

EDITORIAL

Les pays du pourtour méditerranéen, en particulier ceux de la rive sud, connaissent des situations de pénurie d'eau ne leur permettant plus de répondre totalement à leurs besoins en eau. Ceux-ci vont en grandissant avec la croissance démographique, l'augmentation des besoins des populations, due aux changements dans le mode de vie et au développement de certaines activités consommatrices d'eau (tourisme, industrie,...). Cette augmentation des besoins intervient en parallèle avec une diminution sensible des apports, qui deviennent de plus en plus irréguliers.

Pour sa part, l'agriculture irriguée, dans le pourtour méditerranéen, constitue un des secteurs économiques les plus importants, de par sa contribution à l'autosuffisance alimentaire, la création d'emplois dans le milieu rural et le rôle moteur du développement rural de façon générale. Elle constitue également le plus grand utilisateur d'eau (de l'ordre de 80% de l'ensemble des usages de l'eau).

L'eau, cette ressource si précieuse, se trouve malheureusement en quantité très limitée et soumise à de nombreux aléas.

En outre, les moyens utilisés actuellement pour prélever de l'eau pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable et industrielle (eau de surface et eau souterraine) montrent leurs limites: baisse des apports d'eau de surface, envasement et eutrophisation des barrages et difficultés d'équiper de nouveaux sites, épuisement des nappes souterraines.

Par conséquent, l'utilisation de ressources non conventionnelles, telles que le dessalement des eaux (dont le coût a baissé considérablement ces dernières années en raison de progrès technologiques remarquables dans l'industrie membranaire et la récupération d'énergie), et plus particulièrement dans les zones sud, deviendrait dans l'avenir immédiat, un impératif incontournable.

Compte tenu de l'importance de cette question, l'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural du Maroc (AIGR) et l'Association Echanges Méditerranéens (EM), pour l'eau, la forêt et le développement, ont organisé un séminaire sur le thème: « Le dessalement des eaux : une opportunité pour des régions en pénurie d'eau ? »

Compte tenu de la qualité des communications présentées et de l'intérêt du thème, le comité de rédaction de l'Association Nationale des Améliorations Foncières, du Drainage et de l'Environnement (ANADIDE) a proposé d'éditer un numéro spécial sur le dessalement des eaux.

Dans ce cadre, Mr Abdallah Bekkali, Président de l'ANAFIDE, tient à remercier Mr Ahmed Bouari, président de l'AIGR (coorganisatrice du séminaire et représentante de EM au Maroc), pour son accord sur l'édition de ces communications dans la revue « Hommes, Terre et Eaux ».



ALLOCUTION DE MONSIEUR LE SECRETAIRE GENERAL DU MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE MARITIME

Monsieur le Wali de Tanger,

Monsieur le Président du Conseil de la Ville de Tanger,

Messieurs les Directeurs,

Monsieur le Président de l'Association Echanges Méditerranéens pour l'Eau, la Forêt et le Développement,

Monsieur le Président de l'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural

Mesdames et Messieurs,

Je voudrais avant tout vous transmettre les salutations de Monsieur Aziz AKHANNOUCH, Ministre de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, qui n'a pas pu être parmi nous aujourd'hui pour des raisons liées à son calendrier professionnel. Monsieur le Ministre accorde un intérêt particulier à ce séminaire international sur «Le dessalement des eaux: une opportunité pour les régions en pénurie d'eau», auquel il a bien voulu accorder son parrainage vue l'importance du thème retenu. Il tient à féliciter l'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural et l'Association Echanges Méditerranéens pour l'Eau, la Forêt et le Développement pour le choix du thème et l'organisation du séminaire.

Je voudrais aussi souhaiter la bienvenue à l'ensemble des participants à cette manifestation, et particulièrement à tous nos hôtes ressortissants des pays frères et amis et représentants des organismes internationaux, bailleurs de fonds, entreprises privées et associations professionnelles.

Je voudrais vous dire combien sont immenses le plaisir et l'intérêt que j'éprouve de m'associer à votre manifestation dont l'actualité du thème ne peut laisser indifférent.

L'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural et l'Association Echanges Méditerranéens pour l'Eau, la Forêt et le Développement, en consacrant cette manifestation à la thématique relative au dessalement des eaux, porte le débat sur ce sujet à un cercle plus élargi d'acteurs et d'intervenants. L'importance du sujet et sa pertinence découlent de la dimension grandissante que prend le dessalement des eaux à travers le monde entier, notamment dans les pays qui souffrent de la pénurie des ressources en eau douce.

En effet, il existe Aujourd'hui dans le monde près de 12.500 unités de dessalement dans 120 pays qui produisent près de 30 millions de m³ par jours d'eau dessalée, dont 54 % issus de l'eau de mer et 46% issus des eaux saumâtres. Sur ces 30 millions, 75% sont destinés à l'approvisionnement en eau potable de près de 155 millions d'habitants et 25% à l'usage agricole.

Mesdames et Messieurs,

Depuis son indépendance, le Maroc a réalisé des progrès énormes dans les domaines de mobilisation des ressources en eau douce avec la construction notamment de plus de 120 grands barrages, d'aménagement de 1,5 million d'hectares irrigué, d'approvisionnement en eau potable des populations urbaines et rurales et de production de l'énergie hydro-électrique. Ceci ne pouvait être atteint sans la politique clairvoyante du Feu Sa Majesté le Roi Hassan II, Que Dieu ait son âme, politique poursuivie par Sa Majesté le Roi Mohammed VI, Que Dieu le glorifie. Ces réalisations ont permis un développement économique et social soutenu du pays.

Cependant, la succession des épisodes de sécheresse depuis plus de 25 ans, conséquence manifeste des changements climatiques, conjuguée à la demande en eau sans cesse croissante en raison de l'accroissement démographique et des impératifs de développement économique et social, a conduit à une raréfaction de plus en plus menaçante des ressources en eau, appelées en même temps à accompagner le développement accéléré que connaît le pays à travers les grands chantiers lancés dans tous les domaines.

En effet, les récentes études du Plan National de l'Eau et d'actualisation des plans directeurs d'aménagement intégré des ressources en eau des différents bassins hydrauliques, montrent une diminution des volumes régularisés par les barrages de près de 30% par rapport à ceux prévus par les anciens plans directeurs. A cela s'ajoute la situation inquiétante des aquifères qui connaissent dans leur majorité une surexploitation conduisant au rabattement accéléré de leurs niveaux piézométriques pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres par an.

Dans cette situation, l'agriculture irriguée, de par sa nature de premier utilisateur de l'eau, subit en premier les conséquences négatives de la raréfaction des ressources en eau, se traduisant par des restrictions drastiques qui agissent négativement sur la production agricole. En effet, on enregistre un déficit permanent depuis plus de 25 ans dans la satisfaction des besoins des périmètres d'irrigation à partir des barrages en comparaison avec les prévisions des PDAIRE. Pendant les douze dernières années, le taux de satisfaction des besoins de l'irrigation à partir des barrages n'a pas dépassé 58% en comparaison avec les prévisions. Ce déficit s'accroît pendant les périodes de sécheresse.

Cette situation appelle des solutions urgentes et durables pour garantir l'approvisionnement en ressources en eau suffisantes pour tous les usages, notamment l'agriculture irriguée.

Mesdames et Messieurs

Comme vous le savez, notre pays a adopté récemment une nouvelle stratégie de développement agricole, dite « Plan Maroc Vert » qui a été élaboré et mis en œuvre depuis Avril 2008 suite aux Hautes Instructions Royales. Ce Plan s'appuie sur une approche transactionnelle à base de projets d'agrégation de producteurs autour d'agrégateurs dans un objectif de valorisation de la production agricole à travers la transformation et/ou la commercialisation à l'état frais ou transformé.

Le Plan Maroc Vert s'articule autour de deux piliers de développement de filières agricoles, qui peuvent être qualifiés de caractère vertical, et d'un certain nombre de réformes et de mesures à caractère horizontal devant améliorer l'environnement agricole à la mise en place des projets de développement, objet des piliers précités.

Le pilier I consacré à l'agriculture moderne, à très haute valeur ajoutée, vise la réalisation par le secteur privé de 900 projets pour un volume d'investissement de 12 à 18 milliards de dollars EU. Il cible 400.000 exploitations.

Le pilier II, consacré à l'agriculture solidaire s'intéresse au développement de la petite agriculture constituée de petites exploitations situées dans les espaces agricoles les plus vulnérables. Ce volet du Plan Maroc Vert vise la réalisation de 400 projets avec l'appui massif des autorités publiques pour un volume d'investissement de 1,6 à 2,5 milliards de dollars EU. Les exploitations ciblées par ce pilier sont au nombre de 800.000. L'objectif du pilier II est de réduire autant que possible se faire les poches de pauvreté et de vulnérabilité qui caractérisent le milieu rural.

La mise en œuvre du Plan Maroc Vert vise à multiplier par 2 à 3 fois le PIB agricole au cours des 10 à 15 prochaines années, soit une augmentation de 8 à 11,7 milliards de dollars EU.

Le Plan Maroc Vert place la question de l'eau au devant des réformes transversales les plus importantes qui doivent assurer les conditions de réussite de sa mise en œuvre, notamment dans le contexte contraignant des ressources en eau que j'ai décrit précédemment. Les principaux enjeux ainsi définis pour la question de l'eau se résument comme suit :

- le développement des moyens de mobilisation des ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles ;
- la valorisation des ressources en eau allouées à l'irrigation ;
- la mise en place d'une tarification fortement incitative à l'économie et à la valorisation de l'eau,
- une politique de gestion volontariste de la demande, notamment de l'eau agricole à travers l'activation d'une véritable police de l'eau, la généralisation des techniques d'irrigation économes en eau, la focalisation sur les cultures maximisant la valeur de l'eau utilisée, etc.

Concrètement, ces enjeux se traduisent pour le secteur de l'irrigation par la réalisation de trois programmes majeurs :

- Le Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation qui vise la reconversion des techniques d'irrigation existantes, peu efficaces, aux techniques d'irrigation localisée sur une superficie de plus de 550.000 ha pendant 10 ans, pour porter à terme la superficie totale équipée en techniques d'irrigation localisée à 700.000 ha, soit 50% de la superficie aménagée. Ce programme devra en fait répondre aux impératifs de développement durable de l'agriculture irriguée en produisant plus et mieux, mais en utilisant moins d'eau.

- La résorption du décalage entre les aménagements hydro-agricoles et les barrages réalisés qui s'élève à 110.000 ha. Ce programme permettra de valoriser les volumes régularisés non encore exploités dans l'irrigation de près de 1 milliard de m³/an mobilisés en grande partie par le barrage Al Wahda. Sa réalisation est prévue sur les 10 prochaines années.

- la réforme institutionnelle de la grande irrigation qui vise à promouvoir la gestion déléguée du service de l'eau d'irrigation à travers l'encouragement de l'investissement privé dans un cadre de partenariat public-privé. L'objectif est d'améliorer la compétitivité et les performances des grands périmètres d'irrigation, ainsi que la durabilité des systèmes d'irrigation.

