'augmentation de la population et à une exploitation plus intensive des ressources au cours du développement économique.

De nombreuses solutions ont été envisagées pour pallier ce problème, y compris le remorquage d'icebergs ou de gigantesques poches d'eau douce à travers les océans. Depuis une trentaine d'années, c'est évidemment le dessalement des eaux qui a été développé, et il n'y a aucune raison que ce phénomène s'inverse. Prenons comme exemple l'Espagne. Le Sud de ce pays manque fortement d'eau, et le gouvernement Aznar avait préparé un plan pour détourner les eaux de l'Ebre vers le Sud. A la suite des dernières élections et surtout des protestations des utilisateurs des eaux de l'Ebre, le nouveau gouvernement met en place un plan pour amener de l'ordre de un milliard de m^3 /an d'eau vers la côte andalouse, dont une bonne moitié sera issue du dessalement. On peut comprendre les implications du projet en lisant un article de Libération [1].

Bien entendu, personne n'a envie de donner sa précieuse eau au voisin: il y a eu un plan pour amener de l'eau du Rhône à Barcelone qui semble oublié. Il y a néanmoins un plan en Chine pour amener l'eau du bassin tropical du Yangtse vers le Nord chinois menacé de désertification. Je vais montrer comment on peut estimer les besoins et ensuite je donnerai une estimation de l'évolution des techniques de dessalement.

Ce papier n'aurait pas été possible sans en particulier l'utilisation intensive de la revue scientifique "Desalination" qui donne une information tout à fait excellente. Cela pose un problème pour l'information du "grand public" sur ce sujet (et sans doute sur bien d'autres): cette revue à "comité de lecture" est commerciale, payante et chère (Elsevier!), et seuls les scientifiques professionnels y ont un accès facile. Le public n'a lui accès qu'à une information non exper-

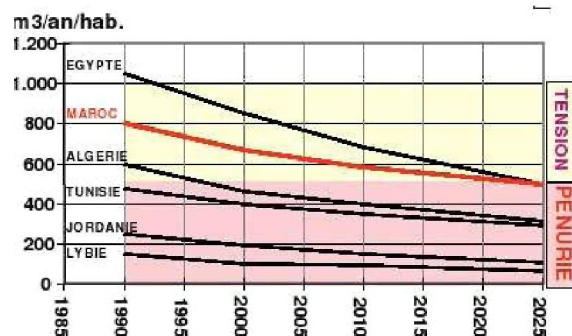


FIG. 1: Estimation pour les divers pays du Maghreb des besoins en eau par habitant et de leur évolution. Figure empruntée à un exposé de Monsieur A. El Gueddari, directeur de l'administration du Génie Rural au Maroc [2]

tisée, truffée d'à-prioris prétendument "écologistes" et de théories fumeuses qui rendent le sujet totalement opaque. Cependant, on trouve sur le "web" de très bonnes informations, et je vous invite à les chercher à partir des références "http" que je donne. La dernière trouvée, très récente, me paraît particulièrement intéressante (A. Maurel²).

B. Quantifier les besoins

L'eau est considérée comme potable (définition OMS) en dessous de 500 ppm (parties par million) de sel en solution. L'eau des océans contient à peu près 35000 ppm, celle de la Méditerranée 38000 et la Mer Rouge ou le Golfe Persique dépassent 40000. Le dessalement concerne également les nappes d'eau salée, par exemple en Tunisie. La Mer Morte atteint plus de 250000.

Si l'on se sert des estimations de la figure 1, 500 m^3 par habitant et par an est indispensable. Comme on peut estimer que Dame Nature en fournit à peu près le quart aux Libyens, il semble que le déficit de ce pays de cinq millions d'habitants soit de l'ordre de deux milliards de m^3 d'eau douce par an. Il existe en Libye un plan pour pomper dans la nappe phréatique du Sahara en complément de ce qui a été déjà pompé et de créer un fleuve artificiel...Projet qui semble un peu pharaonique et peu réaliste, et de plus peu durable: l'épuisement serait rapide, car cette nappe met plusieurs dizaines de milliers d'années à se

remplir... Les besoins sont donc de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (la moitié du débit moyen du Drac à Grenoble) ou 4 millions de m^3 par jour!