Mesdames et Messieurs,

Comme vous pouvez le remarquer, le Plan Maroc Vert soutient toutes les possibilités et les solutions qui peuvent contribuer à l'amélioration du niveau de disponibilité des ressources en eau qui puisse garantir la réalisation des objectifs fixés, notamment l'économie et la valorisation de l'eau et la mobilisation des ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles.

C'est pourquoi, nous considérons que le dessalement de l'eau de mer est une solution qu'il ne faut pas tarder à promouvoir et à mettre en œuvre à grande échelle. C'est une solution que nous soutenons, non seulement pour l'irrigation dans certains cas précis et compétitifs, mais principalement dans le domaine d'alimentation en eau potable et industrielle, surtout des grandes agglomérations urbaines comme celles situées sur l'axe côtier Kénitra-Essaouira, où l'activité démographique, économique et sociale représente une grande part au niveau national.

En effet, l'alimentation de ces agglomérations à partir du dessalement de l'eau de mer aura des conséquences très positives, non seulement sur le secteur de l'AEPI, mais aussi sur l'agriculture irriguée, car la pression sur les barrages diminuera manifestement au profit d'un meilleur approvisionnement des périmètres irrigués qui, en plus des mesures d'économie et de valorisation de l'eau, verront leur déficit en eau diminuer

substantiellement avec toutes les retombées positives sur les rendements des cultures et la production agricole.

Si nous soutenons cette voie de dessalement, c'est parce que aussi les techniques et les technologies dans ce domaine ont connu une grande évolution et font du dessalement une solution prometteuse.

En effet, le développement de l'osmose inverse et des systèmes de récupération de l'énergie ont permis de réduire substantiellement les coûts de production et de les ramener à des niveaux abordables et même compétitifs dans certains cas. Ces coûts ont connu une diminution de 80% au cours des 15 dernières années.

Convaincu ainsi de l'importance du dessalement des eaux, le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime compte réaliser un projet inédit d'irrigation à partir du dessalement de l'eau de l'Atlantique dans la zone des Chtouka de la région de Souss-Massa. Cette zone, connue par son potentiel de production des primeurs dont une grande partie est destinée à l'export, souffre d'une pénurie d'eau très prononcée suite à la surexploitation des eaux souterraines qui ont diminué de manière inquiétante et à la rareté des ressources superficielles. Le projet vise l'irrigation de 7.000 à 10.000 ha à partir de l'eau de mer dessalée grâce à la réalisation d'une usine de dessalement par osmose inverse et d'un réseau d'irrigation.

Pour ce faire, une étude de pré faisabilité de ce projet est en cours de réalisation. Au cas où l'étude conclut à sa faisabilité, le projet sera certainement réalisé dans le cadre d'un partenariat public-privé, car ce genre de partenariat offre plus de chance de réussite à ce type de projet qui nécessite beaucoup de technicité et de professionnalisme.

Mesdames et Messieurs,

Nous sommes convaincu, qu'avec la tendance actuelle des changements climatiques et leurs conséquences négatives sur l'état des ressources en eau, le dessalement des eaux deviendra incontournable dans l'avenir proche et fera l'objet de grands chantiers. Mais, il ne doit pas être l'unique responsabilité de l'Etat, mais aussi de tous les autres acteurs : opérateurs privés, professionnels, chercheurs, usagers, etc..

Enfin, je tiens à remercier les organisateurs de ce séminaire qui tombe à point nommé et qui réunit plusieurs acteurs, partenaires et experts de haut niveau, ceci ne peut être qu'utile et enrichissant dans le domaine de dessalement des eaux.

Je souhaite plein succès à vos travaux.



**ALLOCUTION DE MONSIEUR AHMED EL BOUARI,
PRESIDENT DE L'AIGR**

Monsieur le Secrétaire Général du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime,

Monsieur le Wali de Tanger,

Monsieur le Président du Conseil de la Ville de Tanger,

Messieurs les Directeurs,

Monsieur le Président de l'Association Echanges Méditerranéens pour l'Eau, la Forêt et le Développement,

Mesdames et Messieurs les invités,

Honorable assistance,

L'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural est très heureuse d'organiser, conjointement avec nos partenaires d'Echanges Méditerranéens pour l'Eau, la Forêt et le Développement à l'occasion des 10èmes rencontres méditerranéennes, le Séminaire International sur « Le dessalement des eaux: une opportunité pour les régions en pénurie d'eau », qui se tient sous le parrainage de Monsieur le Ministre de l'Agriculture et de la Pêche Maritime.

Ce thème que nous allons débattre tout au long de ces 3 journées est d'une grande importance, surtout lorsqu'on sait que beaucoup de pays du bassin méditerranéen souffrent d'une rareté alarmante des ressources en eau douce. Une rareté qui s'aggrave avec la tendance très inquiétante des changements climatiques qui frappent de plein fouet les pays méditerranéens, en particulier ceux du Sud et de l'Est, se traduisant notamment par des sécheresses successives et sévères, sans oublier bien sûr la demande en eau sans cesse croissante suite à la croissance démographique et au développement économique et social que connaissent ces pays.

Si nous avons choisi ce thème, c'est parce que le dessalement des eaux, en particulier marines, peut être aujourd'hui et dans l'avenir proche une solution salubre pour faire face à cette situation de crise, une solution qui a fait l'objet d'une prise de conscience grandissante ces dernières années de la part des divers acteurs du domaine de l'eau et des populations en général. Tout le monde, en fait, manifeste un désir important pour avoir des informations et des connaissances suffisantes pour comprendre cette technique et envisager sa faisabilité.

En effet, qui peut aujourd'hui rester indifférent vis-à-vis du dessalement alors que les techniques et les technologies dans ce domaine ont connu un développement sans précédent, permettant d'envisager un avenir prometteur et être plus confiant à l'égard de l'approvisionnement en eau douce des divers usages.

Même les besoins en énergie pour dessaler l'eau de mer ne font plus peur et restent à des niveaux réalistes grâce

à la mise au point de systèmes performants de récupération d'énergie. Le développement de la technique d'osmose inverse a révolutionné ce domaine et fait du dessalement une source d'eau douce compétitive. Ces développements ont permis de ramener les coûts de dessalement du mètre cube d'eau de mer de quelques 25 DH il y a 15 ans à moins de 5 DH aujourd'hui, et cela ne s'arrêtera certainement pas là. Le dessalement a de meilleurs jours devant lui.

Beaucoup de pays de la rive sud de la méditerranée, comme le Maroc, ont presque atteint les limites de mobilisation de leurs ressources en eau de surface. Les eaux souterraines souffrent d'une surexploitation sans précédent menaçant leur existence même, leur qualité se dégrade sans cesse, les nappes côtières connaissent de plus en plus l'intrusion des eaux marines. C'est dire que le salut est dans la mer, source d'eau inépuisable et sûre.

L'usage des eaux dessalées n'est pas exclusif, tous les secteurs peuvent en bénéficier : l'eau potable, le tourisme, l'industrie et l'agriculture.

Mesdames et Messieurs,

Par l'organisation de cette grande manifestation, l'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural veut contribuer aux débats importants sur ce sujet de dessalement, à la promotion de son usage et monter aux décideurs et aux divers acteurs que des solutions existent, et qu'il ne faut pas hésiter devant l'audace technique et technologique. Le Maroc qui a relevé les défis des barrages et du million d'hectares irrigué ne pourra qu'aller de l'avant et relever aussi le défi de renforcement de son approvisionnement en eau douce à partir de la mer, dont il bénéficie de 3000 km de côtes et de deux façades atlantique et méditerranéenne.

Ce séminaire qui durera trois jours, dont une journée de visite de terrain, sera l'occasion pour nous tous de voir de plus près et d'examiner minutieusement tous les aspects liés au dessalement : aspects techniques, économiques, financiers, institutionnels, juridiques, qualitatifs et environnementaux et ce, grâce aux interventions d'éminents experts en la matière venus de plusieurs pays méditerranéens dont la France, l'Espagne, la Tunisie, l'Algérie et le Maroc. 18 communications de haut niveau seront faites et seront suivies par des débats qui enrichiront davantage les connaissances des uns et des autres.

Ces communications ont fait l'objet d'un document qui vous sera d'une grande utilité et qui vous a été remis en version éditée et imprimée et en version numérique. En outre, tous les exposés qui vous seront présentés sont consignés dans le CD-ROM du séminaire.

Par ailleurs, et dans le but d'enrichir davantage vos connaissances dans le domaine de dessalement, nous avons collecté pour vous une documentation riche et diversifiée que vous pouvez consulter sur votre CD-ROM.

Nous avons aussi travaillé d'arrache-pied pour vous assurer de très bonnes conditions de séjour dans cette magnifique ville de Tanger qui est le lieu de rencontre des deux rives de la méditerranée, et qui symbolise le renouveau, l'avenir et la paix.

Mesdames et Messieurs,

Permettez-moi de remercier très chaleureusement Monsieur Aziz AKHANNOUCH, Ministre de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, qui a bien voulu accorder son parrainage à cette manifestation, ainsi que Monsieur Moha MARGHI, Secrétaire Général du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime pour avoir bien voulu présidé solennellement l'ouverture de ce séminaire.

Je tiens aussi à remercier vivement nos sponsors, qui sans leur concours, l'organisation de cette manifestation d'un tel niveau aura été quasiment impossible.

Egalement, je remercie beaucoup nos hôtes conférenciers et participants venus de si loin pour honorer et enrichir ces journées. Je leur souhaite la bienvenue et un bon séjour dans leur deuxième pays le Maroc.

Je ne peux pas oublier évidemment nos coorganisateur d'Echanges Med qui ont contribué fortement à l'organisation de cet événement, en particulier Monsieur le Président Georges De Maupeou, Pierre Fauré et Jean Yves Olivier.

Permettez-moi enfin de vous réitérer, au nom des ingénieurs du Génie Rural du Maroc, l'immense honneur que vous nous faites aujourd'hui d'assister aussi nombreux à ce séminaire. Cela nous encourage à aller de l'avant et organiser davantage de manifestations autour de thèmes d'actualité et d'importance pour le développement.

Je souhaite beaucoup de succès à vos travaux et très bon séminaire à tous.

Merci pour votre attention.

Fait à Tanger le 08 mai 2009

Ahmed EL BOUARI, Président de l'AIGR



CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

H. El Mahraz¹, M. Arifi², A. Bennour³ & Olivier⁴

Dans le cadre de leurs 10^{èmes} rencontres méditerranéennes, l'Amicale des Ingénieurs du Génie Rural du Maroc (AIGR) et l'Association Echanges Méditerranéens, pour l'eau, la forêt et le développement, ont organisé, du 8 au 10/05/2009, à Tanger-Maroc, sous le parrainage de Monsieur le Ministre de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, un séminaire international sur le dessalement des eaux: Une opportunité pour les régions en pénurie d'eau ?

Les objectifs de ce séminaire sont multiples :

- Faire un benchmarking international et une analyse de l'expérience de quelques pays méditerranéens, en matière de dessalement de l'eau de mer, pour relever les cas de réussite et de défaillance, dans ce domaine, et proposer les possibilités de transposition de ces expériences sur les modèles méditerranéens ;
- Faire l'état des lieux de la technologie de dessalement de l'eau de mer ;
- Dresser l'évolution du coût de dessalement (coûts d'investissement/renouvellement, coûts d'exploitation et d'entretien, consommation énergétique et autres);
- Examiner les possibilités d'intégration du dessalement, de l'eau de mer, comme solution concurrentielle (et/ou complémentaire) aux autres solutions conventionnelles de mobilisation des ressources en eau, pour le renforcement et la sécurisation de l'AEP des villes et centres méditerranéens (notamment ceux situés près des côtes);
- Dresser les perspectives d'application des technologies de dessalement de l'eau de mer, adaptées à l'irrigation des cultures à forte valeur ajoutée ;
- traiter les aspects les plus importants, liés au dessalement de l'eau de mer: Aspects techniques, législatifs, institutionnels, financiers, et impacts sur l'environnement;

Ce séminaire a regroupé plus de 200 personnes, venant de 5 pays (Maroc, Algérie, Tunisie, France et Espagne),

Les principales conclusions et recommandations de ce séminaire sont les suivantes :

1. CONCLUSIONS

Le recours au dessalement des eaux (et plus particulièrement celles de mer) dans les pays Méditerranéens, et plus particulièrement ceux du sud, deviendra (et le sera davantage), dans un avenir proche, un impératif incontournable, et ce, pour plusieurs raisons :

- > L'agriculture irriguée, dans le pourtour Méditerranéen, constitue un des secteurs économiques les plus importants, de par sa contribution à l'autosuffisance alimentaire, la création d'emplois dans le milieu rural et le rôle moteur du développement rural de façon générale, mais elle constitue également le grand consommateur d'eau (de l'ordre de 70 à 80% de l'ensemble des usages de l'eau).
- > Les besoins en eau potable domestique, industriel et touristiques connaissent (et devront connaître encore) un accroissement considérable, pour faire face au développement de l'urbanisation, des secteurs touristique et industriel et de l'amélioration du niveau de vie de la population, plus particulièrement dans le milieu rural ;
- > Le Contexte climatique des pays méditerranéens, et particulièrement de ceux situés au sud de la rive, est caractérisé par une forte variabilité spatiale et temporelle, une fréquence importante des périodes de sécheresse et un déficit annoncé des ressources en eau: le volume d'eau disponible, par habitant, est déjà inférieur à 1000 m³/an et ces pays se trouvent déjà dans une situation de pénurie d'eau, d'après le classement de la Banque Mondiale ;
- > Les Eaux superficielles et souterraines sont de plus en plus difficiles à traiter, à cause de la pollution (sous ses différentes formes). Par conséquent, le coût de leur potabilisation devient de plus en plus cher ;
- > Ces ressources en eau, d'après les études d'actualisation des PDAIRES et les études d'Impact des changements climatiques, devront connaître encore des baisses de leurs volumes. En effet, les travaux de recherche effectués sur l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du Maroc prévoient une augmentation des températures moyennes et une baisse moyenne des précipitations à l'horizon 2050. Ces changements climatiques probables se traduiraient par une baisse

1. Ingénieur du Génie Rural /Bureau d'Etudes ADI

2. Ingénieur du Génie Rural /Administration du Génie Rural

3. Ingénieur du Génie Rural / Administration du Génie Rural

4. Ingénieur du Génie Rural /Association Echanges Méditerranéens.

des ressources en eau du pays, variant entre environ 10 et 20 % selon les régions. Cette baisse risque d'aggraver le stress hydrique des pays méditerranéens, et particulièrement de ceux situés au sud de la rive, d'accentuer la baisse des débits des cours d'eau et des apports aux barrages, ainsi que l'approfondissement des niveaux des nappes d'eau souterraine. Ces baisses auront pour corollaire, une accentuation de l'avancée du biseau salé au niveau des nappes côtières, un tarissement d'un grand nombre de sources, une salinisation des nappes peu profondes (par l'augmentation de l'évaporation de leurs eaux) et des sols et une augmentation du coût des prélèvements d'eau dans les puits et forages, etc.

Les principales conclusions de ce séminaire, par grand domaine, peuvent se présenter comme suit :

Sur le plan technique:

- > Les deux grandes familles de procédés de dessalement les plus utilisées sont la Distillation (avec ses différents variantes : MSF, MED-TVC, MED-MVC) et l'Osmose inverse ;
- > Toutefois, on peut trouver également :
 - L'électrodialyse, procédé limité au dessalement d'eaux saumâtre, présentant des concentrations en sels dissous totaux inférieures à 5g·L⁻¹. Néanmoins l'électrodialyse peut être utilisée pour les usines faisant appel à une deuxième passe, pour obtenir des eaux de faible salinité.
 - La nanofiltration, destinée essentiellement à diminuer la dureté de l'eau représentée par des ions divalents (Ca₂₊ et Mg₂₊) et présentant une faible élimination des ions monovalents (Na⁺ et Cl⁻), constituant la majeure partie des sels contenus dans l'eau de mer. Il est à remarquer que la nanofiltration trouve une application en prétraitement des eaux d'alimentation des distillateurs, pour éliminer les phénomènes d'entartrage (technologie en cours de développement).
- > Sur la base de toutes les analyses technico-économiques présentées, il ressort que l'osmose inverse est le procédé le mieux approprié et le moins onéreux pour le dessalement d'eau de mer et particulièrement dans les pays qui ne disposent pas de ressources en hydrocarbures (cas du Maroc). Ce procédé permet également une meilleure flexibilité d'exploitation car il n'est pas assujéti à la nécessité d'être couplé (adjacent) à une centrale de production d'électricité, dont les besoins sont très variables, et ce, contrairement aux procédés de distillation qui ne sont intéressants et compétitifs avec l'osmose inverse que lorsqu'ils sont couplés aux centrales thermiques. Il s'agit également d'un procédé propre (pas d'émission d'effluents gazeux)
- > Importance de la connaissance des caractéristiques

de l'eau de mer, et plus particulièrement, dans le cas de l'utilisation de l'osmose inverse. Les valeurs des paramètres de l'analyse de l'eau de mer à traiter interviennent principalement au niveau du choix des prétraitements et de leur dimensionnement, du dimensionnement de l'étage membranaire; De la définition des caractéristiques du perméat, et donc des post-traitements à lui faire subir, pour satisfaire aux exigences de qualité de l'eau distribuée.

- > Prélèvement de l'eau de mer: Il s'effectue, en général, par des prises ouvertes, constituées de canalisations immergées à une certaine profondeur, pour prélever des eaux de bonne qualité. Les puits côtiers sont réservés aux petites et moyennes installations ne dépassant pas 50 000 m³·j⁻¹ si les conditions hydrogéologiques sont favorables
- > Prétraitements : Ils incluent toujours une filtration bicouche (anthracite+sable) en un ou deux étages, précédée ou non par une clarification (décantation lamellaire ou flottation à l'air dissous) pour les eaux de mer difficiles à traiter, suivie par une microfiltration sur cartouches consommables présentant un seuil de 5µm. La microfiltration et l'ultrafiltration membranaires sont utilisées dans certains cas: eaux difficiles à traiter, à l'aide des procédés classiques, recherche d'installations compactes, désir d'obtenir une eau d'alimentation des modules OI de très bonne qualité (indice de colmatage <3), et cela en permanence et quelles que soient les variations des caractéristique physico-chimiques de l'eau de mer. Les prétraitements chimiques comportent tous un traitement anti-entartrage (séquestration, acidification). La chloration, pour éviter le biofouling par les micro-organismes, s'effectue en général par des traitements chocs (donc en discontinu) ;
- > Osmose inverse : Il est fait appel à des membranes composites en film mince, configurées en spirale. L'installation d'une deuxième passe est en général réservée aux usines approvisionnées en eau de mer très saline et très chaude, ou quand les exigences de qualité du perméat l'exigent (SDT inférieurs à 200mg·L⁻¹, concentration en bore, en bromures, ...).
- > La récupération de l'énergie hydraulique des concentrats s'effectue majoritairement à l'aide d'échangeurs de pression, qui ont un meilleur rendement par rapport aux turbines Pelton.
- > La reminéralisation du perméat s'effectue presque exclusivement par acidification (injection de CO₂) et par injection de chaux, ou passage sur du carbonate de calcium logé dans des réacteurs.
- > Dispositifs de rejet de saumure: Plusieurs manières de rejeter les saumures à la mer (rejet à la côte, au moyen d'un canal, rejet au large, au moyen d'un émissaire et rejet par infiltration sous la mer).

> Coût du dessalement de l'eau de mer

- On note une baisse significative du coût de dessalement ces 20 dernières années ;
- Le montant des investissements est éminemment variable d'une usine à l'autre, car il est fonction de nombreux paramètres techniques (Salinité de l'eau de mer, Salinité de l'eau à produire, Température de l'eau de mer, Caractéristiques physiques de l'eau, Caractéristiques physiques de l'eau, Disponibilité de l'énergie électrique sur le site et Conception de l'usine de dessalement) et des conditions économiques locales (Coûts des études, Coût du génie civil, Possibilité d'exécuter localement certains équipements, Frais de mise à disposition des équipements sur le site, Coût de la main d'œuvre locale et Importance des équipes d'expatriés nécessaires au montage et à la mise en production industrielle).
- Les Frais d'exploitation et de maintenance sont également variables. Ils dépendent avant tout des investissements et des taux d'intérêts et d'amortissements appliqués, qui vont conditionner la part des frais financiers dans le coût de production du m³ d'eau traitée et des frais directs d'exploitation, qui comprennent les coûts relatifs :
 - i. à l'énergie électrique (représentant environ le tiers du coût du m³ d'eau);
 - ii. aux produits chimiques et autres produits consommables (cartouches de microfiltration) d'origine locale ou importés;
 - iii. au renouvellement des éléments d'osmose inverse ;
 - iv. à la main d'œuvre ;
 - v. aux pièces de rechange et au renouvellement des composants électromécaniques.

Sur le plan Législatif et réglementaire:

- > La carence et la dispersion des textes réglementaires, se rapportant au dessalement des eaux de mer;
- > La lenteur des procédures et difficultés d'approbation des textes ;
- > L'absence des normes des normes.

Sur le plan institutionnel:

- > La multitude des intervenants et parfois la redondance des rôles ;
- > L'absence d'une stratégie nationale en matière de gouvernance du secteur de dessalement ;
- > L'absence de coordination entre les différents départements concernés ;

Sur le plan socio-économique:

- > L'absence de campagnes de sensibilisation et d'information ;

Sur le plan impacts sur l'environnement:

Le dessalement de l'eau a un impact à la fois positif et négatif sur l'environnement.