On comprend donc que tous les pays arides aient des projets de gigantesques usines de dessalement. Or cela nécessite d'énormes investissements dans les usines et dans la fourniture de l'énergie nécessaire.

C. Les divers procédés de dessalement

On peut grossièrement distinguer deux principales techniques, l'une basée sur l'évaporation de l'eau par utilisation de la chaleur, l'autre sur la séparation en phase liquide entre eau douce et saumure.

La première (MSF: distillation flash à multiples effets, MED: évaporation à multiples tages) avait l'avantage de ne pas trop nécessiter de développement technique et d'utiliser la chaleur en excès dans un pays comme l'Arabie Saoudite, où le gaz a longtemps été brûlé sur place. Pour limiter la consommation énergétique, la chaleur est récupérée dans des processus à plusieurs étages, et les installations sont devenues très complexes. Néanmoins, ces processus nécessitent d'assez puissantes pompes, et on a quand même besoin de $2\text{-}3 \text{ KWh}/\text{m}^3$ d'énergie mécanique (ou électricité, ou Diesels) pour produire un m^3 d'eau distillée. Le besoin en énergie thermique ne semble jamais inférieur à $50 \text{ KWh}/\text{m}^3$ (MED) et le procédé dominant jusque dans les années 2004 était le MSF, qui a besoin de $100 \text{ KWh}/\text{m}^3$ thermique. C'est une chaleur "froide" qui est nécessitée dans ces procédés: vapeur à $70\text{-}85 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le MED. Cela fait qu'on peut obtenir cette chaleur à partir de dispositifs électriques ne consommant qu'une dizaine de KWh/m^3 d'électricité. Comme il s'agit d'une source d'énergie très dégradée, on essaiera de récupérer la vapeur nécessaire à la sortie d'un générateur d'électricité.

Cela illustre un problème souvent négligé dans l'énergie: on utilise le "premier principe", qui donne une relation d'équivalence entre toutes les énergies, mais on ne discute pas souvent de ce que l'on peut faire de cette énergie, et là il serait nécessaire d'introduire les problèmes de l'entropie: une vapeur à $500 \text{ }^\circ\text{C}$ peut être transformée en électricité ou en force mécanique avec un rendement de près de 50%, la même vapeur à $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ne donnera pas un rendement de 10%. Inversement, si on veut chauffer de l'eau à $90 \text{ }^\circ\text{C}$, on pourra utiliser 3-4 fois plus d'énergie avec une chaudière au gaz qu'avec une compression mécanique (système dit "pompe à chaleur").

Le gros avantage des procédés par évaporation est que l'eau est très pure, il faut même la recharger en éléments minéraux, et que sa consommation énergétique est indépendante de la salinité. C'est aussi très intéressant pour certaines applications industrielles et pour l'irrigation des cultures sensibles à la salinité des sols. Cela est vrai en particulier pour la culture des céréales, très sensibles à l'augmentation de la salinité des sols, en particulier quand se produit

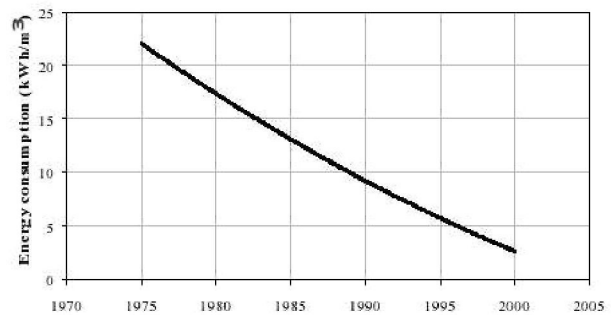


FIG. 2: Evolution tendancielle de l'énergie minimale (en KWh) nécessaire au dessalement de un m^3 d'eau de mer (d'après Fiorenza et al [4])

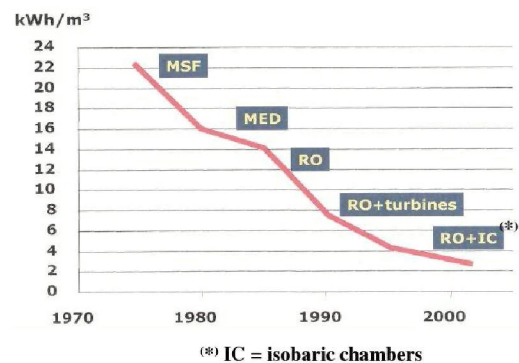


FIG. 3: Evolution tendancielle de l'énergie nécessaire au dessalement d'un m^3 d'eau. On voit ici à quelle évolution technique correspondent les progrès enregistrés (d'après A. Maurel [2])

une forte évaporation.

La seconde est essentiellement l'osmose inverse (en anglais, reverse osmosis, donc RO dans la suite). La méthode est de maintenir une pression d'un côté d'une membrane pour obtenir une différence de concentration en sels entre les deux côtés. Cette pression dépend de la salinité, et pour l'eau de mer, elle est de l'ordre de 50 bars. On a pu faire décroître la consommation en énergie (mécanique) jusqu'à $4\text{-}4.5 \text{ KWh}$ par m^3 , et on espère approcher les 3 KWh . Que la consommation en énergie dépende directement de la pression osmotique a fait que cette technique s'est d'abord imposée pour les eaux saumâtres (Tunisie) où la concentration en sel était inférieure aux $35\text{-}38 \text{ g/litre}$ de l'eau de mer. Cette consommation augmente aussi si la salinité augmente: de l'ordre de $1 \text{ KWh}/\text{m}^3$ pour chaque 10000 ppm de sel. Ce procédé a aussi l'inconvénient de fournir une eau moins pure (de 0.5 à 0.2 g/litre).

On comprend que la situation a évolué rapidement ces dernières années en regardant les estimations de la figure 2. Cette figure est très schématique, et il faudrait se méfier des extrapolations: les estimations les plus optimistes pour une installation industrielle sont autour de $2.72 \text{ KWh}/\text{m}^3$ [5], et de très bons

résultats sont obtenus (2002) dans une grande usine de Singapour: 4.2 KWh/m³, et ces valeurs sont corroborées dans [6]. Les installations prévues dans le Sud de l'Espagne tablent sur 3-4 KWh/m³. La figure 3, très récente, semble bien admettre que la limite de 3 KWh/m³ est franchie. La thermodynamique donne une limite théorique autour du KWh/m³.

D. La situation en 2002

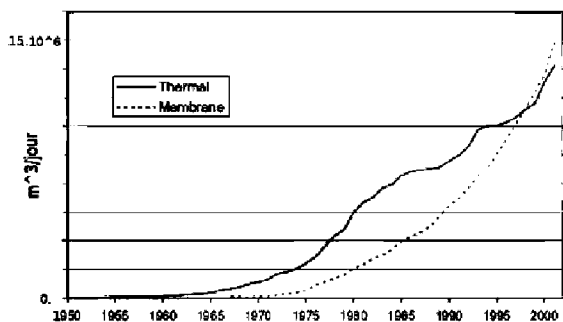


FIG. 4: Evolution de la capacité de dessalement jusqu'en 2002. On notera que en 2002, le tiers la capacité RO (à membrane) concerne le dessalement de l'eau de mer [7] (d'après F. Banat, Jordanie [8])

On peut avoir des ordres de grandeur de l'évolution de la capacité de dessalement d'après la figure 4. Elle est tirée de [8], et on trouve des valeurs plus précises dans [7]. Les capacités thermiques se localisent essentiellement au moyen-Orient (MSF), et les techniques RO se développent essentiellement dans les pays développés. Depuis 2002, un grand nombre d'installations se font en RO, et le dessalement de l'eau de mer devient majoritaire.

Pour avoir des ordres de grandeur, en 2000, on trouve la répartition résumées sur le tableau I. Le procédé RO est d'abord présent dans les pays développés parce qu'il est techniquement plus moderne, mais il a aussi de mal à s'implanter dans les pays côtoyant des mers à haute salinité (Arabie Saoudite, Emirats..).