Le principal effet positif direct est un accroissement des disponibilités en eau. L'impact positif indirect, sur l'environnement, découle d'une salinisation réduite du sol grâce à une irrigation à base d'eau dessalée par rapport à l'utilisation d'eaux saumâtres.

Les répercussions négatives, sur l'environnement, sont dues à divers éléments:

- > Évacuation de la saumure ou des eaux résiduelles, produites par le dessalement;
- > additifs chimiques antisalissures ou anticorrosion ;
- > impact visuel, au niveau du paysage ;
- > bruit ;
- > émission de gaz à effet de serre, dérivant de la consommation d'énergie ;
- > etc.

Pour tout projet de dessalement des eaux (et en particulier des eaux de mer), il est nécessaire de réaliser une étude d'Impact de l'usine de dessalement qui doit se focaliser notamment sur les deux aspects les plus critiques : le rejet des saumures sur l'écosystème marin et l'accroissement de la consommation énergétique, par rapport aux autres alternatives de ressources en eau potable.

Sur le plan coopération régionale et internationale

L'absence de Coopération régionale et internationale

2. RECOMMANDATIONS

Sur le plan institutionnel

- > Sensibiliser les décideurs sur la nécessité et l'intérêt du dessalement ;
- > Encourager le privé à investir dans les projets de dessalement, à travers la mise en place de dispositions incitatives
- > Favoriser le Partenariat Public Privé, pour promouvoir les projets de dessalement, tout en insistant sur la contribution financière de l'Etat, à l'Investissement initial.

Sur le plan financier

- > Promouvoir le dessalement d'eau de mer dans nos pays méditerranéens (à travers la réduction des coûts d'investissement et d'exploitation), et ce, à travers les actions principales suivantes :
 - Réduction du coût du kw.h.
 - Inciter certaines industries et unités touristiques, grandes consommatrices d'eau, et

se trouvant à proximité des côtes, à s'équiper en stations de dessalement, afin d'atténuer les besoins en eaux douces.

- Réduction des droits de douane et des différentes taxes, sur les équipements utilisés, pour le dessalement, car la part des équipements est de l'ordre de 70 à 75 % du coût d'investissement global.
- Encourager les nouvelles technologies, et en particulier celles envisagées au niveau des membranes, qui doivent asseoir la position dominante du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, en tant que technologie fiable et économique. Il est attendu une réduction du coût de production d'eau douce de l'ordre de 20% dans les cinq prochaines années, et de 50% d'ici à 2020. Ces améliorations financières doivent permettre de rendre abordable le dessalement de l'eau par osmose inverse à des pays ne possédant pas aujourd'hui les ressources financières et techniques pour envisager la construction d'usines de dessalement pour combler le déficit de leurs ressources conventionnelles en eau

Sur le plan technique:

- Le recours au dessalement des eaux de mer, dans les pays Méditerranéens, et plus particulièrement ceux du sud, devient (et le sera davantage), dans un avenir proche, un impératif incontournable ;
- Les Pouvoirs Publics et les décideurs ainsi que tous les acteurs concernés du secteur de l'Eau, sont invités à considérer sérieusement le dessalement de l'eau en général, et des eaux de mer, en particulier, comme une solution fiable, pérenne et très prometteuse ;
- Capitaliser les expériences nationales et internationales dans ce domaine ;
- Adopter une approche participative dans la conduite des projets de dessalement, et ce, depuis les études jusqu'à la mise en service du projet ;
- Bien réaliser toutes investigations nécessaires (recherche approfondie des sites de la prise d'eau de mer et de l'usine de dessalement ; réalisation de campagne d'analyses de la qualité des eaux de mer, études d'impacts, etc.), pour bien asseoir les projets de dessalement ;
- Optimiser les ouvrages de prise et le prétraitement;
- Concevoir, de façon modulaire, l'usine d'Osmose inverse, pour optimiser, et les coûts d'investissement, et l'utilisation à sa pleine capacité,
- Bien que les membranes d'osmose inverse en film mince, configurées en éléments spiralés, aient atteint des performances satisfaisantes, il est nécessaire d'encourager tous les programmes de recherche et de développement, ayant pour objectifs de développer des membranes semi-perméables :
 - peu sensibles au colmatage, et en particulier au bio-fouling ;

- résistantes aux oxydants afin de maintenir l'état de propreté de leur surface ;
 - présentant une meilleure perméabilité, afin de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation (réduction de la consommation en énergie électrique), tout en améliorant, ou tout du moins en conservant, leur taux d'élimination des sels dissous;
 - à durée de vie prolongée, par amélioration de leur résistance au compactage et à la température;
- Affiner les bilans Besoins-Ressources et entreprendre toutes les actions d'économie d'eau, pour identifier les zones à alimenter par dessalement (compte tenu du prix encore élevé de ces techniques, comparées aux ressources conventionnelles) ;

Sur le plan impacts sur l'environnement:

Les moyens à adopter pour limiter les impacts négatifs du rejet de saumures, conformément à la réglementation en vigueur, dans la quasi-totalité des pays, peuvent être classés en deux groupes : moyens à mettre en œuvre durant la phase de projet et programmes de vigilance environnementale.

- Les moyens en phase de projet consistent en la réalisation d'une cartographie sous-marine des habitats écologiques à protéger dans toute la région, avant d'avoir choisie la parcelle où on situera l'usine de dessalement. Il est aussi très important faire un modèle numérique de propagation de la salinité aidant au dessin du rejet, qui sera calibré durant la phase d'exploitation de l'usine, à l'aide de mesures in situ de la salinité. Finalement, il faut tenir compte de l'importance du dessin du type de rejet, soit direct sur la côte soit par le biais d'un émissaire sous-marin.
- Le programme de vigilance environnementale doit consister en le contrôle du débit et de la salinité des saumures à l'intérieur de l'usine, avec le but de détecter les possibles anomalies du fonctionnement de l'usine, le contrôle des saumures dans la zone de rejet et le contrôle de qualité dans les zones à protéger pour leur importance environnementale et qui sont susceptibles d'être affectées par une forte variation de la salinité.

Sur le plan réglementaire et juridique:

- Examiner l'intégration du dessalement des eaux, lors de la refonte des textes législatifs et réglementaires

Sur le plan coopération régionale et internationale

- Renforcer la coopération maghrébine, méditerranéenne et internationale sur tous les aspects liés au dessalement des eaux en général, et des eaux de mer, en particulier.

RESSOURCES EN EAU ET UTILISATIONS EN MEDITERRANEE, SITUATION ET PERSPECTIVES

M. Blinda¹

Résumé

Dans les pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties. Elles sont estimées, en année moyenne, à 1080 km³/an dont 118 km³, soit 11% du total, proviennent de pays non méditerranéens.

Les pays de la rive Sud ne reçoivent que 10 % du total des précipitations. La population méditerranéenne « pauvre » en eau, c'est-à-dire celle des pays dotés de moins de 1000 m³/hab./an de ressources renouvelables s'élève actuellement à 180 millions d'habitants et pourrait atteindre 250 millions d'habitants en 2025. La population en situation de pénurie, c'est-à-dire disposant de moins de 500 m³/hab./an, pourrait passer dans le même temps de 60 à 80 millions d'habitants.

Les Objectifs du Millénaire pour le Développement en matière d'accès à l'eau potable et à l'assainissement ne sont pas encore atteints puisque respectivement vingt millions et quarante sept millions de Méditerranéens n'ont, aujourd'hui, pas accès à ces services, notamment dans les pays au Sud et à l'Est.

Les demandes en eau ont doublé dans la deuxième moitié du XXème siècle pour atteindre 280 km³/an pour l'ensemble des pays riverains. A l'horizon 2025, la demande en eau pourrait encore s'accroître de 50 km³. L'essentiel de cette croissance serait le fait des pays du Sud et surtout de la rive Est de la Méditerranée, l'agriculture restant le principal utilisateur de la ressource en eau.

Les rendements d'utilisation des eaux malgré quelques progrès encourageants, sont loin d'être satisfaisants; pertes, fuites de transport et gaspillages sont estimés à environ 38 % de la demande totale en eau.

Compte tenu de l'accroissement démographique, des changements climatiques, des mutations économiques et sociales, le risque de manque d'eau ne peut plus être écarté. La réalité présente est déjà très tendue et implique, de manière absolue, une gestion plus économe, plus durable et plus équitable de l'eau pour relever les trois défis majeurs auxquels sont désormais confrontés les pays méditerranéens : gérer durablement des ressources hydriques limitées, assurer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement aux populations non encore desservies et habituer les usagers à des comportements économes en eau.

Les marges de progrès sont, en effet, considérables puisqu'une meilleure gestion de la demande permettrait d'économiser un quart des demandes en eau. Le renforcement de la coopération régionale, dans le cadre de l'Union pour la Méditerranée (UpM) et la future Stratégie pour l'eau en Méditerranée, contribueront sans doute à relever ces défis.

Mots-clés : pays méditerranéens, problèmes de l'eau, ressources et demandes en eau, pénuries, gestion des demandes, économies d'eau.

INTRODUCTION

Dans les pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties. Les pays de la rive Sud ne reçoivent que 10 % du total des précipitations. Les Objectifs du Millénaire pour le Développement en matière d'accès à l'eau potable et à l'assainissement ne sont pas encore atteints puisque respectivement vingt millions et quarante sept millions de Méditerranéens n'ont, aujourd'hui, pas accès à ces services, notamment dans les pays au Sud et à l'Est. Les rendements d'utilisation des eaux malgré quelques progrès encourageants, sont loin d'être satisfaisants;

pertes, fuites de transport et gaspillages sont estimés à environ 38 % de la demande totale en eau.

Compte tenu de l'accroissement démographique, des changements climatiques, des mutations économiques et sociales, la demande en eau va inévitablement croître et le risque de manque d'eau ne peut plus être écarté. La réalité présente est déjà très tendue et implique, de manière absolue, une gestion plus économe, plus durable et plus équitable de l'eau pour relever les trois défis majeurs auxquels sont désormais confrontés les pays méditerranéens : gérer durablement des ressources hydriques limitées, assurer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement aux populations non encore desservies et habituer les usagers à des comportements économes

1. Docteur en Géo-environnement, Expert international en gestion quantitative et qualitative de l'eau, contamination des eaux et des sols et traitement des eaux usées, chargé de mission eau au Plan Bleu du programme des Nations Unies pour l'Environnement. E-mail : mblinda@planbleu.org

en eau. Nul doute que la future Stratégie pour l'eau en Méditerranée, élaborée dans le cadre de l'Union pour la Méditerranée (UpM) contribuera à relever ces défis.

PLUS DE PRESSIONS SUR LES RESSOURCES EN EAU

En Méditerranée, les ressources en eau naturelles renouvelables sont estimées, en année moyenne, à 1080 km³/an dont 118 km³, soit 11% du total, proviennent de pays non méditerranéens.