E. Les coûts des diverses méthodes

Comme d'habitude, il y a trois composantes dans le prix: l'investissement, l'entretien-fonctionnement et l'énergie. L'investissement est de l'ordre de 1000\$ par m³/jour, un peu plus pour les cycles thermiques (1200 \$?). Ces derniers sont complexes et ils nécessitent de dimensionner dès le départ l'usine. Le procédé RO est adapté à de grandes unités et on peut adjoindre de nouvelles unités sans difficulté.

Le RO est sensible à une pollution, il faut une eau très propre. Pour l'entretien, il faut changer au moins 12% des membranes chaque année. Cela fait que le

pays	capacité (10 ⁶ m ³ /j)	technologie	
		% thermique	% RO
Arabie Saoudite	5.25	67.	33.
USA	4.33	11	75
Emirats	2.89	94	6
Koweït	1.62	97	3
Espagne	1.23	10	84
Japon	0.95	7	86
Libye	0.7	76	16

TABLE I: répartition en 2000 des installations de dessalement pour les procédés les plus utilisés: le procédé RO s'impose difficilement dans le Golfe d'après Fiorenza et al [4]

procédé RO a besoin d'un personnel qualifié et qu'il est plus "fragile" technologiquement.

En fait, hors le poste de l'énergie, le coût du m³ d'eau potable est dans toutes ces techniques de l'ordre de 0.4 \$/m³, pourvu qu'elles tournent en continu. Si on ajoute l'énergie, les estimations peuvent varier considérablement:

Vers 2002, le prix du gaz à la consommation était autour de 3.5 \$/GJ, un GJ étant de l'ordre du britannique MBTU habituellement utilisé pour mesurer la quantité d'énergie du gaz. Cela faisait donc à peu près 11 \$/MWh, ou 17 \$ pour l'équivalent d'un baril de pétrole. Or transporter du gaz liquéfié depuis le Golfe à l'Europe coûte près de 2.5 \$/GJ. Donc le gaz saoudien valait 1 \$/GJ, et on dépensait 70-100 KWh/m³ pour dessaler, ce qui était équivalent à 0.25 \$/m³. Il y a une dizaine d'années, dans la région du Golfe, une grande partie du gaz était brûlée faute de moyens d'écoulement. On pouvait donc négliger le coût de l'énergie, comme dans certains papiers [9,10].

Aujourd'hui ce gaz peut être estimé à 8-10 \$/GJ en Europe et donc sa valeur à la source a été multipliée au moins par cinq. Quant au pétrole, il dépasse les 90 \$/baril (Novembre 2007)! Pour un pays qui produit du gaz ou du pétrole, le brûler pour évaporer de l'eau de mer est aujourd'hui un gaspillage.

Il y a de longues études comparant les mérites de nombreux cycles combinés [11], car les procédés thermiques peuvent être combinés à une centrale électrique en récupérant la chaleur rejetée au niveau de la "source froide". Cela cependant se fait au prix d'une perte de rendement thermodynamique du générateur d'électricité. On en trouve une rapide estimation dans un papier de Nisan et al [12]: dans un réacteur nucléaire, on perd 120 MW électriques pour récupérer huit fois plus d'énergie thermique. Il y a donc un facteur huit entre la chaleur récupérée et l'électricité perdue par la baisse de rendement. Ce rapport est de l'ordre de cinq pour une centrale au gaz. On peut donc dire grossièrement que si on a besoin de 50 KWh/m³ pour évaporer de l'eau, cela est équivalent à 10 KWh/m³ électrique, 13 si on tient compte des très nombreuses pompes nécessaires. Il paraît douteux qu'un pays développe ces installations complexes que seraient de grandes centrales

électriques capables à la demande de moduler entre la production d'électricité et la fourniture de vapeur pour un dessalement thermique, sauf si on a besoin d'une eau très pure.