La population méditerranéenne « pauvre » en eau, c'est-à-dire celle des pays dotés de moins de 1000 m³/hab./an de ressources renouvelables s'élève actuellement à 180 millions d'habitants et pourrait atteindre 250 millions d'habitants en 2025. La population en situation de pénurie, c'est-à-dire disposant de moins de 500 m³/hab./an, pourrait passer dans le même temps de 60 à 80 millions d'habitants.

L'examen de la pression des demandes sur les ressources exprimée par l'indice d'exploitation des ressources en eau naturelles renouvelables, met en évidence une géographie très contrastée et parfois inquiétante du « futur en eau ». D'ores et déjà, dans

Figure 1: Indices d'exploitation des ressources en eau renouvelables, pays entiers, et bassins versants, 2025

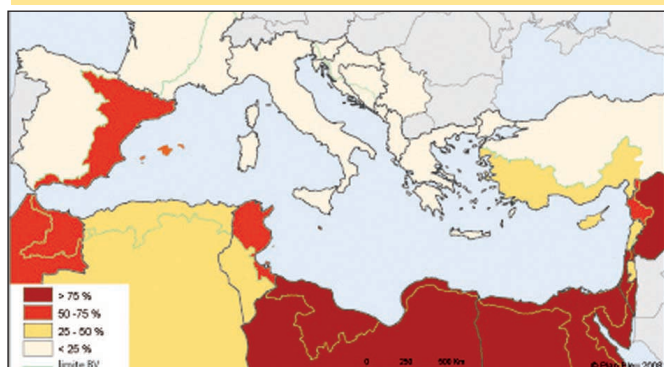
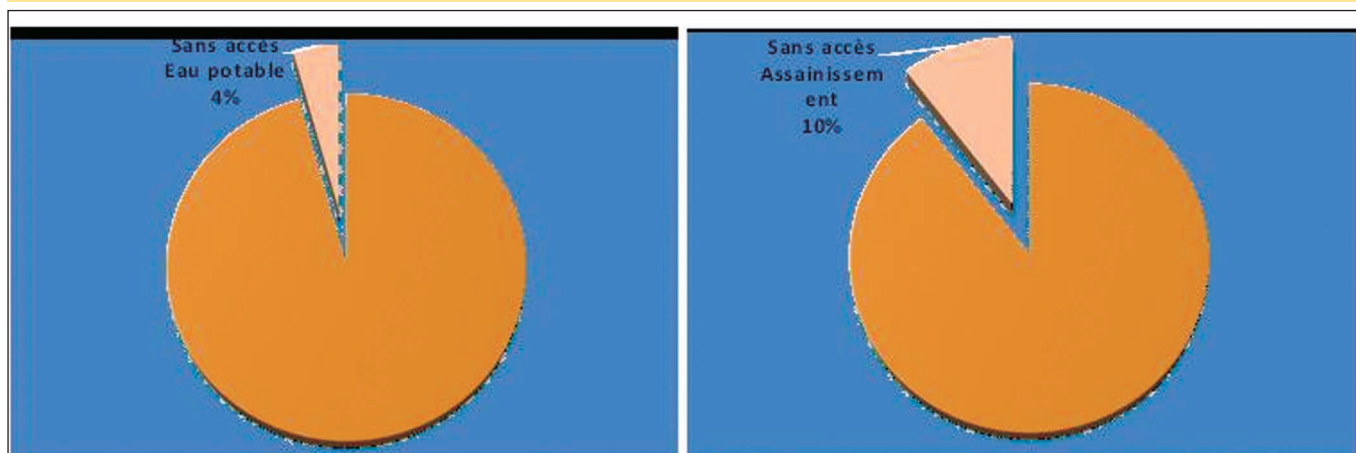


Figure 2: Part de la population n'ayant pas accès à l'eau et à l'assainissement, pays entiers, 2006



certains pays, les prélèvements en eau approchent voire dépassent le niveau limite des ressources renouvelables. Ces calculs à l'échelle nationale peuvent cacher d'importantes disparités à l'échelle du bassin versant méditerranéen ou localement, comme en Espagne méditerranéenne (figure 1). Les situations présentes et futures deviennent encore plus alarmantes lorsque cet indice est calculé par rapport aux ressources exploitables qui ne représentent que la moitié ou le tiers des ressources en eau naturelles renouvelables.

Face à la croissance démographique et au développement économique, les demandes en eau, c'est-à-dire la somme des prélèvements sur les ressources, y compris les pertes lors du transport et de l'usage et des productions non conventionnelles comme le dessalement ou la réutilisation des eaux usées, ont doublé depuis 1950 pour atteindre, en 2007, 280 km³/an pour l'ensemble des pays riverains. L'agriculture, qui reste le premier consommateur d'eau, prélève 82 % des volumes sur les rives Sud et Est du bassin.

Une partie croissante des demandes est satisfaite par une production d'eau non durable estimée à 16 km³/an, dont 66 % sont issus de prélèvements d'eaux fossiles et 34 % de surexploitation de ressources renouvelables.

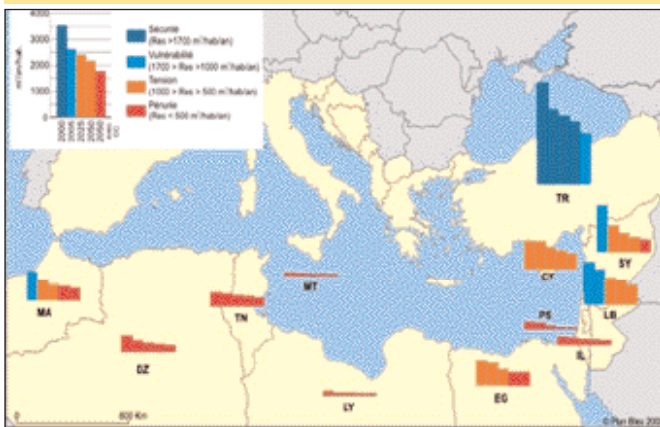
Aux pressions quantitatives sur les ressources viennent se surajouter les impacts des rejets d'eaux usées urbaines, industrielles et agricoles non ou insuffisamment épurées, qui engendrent des teneurs excessives en pesticides ou en nitrates dans de nombreux aquifères ou affectent directement les cours d'eau. L'accès à un système d'assainissement amélioré affiche encore un retard significatif notamment au Sud et au Proche-Orient puisque quarante sept millions de Méditerranéens en sont encore privés (figure 2).

DES EVOLUTIONS INCOMPATIBLES AVEC CELLES DES DISPONIBILITES EN EAU

1. ... Exacerbées sous les impacts du changement climatique

Les évolutions de températures et de précipitations décrites par les modèles climatiques entraîneront une aggravation de ces tendances. Les régions méditerranéennes, qui souffrent déjà d'un stress hydrique important, aggravé par une succession d'années de sécheresse, vont se trouver particulièrement exposées à des réductions de leurs ressources en eau. Dans certains pays, ce type d'évolution pourrait déboucher sur des situations de crise aiguë. Au Sud et à l'Est de la Méditerranée, compte tenu de la croissance démographique et des conséquences immédiates des modifications du cycle de l'eau, on estime qu'à l'horizon 2050, environ 290 millions de personnes pourraient se retrouver en situation de pénurie d'eau (figure 3).

Figure 3: Evolution des ressources en eau par habitant dans les pays de Sud et de l'Est de la Méditerranée entre 2000 et 2050



Source : Plan Bleu

2. Des demandes en eau croissantes

D'après les projections récentes du Plan Bleu (scénario tendanciel), la demande en eau pourrait encore s'accroître de 50 km³ d'ici 2025 pour atteindre 330 km³/an; l'essentiel de cette croissance serait le fait des pays du Sud et Est.

L'agriculture devrait rester le principal utilisateur, en volume, de la ressource en eau pour satisfaire les besoins d'irrigation notamment au Sud et à l'Est du bassin. Les surfaces irriguées pourraient ainsi augmenter de 38% au Sud et de 58% à l'Est pour atteindre respectivement 9 millions ha et 8 millions ha d'ici 2030 (FAO).

La demande des collectivités devrait également continuer à croître pour répondre aux besoins en eau potable d'une population de plus en plus urbaine. La population des pays riverains devrait atteindre 535

millions d'habitants en 2025, avec une croissance très inégalement répartie : 10 millions au Nord et 82 millions au Sud et à l'Est. En outre, avec environ 300 millions de touristes dans les régions côtières méditerranéennes qui restent les premières destinations touristiques mondiales, on peut s'attendre à une amplification des demandes en eau potable.

Le souci de conservation des fonctions écologiques des eaux du milieu naturel commence à être intégré aux objectifs prioritaires de gestion des eaux, à travers le concept de « demande en eau environnementale », qui peut être évaluée et ajoutée aux demandes liées aux utilisations humaines (Espagne), ou par le biais de « débits réservés » à soustraire des ressources en eau.

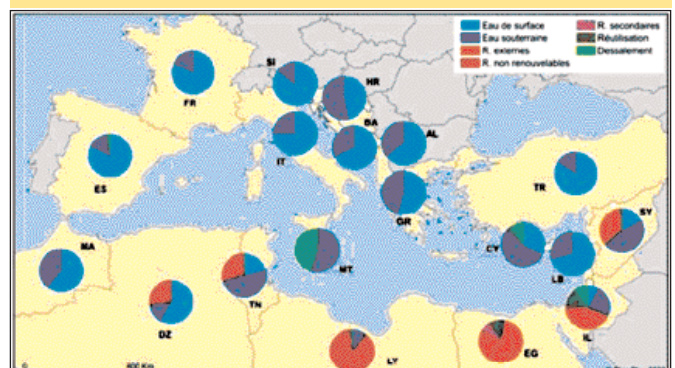
DES POLITIQUES DE L'EAU ENCORE TROP AXEES SUR L'OFFRE

(France, Italie, Israël, Maroc, Tunisie,...).

Pour répondre aux besoins croissants en eau, les stratégies nationales continuent à privilégier l'accroissement de l'offre en eau (figure 4), à travers la réalisation d'aménagements hydrauliques de grande ampleur (plus de 1200 grands barrages dans le seul bassin versant méditerranéen), le développement des transferts interrégionaux et internationaux, l'exploitation d'aquifères non renouvelables ou l'utilisation de ressources non conventionnelles telle que la réutilisation des eaux usées épurées (Espagne, Israël, Chypre, Egypte, Tunisie), l'utilisation des retours d'eau de drainage agricole (Egypte), le dessalement d'eau de mer ou des eaux saumâtres en plein essor à Malte, en Espagne, Algérie et Israël. Ces politiques ont donc atteint des limites physiques telles que l'équipement des sites favorables, l'envasement des barrages, la baisse des ruissellements ou l'épuisement de certaines ressources fossiles), économiques (coût du dessalement) et environnementales comme l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers, la dégradation des systèmes aquatiques, la régression des zones humides.