Les comparaisons ci-dessus montrent qu'à partir du moment où la technologie est accessible, le procédé RO semble devoir l'emporter et la seule discussion à mener est de savoir comment obtenir l'énergie électrique nécessaire. Si les besoins descendent en dessous de 4 KWh/m³, il faut avec les centrales électriques récentes:

1. 8 KWh de charbon (1.Kg, soient 3. Kg CO₂ et 0.13 \$)
2. 7 KWh de gaz naturel (0.7 m³, soient 1.61 Kg CO₂ et 0.26 \$)
3. 8 KWh de pétrole (0.8 litres, soient 2. Kg CO₂ et 0.38 \$)
4. 11 KWh nucléaire (pour 4KWh électrique, 0 CO₂ et 0.18 \$)

En admettant des prix de 50 \$ la tonne de charbon, 8 \$/GJ pour le gaz, 70 \$/baril pour le pétrole et 45 \$/MWh le prix de l'électricité nucléaire. J'ai considéré que l'amortissement d'une centrale électrique fonctionnant aux fossiles était autour de 8 \$/MWh, et donc de 0.03 \$ pour 4 KWh électriques. On voit, compte tenu de l'évolution des prix, et hors situation spécifique (le coût de production du charbon dans une mine d'Europe de l'Ouest est autour de 140 \$/t) vers quoi s'oriente la décision économique et écologique, en particulier si on introduit une taxe carbone.

F. Nucléaire contre solaire?

Dans la mesure où le problème des émissions de CO₂ sont prises en compte, l'énergie nucléaire semble sans concurrence. Les opposants à ce mode de production ont avancé l'utilisation des renouvelables. Il est difficile de donner une estimation raisonnable, mais on doit d'abord noter que le prix de base de l'éolien est autour de 100-120 \$/MWh (80 €?) et celui du solaire photo-voltaïque (PV) autour de 350 \$/MWh (250 €?) dans les estimations que l'on peut donner en Europe. Ce sont donc des coûts très élevés, et l'argument de l'ensoleillement des pays arides a peu d'influence: on passe de 1200-1500 heures d'ensoleillement annuel en Europe à 1800-2000, et ça mettrait le solaire autour de 250 \$/MWh. Cela est en soi-même redhibitoire, mais ils se rajoute que l'on ne peut imaginer un pays installant des parcs éoliens ou de parcs PV pour alimenter de grandes installations de dessalement: ceux-ci ne fonctionneraient que 20 à 30% du temps, et, sauf appoint -majoritaire- de centrales thermiques, on serait obligé de surdimensionner l'installation ou d'ajouter de gigantesques installations de batteries électriques.

Si donc les "renouvelables" sont exclus pour le procédé RO, peut-on espérer utiliser le solaire thermique? Celui-ci est proposé sur le marché pour de

petites installations "décentralisées", et on peut concevoir que de telles installations peuvent être très utiles dans le cas d'un petit village de pêcheurs ou d'une île isolée et sans accès à un réseau centralisé d'électricité. Le prix de revient du m³ est alors autour de 5-10 \$/m³. On peut trouver des données dans [13]. J'estime qu'il faut de 50 à 100 m² de panneaux solaires pour produire un m³/j dans un procédé "multi-effet", et que le coût de ces panneaux solaires est autour de 150-300 \$/m². Très lourd investissement, il faut aussi des panneaux solaires pour alimenter les pompes...

Un grand problème est qu'il n'apparaît guère d'effet de la taille de ces installations et que le prix vient alors en concurrence avec ceux donnés ci-dessus pour les grandes capacités, surtout dans des pays dotés d'un réseau électrique.

G. conclusion

J'ai fait un tour d'horizon succinct. La réalité du développement de ces techniques peut être plus complexe, et des combinaisons hybrides RO/MED sont envisagées. Je n'ai pas détaillé les dispositifs utilisés. On trouve une excellente discussion sur le web, de la part de S. Nisan [14], qui montre que la France n'est certainement pas en retard dans ce domaine. En fait, l'énergie nucléaire a déjà été utilisée dans une centrale du Kazakhstan pour dessaler par évaporation (réacteur surgénérateur BN-350)

On trouve des infos sur les besoins en eau vus par un dirigeant marocain: [13] et sur les besoins de l'Afrique du Nord [15] Sur le plan agua espagnol, d'après un article de Libération [1] On trouve un excellent exposé en accès libre dans [8], mais avec des données datant de 2002.