Cependant, l'abaissement significatif des coûts rend le dessalement de plus en plus compétitif. La capacité

Figure 4: Sources d'approvisionnement en eau actuelles des pays méditerranéens



Source : Plan Bleu, J. Margat

installée pourrait être multipliée par cinq ou six d'ici 2030 pour atteindre environ 30 millions m³/j. Le dessalement reste une alternative d'adaptation à la sécheresse et au changement climatique pour un approvisionnement en eau potable.

DES PISTES POUR ECONOMISER JUSQU'A UN QUART DE LA DEMANDE EN EAU

Le Plan Bleu a tenté d'évaluer l'ampleur des pertes et des « mauvais usages » de l'eau dans chaque secteur et d'estimer, à partir d'un jeu d'hypothèses ambitieuses mais réalisables (réduire de moitié les pertes constatées actuellement), les pertes récupérables par secteur et par sous-régions du bassin méditerranéen. Le potentiel d'économies possibles a ainsi été estimé à près d'un quart de la demande en eau actuelle, soit 72 km³ sur une demande totale de 280 km³ à l'échelle de l'ensemble des pays méditerranéens.

Ce gisement d'économie d'eau serait de l'ordre de 85 km³/an en 2025, l'agriculture irriguée représente le plus gros potentiel d'économies en volume, avec près de 64 % du potentiel total d'économies d'eau identifié en Méditerranée, contre 22 % pour l'industrie et 14 % pour l'approvisionnement en eau potable.

Dans cette perspective optimiste et supposée généralisée à tous les pays, la demande en eau totale pourrait être de 245 km³/an, répartis en 106 km³/an au Nord et 139 km³/an au Sud et au Proche-Orient. Ceci équivaldrait globalement à une diminution de la demande totale actuelle d'une quarantaine de km³/an.

Ces estimations globales, fondées sur des expériences concrètes menées dans certains pays (encadré 1), montrent que de telles inflexions sont possibles.

Encadré 1 : Des politiques économes d'eau en Tunisie, Syrie et au Maroc

Références Bibliographiques

- FAO. Agriculture: toward 2015/2030, Global perspective studies unit, 2000.
- MARGAT, Jean. BLINDA Mohammed. L'avenir de l'eau en Méditerranée. Problèmes et solutions : nouvelle prospective 2025 du Plan Bleu. "International Conference on Water, land and Food Security in Arid and Semi-arid Regions", Keynotes papers: 47-63 (2005).
- PLAN BLEU. "Méditerranée, les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement", dirigé par Guillaume Benoit et Aline Comeau. Ed., de l'Aube : 71-107, 2005.
- BLINDA Mohammed. THIVET Gaëlle. "Faire face aux crises et pénuries d'eau en Méditerranée". Les Notes du Plan Bleu, n° 4, 2006.
- PLAN BLEU. Gestion de la demande en eau : progrès et politiques. MAP Technical Report Series n° 168, Athènes, 2008.
- PLAN BLEU. MARGAT, Jean. L'eau des Méditerranéens : situation et perspectives. Ed., L'Harmattan 288 p., 2008.
- PLAN BLEU. "Les perspectives du Plan Bleu sur le développement durable en Méditerranée", 2008
- BELGHITI Mhamed, Amélioration de l'efficacité de l'eau au Maroc, Note de synthèse, 2008.
- BLINDA Mohammed, THIVET Gaëlle. Ressources et demandes en eau en Méditerranée, situation et perspectives, Edition John Libbey, Sciences et changements planétaires «Sécheresse», vol. 20, n° 1, pp. 1-8, Janvier-février, mars 2009.

Eau d'irrigation

La Tunisie a mis en place une stratégie nationale d'économie d'eau d'irrigation comprenant la création d'associations d'usagers, une tarification ayant permis un recouvrement progressif des coûts et des instruments financiers ciblés pour l'équipement des exploitations agricoles en technologies économes en eau et le soutien des revenus des agriculteurs. Cette politique a permis, depuis 1996, de stabiliser la demande en eau d'irrigation malgré le développement important du secteur agricole et de sécuriser tant les besoins du secteur touristique, source de devises, que des villes, source de paix sociale.

Source : A. Hamdane, Plan Bleu 2002

En Syrie, l'adoption de la stratégie nationale de l'eau permettra de réduire la demande en eau d'irrigation et la stabiliser par la conversion des superficies irriguées en mode d'irrigation plus économes en eau sans qu'elle soit influencée par la croissance démographique ni pouvoir freiner le développement du secteur (PIB amélioré).

Source: H Al-Azmeh, Plan Bleu 2008

Eau potable

Au Maroc, l'augmentation de la demande en eau de l'agglomération de Rabat-Casablanca a été sensiblement ralentie depuis quinze ans, et ce, malgré la forte croissance urbaine. Une meilleure gestion de l'eau (réduction des fuites sur réseaux, tarification progressive, comptage systématique, forte sensibilisation des usagers) a permis de retarder, voire d'annuler, certains investissements lourds (barrages, canaux de transfert) initialement prévus dans le plan directeur de 1980, tout en répondant aux besoins. Ces investissements, difficiles à financer sans endettement supplémentaire, pourraient se révéler superflus à terme.

Source : DGH Rabat, Plan Bleu 2002

GESTION DES RESSOURCES EN EAU AU MAROC : BILAN ET PERSPECTIVES

A. Ziyad¹

Résumé

De part sa situation géographique, le Maroc est caractérisé par un climat fortement contrasté avec un régime pluviométrique dominé par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps. Le potentiel des ressources en eau naturelles, est évalué à 22 milliards de m³ par an, soit l'équivalent de 730 m³ /habitant/an. Plus de la moitié de ces ressources sont concentrées dans les bassins du nord et le Sebou couvrant près de 7% du territoire national.

Dans ce contexte et pour accompagner le développement du pays, le Maroc s'est engagé depuis longtemps dans la voie de la maîtrise de ces ressources en eau à travers la réalisation d'importante infrastructure hydraulique ce qui lui a permis d'assurer ses besoins en eau sans difficultés majeures. En effet, le Maroc a réussi à bâtir un modèle efficient de gestion de l'eau, propre au pays et cité en exemple à l'échelle internationale.

Derrière ce succès indéniable la politique de maîtrise et de mobilisation des ressources en eau ; le développement des compétences techniques et de recherche scientifique appliquée ; une politique de planification à long terme lancée au début des années 1980 qui permet aux décideurs d'anticiper la pénurie d'eau en donnant aux pouvoirs publics une visibilité à long terme (20 à 30 années) ; et en enfin des avancées importantes dans le domaine réglementaire et institutionnel.

Cette politique a permis de doter le pays d'importante infrastructure hydraulique constituée de 128 grands barrages totalisant une capacité de près de 17 Milliards de m³ et de plusieurs milliers de forages et de puits captant les eaux souterraines.

Ces infrastructures ont permis d'assurer :

- Le développement de l'irrigation à grande échelle. La superficie actuellement irriguée avoisine les 1.5 Millions d'hectares dont les deux tiers sont équipés par les pouvoirs publics ;
- L'approvisionnement en eau potable des populations. La production en eau potable a été multipliée par 5 au cours des trois dernières décennies pour atteindre plus de 1 milliards de mètre cube en 2007. L'accès à l'eau potable est généralisé en milieu urbain avec un taux de branchement individuel au réseau de 92%, le reste de la population, située dans les quartiers périphériques en zone semi-urbaine, est desservie par bornes fontaines. En milieu rural, le taux de desserte a connu au cours des dernières années un développement spectaculaire passant ainsi de 14% en 1994 à plus de 80% en fin 2008.
- La satisfaction des besoins en eau industriels et touristiques.
- La contribution à la protection des biens et des personnes contre les inondations notamment dans plusieurs villes et plaines agricoles comme le Gharb, le Loukkos, Nekkour et la Vallée de Tafilalt, ;
- La production hydroélectrique. Les usines hydro-électriques réalisées jusqu'en 2008 totalisent une puissance installée de 2 700 MW contribuant à la production électrique nationale en année hydrologique normale à hauteur de 10%.
- Et l'aménagement des bassins versants pour la conservation des sols et la lutte contre l'érosion hydrique. La superficie cumulée aménagée est de l'ordre de 550 400 ha.

Toutefois, le secteur de l'eau reste confronté à des défis liés principalement à la raréfaction des ressources en eau sous l'effet des changements climatiques, à la surexploitation des ressources en eau souterraine, à la faiblesse de la valorisation des ressources en eau mobilisées notamment dans le domaine agricole et à la détérioration de la qualité des ressources en eau à cause du retard dans l'assainissement et l'épuration des eaux usées.

Pour consolider les acquis et relever les défis susmentionnés, une nouvelle impulsion visant le renforcement de la politique de l'eau a été amorcée et présentée dans le cadre de la stratégie de l'eau présentée à sa Majesté le 14 avril 2009 à Fes. Les grandes orientations et contours de cette stratégie portent sur les axes suivants:

- La gestion de la demande en eau et la valorisation de l'eau.
- La gestion et le développement de l'offre.
- La préservation et la protection des ressources en eau, du milieu naturel et des zones fragiles.
- La réduction de la vulnérabilité aux risques naturels liés à l'eau et l'adaptation aux changements climatiques.
- La poursuite des réformes réglementaires et institutionnelles.

1. Ingénieur en Chef du Génie Rural, Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, Maroc. E-mail : ziyad@water.gov.ma

En ce qui concerne, la gestion et le développement de l'offre, de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles seront mobilisées, notamment le dessalement de l'eau de mer et la réutilisation des eaux usées épurées. En ce qui concerne le dessalement de l'eau de mer, le Maroc a opté pour cette alternative pour l'approvisionnement en eau potable des provinces du sud en raison de leur faible potentiel en ressources en eau conventionnelle. La capacité de production actuelle reste cependant marginale et les installations réalisées jusqu'à aujourd'hui sont de petite taille. Toutefois la limitation des ressources en eau dans certaines régions conduit à envisager le recours au dessalement d'eau de mer. C'est ainsi que la stratégie de l'eau prévoit la production d'eau de mer dessalée vers l'horizon 2030 de près de 400 Mm/an. Il est prévu de réaliser à moyen terme les usines planifiées à Laayoune et Agadir et à long terme de nouvelles usines à Tiznit- Sidi Ifni, Chtouka, Essaouira, Safi, El Jadida, Casablanca, Al Hoceima et Saidia.