Il semble que le prix de l'énergie soit la première raison du fait que l'Afrique du Nord, du Maroc à l'Égypte, se tourne vers la technologie nucléaire. Il faut changer notre image de cette région: il y a une main d'œuvre qualifiée, la transition démographique s'achève, le respect des normes internationales (imposées par IAEA) se renforce, ils ont moins que nous de préventions anti-progrès technique et ils ont un réseau électrique développé: près de 90% de la population reçoit l'électricité. En fait, cette région semble à la veille de connaître un développement rapide.

Cela dit, un projet comme le projet libyen a un coût. Pour produire ses deux milliards de m³ par an, il lui faudra une centrale du modèle de l'EPR, 3-4 milliards de dollars, et une usine de dessalement (ou plusieurs) d'une capacité totale de 6 millions de m³/j, d'un coût de 6 milliards de dollars. Le total est de l'ordre de 10 milliards de dollars.

Mais cela me paraît inévitable, et c'est la meilleure solution pour ces pays: on trouve sur le web des anathèmes du WWF contre les usines de dessalement. Je trouve cela ridicule, si on ne veut pas transformer l'ensemble des peuples arabes en réfugiés climatiques! Il ne semble pas que les arguments sur le rejet des saumures par les usines de dessalement soient bien

raisonnables non plus. En effet, les usines rejettent une eau à teneur en sels supérieures à 50000 ppm, si elles n'essaient pas d'extraire le sel. Cette eau rejetée en général à quelques kilomètres en mer est beaucoup plus dense que l'eau de mer et donc coule au fond. La Méditerranée contient plusieurs millions de km³ d'eau et les rejets seraient de quelques km³ par an.

Une remarque finale concerne la destination de l'eau. Dans ces pays, 20 % de l'eau est consacrée

à l'usage domestique (plus industrie) et 80 % à l'agriculture (voir Filali [15]). A quel niveau de prix l'eau dessalée peut-elle être utilisée pour l'irrigation? Pour faire une comparaison, le prix "public" de l'eau potable en France tourne autour de 2.9 euros en moyenne, presque 4.3 dollars... et les agriculteurs sont accusés de ne rien payer. Probablement, si le prix de l'eau est autour de 0.5 \$/m³, on pourra l'utiliser pour des cultures convenablement choisies.

* Electronic address: frederic.livet@ltpcm.inpg.fr

¹ F. Musseau, article, Libération du 8 Aout (2007), URL <http://eau.apinc.org/spip.php?article510>.

² A. Maurel, workshop (atelier), Consultant (2007), URL www.planbleu.org/publications/meditep/Session2_Intervention3_Maurel.pdf.

³ A. B. S. E. GUEDDARI, exposé, Ministre de l'Agriculture et du Développement Rural du Maroc (2002), URL <http://www.wademed.net/Articles/003AGRO.pdf>.

⁴ G. Fiorenza, V. Sharma, and G. Braccio, Energy Conversion and Management **44**, 2217 (2003).

⁵ R. L. Stover, Desalination **203**, 168 (2007).

⁶ J. Paris and L. Ferreira, Desalination **208**, 269 (2007).

⁷ K. Reddy and N. Ghaffour, Desalination **205**, 340 (2007).

⁸ F. Banat, Conférence, Jordan University of Science

and Technology (2007), URL <http://www.desline.com/Geneva/Banat.pdf>.

⁹ A. Ophir and A. Gendel, Desalination **205**, 224 (2007).

¹⁰ A. Ophir and F. Lockiec, Desalination **182**, 187 (2005).

¹¹ J. Blank, G. Tusel, and S. Nisan, Desalination **205**, 298 (2007).

¹² S. Nisan, G. Caruso, J. Humphries, G. Mini, A. Naviglio, B. Bielak, O. A. Alonso, N. Martins, and L. Volpi, Nuclear Engineering and Design **221**, 251 (2003).

¹³ S. Al-Hallaj, S. Parekha, M. Faridb, and J. Selmana, Desalination **195**, 169 (2006).

¹⁴ S. Nisan, Rapport, CEA Cadarache (2006), URL <http://up.sur-la-toile.com/i6I6>.

¹⁵ B. A. Filali, Conférence, Ecole Nationale d'agriculture du Maroc (2004), URL www.wademed.net/Articles/207Filali.pdf.