1. CLIMAT ET RESSOURCES EN EAU

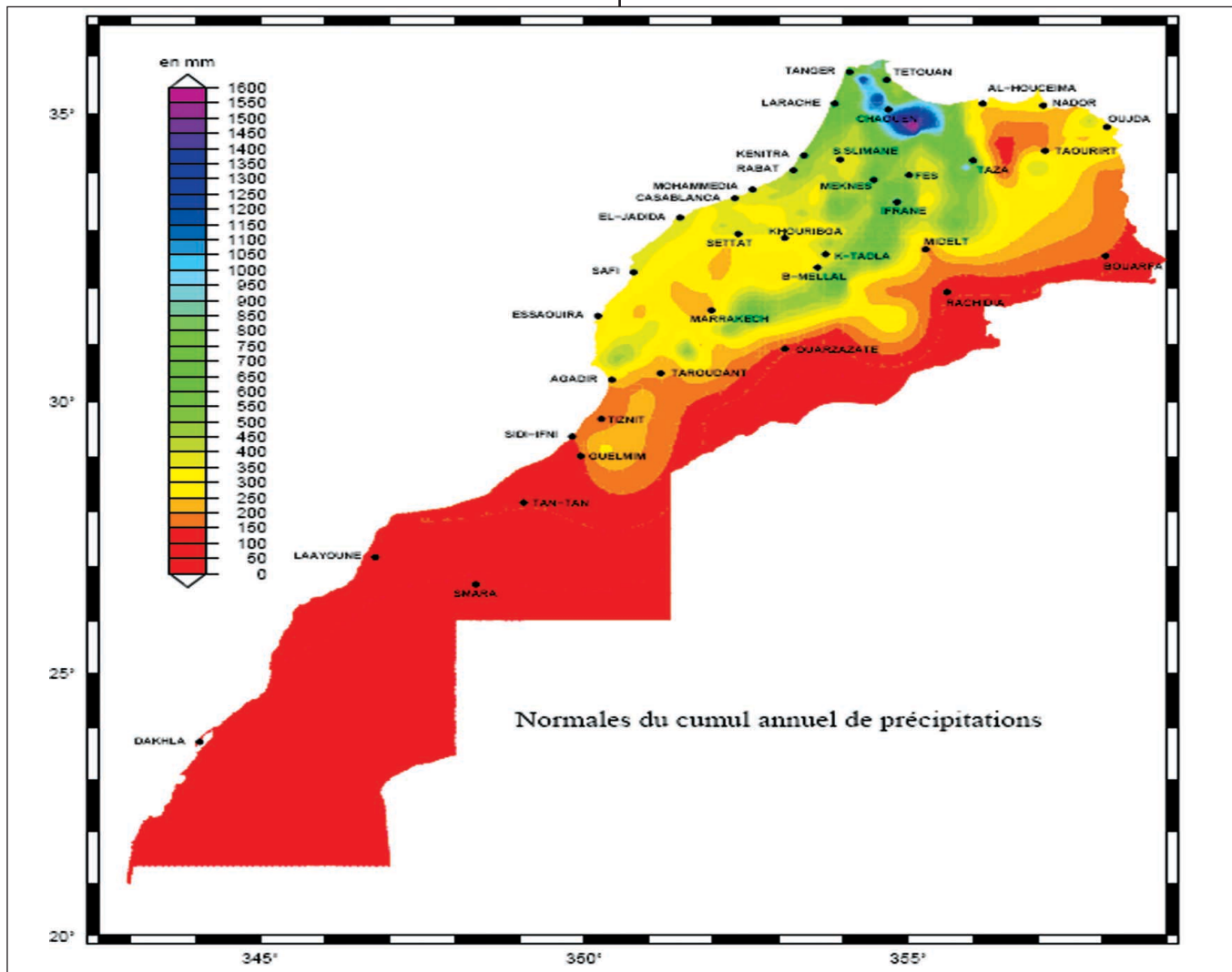
De part sa situation géographique, le Maroc est caractérisé par un climat à la fois méditerranéen au nord et aride au sud et au sud-est de l'Atlas, avec une saison sèche et chaude et une saison froide et humide.

Le régime pluviométrique au Maroc est caractérisé par une forte variabilité spatiale. Les précipitations moyennes annuelles se répartissent comme suit :

- Supérieures à 800 mm dans la région la plus arrosée du nord.

- Entre 400 à 600 mm dans la région du Centre;
- Entre 200 et 400 mm dans la région de l'Oriental et du Souss;
- Entre 50 et 200 mm dans les zones sud-atlasiques;
- Et moins de 50 mm dans les bassins de Sakia El Hamra et Oued Eddahab.

La pluviométrie en année moyenne est évaluée à 140 milliards de m² avec une grande variabilité interannuelle. La figure ci-après présente les normales des cumuls annuels à l'échelle nationale.

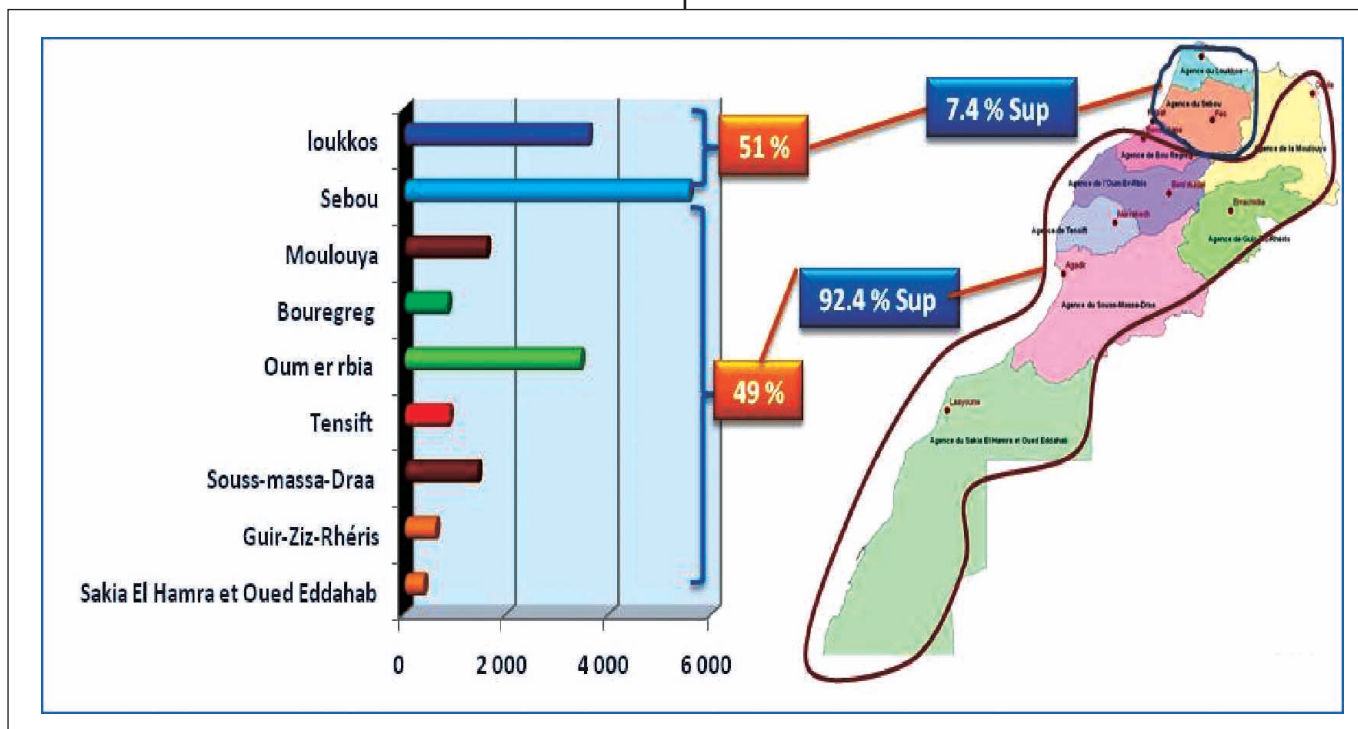


Le potentiel des ressources en eau naturelles, est évalué à 22 milliards de m³ par an, soit l'équivalent de 730 m³/habitant/an.

Les ressources en eau superficielle sur l'ensemble du territoire sont évaluées en année moyenne à 18 milliards de m³, variant selon les années de 5 Milliard de m³ à 50 Milliards de m³. Les bassins du nord (Loukkos, Tangérois et Côtiers méditerranéens) et le Sebou qui couvrent près de 7 % de la superficie du pays disposant de plus de la moitié des ressources en eau (figure ci-après).

- Le développement des compétences techniques et de recherche scientifique appliquée.
- Une politique de planification à long terme lancée au début des années 1980 qui permet aux décideurs d'anticiper la pénurie d'eau en donnant aux pouvoirs publics une visibilité à long terme (20 à 30 années).
- Et en enfin des avancées importantes dans le domaine réglementaire et institutionnel.

Cette politique a permis de doter le pays d'importante



Les eaux souterraines représentent environ 20 % du potentiel en ressources en eau du pays. Sur les 96 nappes répertoriées, 21 sont des nappes profondes et 75 superficielles. Les plus importants systèmes aquifères couvrent une superficie totale de près de 80 000 km², soit environ 10 % du territoire.

infrastructure hydraulique constituée de 128 grands barrages totalisant une capacité de près de 17 Milliards de m³ et de plusieurs milliers de forages et de puits captant les eaux souterraines.

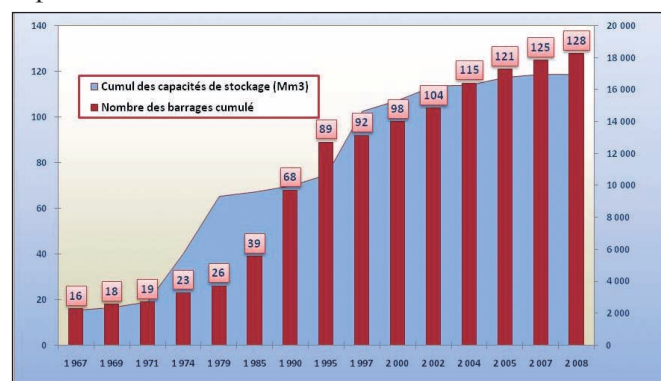
2. BILAN DES GRANDES REALISATIONS

Pour accompagner le développement du pays, le Maroc s'est engagé depuis longtemps dans la voie de la maîtrise de ces ressources en eau à travers la réalisation d'importante infrastructure hydraulique ce qui lui a permis d'assurer ses besoins en eau sans difficultés majeures.

En effet, le Maroc a réussi à bâtir un modèle efficient de gestion de l'eau, propre au pays et cité en exemple à l'échelle internationale.

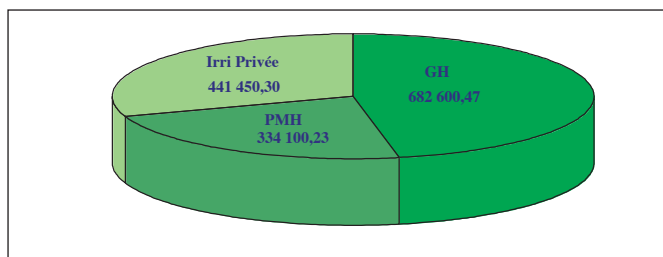
Derrière ce succès indéniable :

- La politique de maîtrise et de mobilisation des ressources en eau conventionnelles.

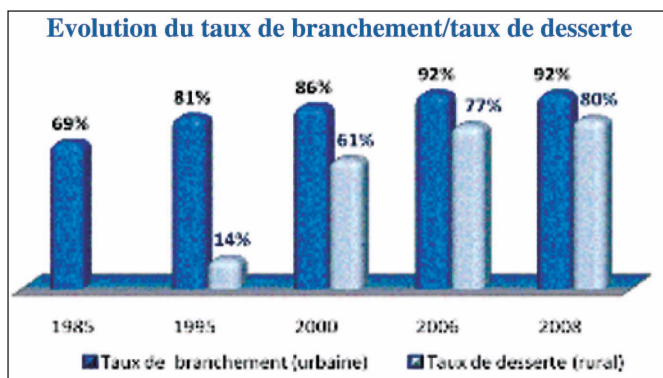


Ces infrastructures ont permis d'assurer :

- Le développement de l'irrigation à grande échelle. La superficie actuellement irriguée avoisine les 1.5 Millions d'hectares dont les deux tiers sont équipés par les pouvoirs publics ;



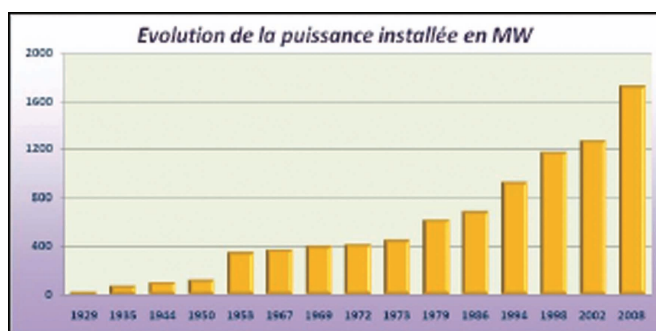
- L'approvisionnement en eau potable des populations. La production en eau potable a été multipliée par 5 au cours des trois dernières décennies pour atteindre plus de 1 milliard de mètre cube en 2007. L'accès à l'eau potable est généralisé en milieu urbain avec un taux de branchement individuel au réseau de 92%, le reste de la population, située dans les quartiers périphériques en zone semi-urbaine, est desservie par bornes fontaines. En milieu rural, le taux de desserte a connu au cours des dernières années un développement spectaculaire passant ainsi de 14% en 1994 à plus de 80% en fin 2008.



- La satisfaction des besoins en eau industriels et touristiques.
- La contribution à la protection des biens et des personnes contre les inondations notamment dans plusieurs villes et plaines agricoles comme le Gharb, le Loukkos, Nekkor et la Vallée de Tafilalt, ... ;
- La production hydroélectrique. Les usines hydroélectriques réalisées jusqu'en 2008 totalisent une puissance installée de 2 700 MW contribuant à la production électrique nationale en année hydrologique normale à hauteur de 10%.
- Et l'aménagement des bassins versants pour la conservation des sols et la lutte contre l'érosion hydrique. La superficie cumulée aménagée est de l'ordre de 550 400 ha.

3. LES GRANDES ORIENTATIONS DE LA NOUVELLE STRATEGIE DE DEVELOPPEMENT DU SECTEUR DE L'EAU

Malgré les acquis importants présentés ci-avant, le secteur de l'eau reste confronté à des défis majeurs liés principalement à la raréfaction des ressources en eau sous l'effet des changements climatiques, à la surexploitation des



ressources en eau souterraine, à la faiblesse de la valorisation des ressources en eau mobilisées notamment dans le domaine agricole et à la détérioration de la qualité des ressources en eau à cause du retard dans l'assainissement et l'épuration des eaux usées.

Pour consolider les acquis et relever les défis susmentionnés, une nouvelle impulsion visant le renforcement de la politique de l'eau a été amorcée et présentée dans le cadre de la stratégie de l'eau présentée à sa Majesté le 14 avril 2009 à Fès. Les grandes orientations et contours de cette stratégie portent sur les axes suivants:

- La gestion de la demande en eau et la valorisation de l'eau : Economie d'eau potable, industrielle et touristique, économie d'eau en irrigation
- La gestion et le développement de l'offre : la mobilisation des eaux de surface par la réalisation des barrages, dessalement de l'eau de mer et déminéralisation des eaux saumâtres, et la réutilisation des eaux usées épurées.
- La préservation et la protection des ressources en eau, du milieu naturel et des zones fragiles : Protection de la qualité des ressources en eau de surface et souterraine et lutte contre la pollution, et sauvegarde des zones sensibles
- La réduction de la vulnérabilité aux risques naturels liés à l'eau et l'adaptation aux changements climatiques: la lutte contre les effets de la sécheresse à travers le plan de gestion de sécheresse par bassin hydraulique et l'amélioration de la protection des personnes et des biens contre les inondations
- La poursuite des réformes réglementaires et institutionnelles.

En ce qui concerne le dessalement de l'eau de mer, le Maroc a opté pour cette alternative pour l'approvisionnement en eau potable des provinces du sud en raison de leur faible potentiel en ressources en eau conventionnelle. La capacité de production actuelle reste cependant marginale et les installations réalisées jusqu'à aujourd'hui sont de petite taille. Toutefois la limitation des ressources en eau dans certaines régions conduit à envisager le recours au dessalement d'eau de mer. C'est ainsi que la stratégie de l'eau prévoit la production d'eau de mer dessalée vers l'horizon 2030 de près de 400 Mm³/an. Il est prévu de réaliser à moyen terme les usines planifiées à Laayoune et Agadir et à long terme de nouvelles usines à Tiznit- Sidi Ifni, Chtouka, Essaouira, Safi, El Jadida, Casablanca, AL Hoceima et Saidia.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES: CAUSES ET CONSEQUENCES SUR LE CLIMAT ET LES RESSOURCES EN EAU

M. Sinan¹, M. Boussetta¹ & A. El Rherari¹

Résumé

La hausse des températures moyennes à la surface du globe est la première conséquence attendue des émissions massives des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les relevés météorologiques confirment les anomalies positives de la température par rapport aux normales depuis 1861. Depuis 1976, la hausse s'est nettement accélérée, atteignant 0,18°C par décennie. Les années 90, marquées par une anomalie positive moyenne de 0,38°C dans l'hémisphère Nord et de 0,23°C dans l'hémisphère Sud, représentent la décennie la plus chaude qui ait été observée (OMM, 2005).

La présente communication a pour objet de présenter les résultats d'études réalisées par les chercheurs du Centre d'Études et de Recherches sur les Ressources en Eau (CERHYDREAU) de l'EHTP relatives de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du Maroc.

Les ressources en eau du Maroc sont caractérisées par une forte sensibilité au climat. Sur les 139 milliards de m³ de précipitations moyennes annuelles, 80% sont perdues par évapotranspiration. Seules environ 16 % des précipitations constituent la pluie utile (environ 22 milliards de m³/an) alimentant les cours d'eaux superficielles et les nappes d'eau souterraines. Les ressources en eau mobilisables par des moyens techniques et économiques acceptables sont estimées à environ 18 milliards de m³/an (soit seulement environ 13 % des précipitations annuelles moyennes), réparties en 14 milliards de m³/an d'eau superficielle et 4 milliards de m³/an d'eau souterraine.

Les travaux de recherche effectués prévoient une augmentation des températures moyennes du Maroc comprises entre 2.2 et 2.6 °C et une baisse moyenne des précipitations comprise entre 9 et 12 % à l'horizon 2050. Ces changements climatiques probables se traduiraient par une baisse des ressources en eau du pays variant entre environ 13 et 19 % selon les régions, avec une baisse moyenne d'environ 15.8 % (à l'horizon 2050).

Cette baisse risque d'aggraver le stress hydrique du pays, d'accentuer la baisse des débits des cours d'eau et des apports aux barrages, ainsi que l'approfondissement des niveaux des nappes d'eau souterraine. Ces baisses auront pour corollaire, une accentuation de l'avancée du biseau salé au niveau des nappes côtières, un tarissement d'un grand nombre de sources, une salinisation des nappes peu profondes (par l'augmentation de l'évaporation de leurs eaux) et des sols, une augmentation du coût des prélèvements d'eau dans les puits et forages, etc.

Des mesures d'adaptation s'imposent pour atténuer les effets néfastes de ces changements climatiques sur les ressources en eau et l'environnement du Maroc.

INTRODUCTION

D'après le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) « Le climat désigne généralement le "temps moyen". Il s'agit plus précisément d'une description statistique du temps en termes de moyennes et de variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes de plusieurs décennies (trois décennies en principe, d'après la définition de l'OMM). Ce sont le plus souvent des variables de surface; température, précipitations et vent » (GIEC, 1995).

La terre reçoit la majeure partie de son énergie du soleil, une partie est absorbée par la terre et une autre est renvoyée sous forme de rayonnement infrarouge. Ce dernier est en partie intercepté par les gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre et le reste est renvoyé vers l'espace.

Ainsi, la vapeur d'eau, le méthane, le dioxyde de carbone, le protoxyde d'azote et l'ozone notamment, qui sont des gaz à effet de serre (GES) majeurs, contribuent à piéger l'énergie renvoyée, augmentant ainsi la température moyenne de la terre. En effet, ce sont les gaz à structure polyatomique (constitués d'au moins trois atomes) qui retiennent le rayonnement infrarouge, contrairement aux molécules diatomiques (99% de l'atmosphère) qui ont une structure trop simple.

L'objet de cette communication est de :

- mettre évidence les changements intervenus dans le climat du globe et du Maroc pendant le dernier siècle et leurs origines ;
- présenter les résultats des les projections climatiques futures au niveau planétaire et à l'échelle du Maroc et leurs conséquences probables sur l'environnement,

1. Centre d'Études et de Recherches sur les Ressources en Eau (CERHYDREAU). Ecole Hassania des Travaux Publics. Casablanca. Maroc.

Contact : Professeur Mohamed Sinan. GSM : 0 661 400 335. Mail : sinan_mohamed@yahoo.fr

notamment sur les ressources en eau superficielles et souterraines, niveau marin, etc.

1. CHANGEMENTS CLIMATIQUES PLANÉTAIRES: CAUSES ET CONSÉQUENCES

1.1. Changements observés dans le climat des dernières décennies et quelques conséquences importantes²

Onze des douze dernières années (1995-2006) figurent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850. La variation moyenne sur cent ans (1906-2005) est de + 0,74°C [0,56 à 0,92].

Les températures moyennes de l'hémisphère nord pendant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle ont été très probablement plus élevées qu'au cours de n'importe quelle autre période de 50 ans au cours des 500 dernières années et probablement les plus élevées des 1300 dernières années au moins.

Il est très probable qu'au cours des 50 dernières années, les jours froids, les nuits froides et les gelées sont devenus moins fréquents sur la plupart des terres émergées et que les jours chauds et les nuits chaudes sont devenus plus fréquents.

Il est probable que les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes sur la plupart des terres émergées, que la fréquence des événements de fortes précipitations a

augmenté sur la plupart des surfaces et que depuis 1975, la fréquence des valeurs extrêmement élevées du niveau de la mer s'est accrue partout dans le monde.

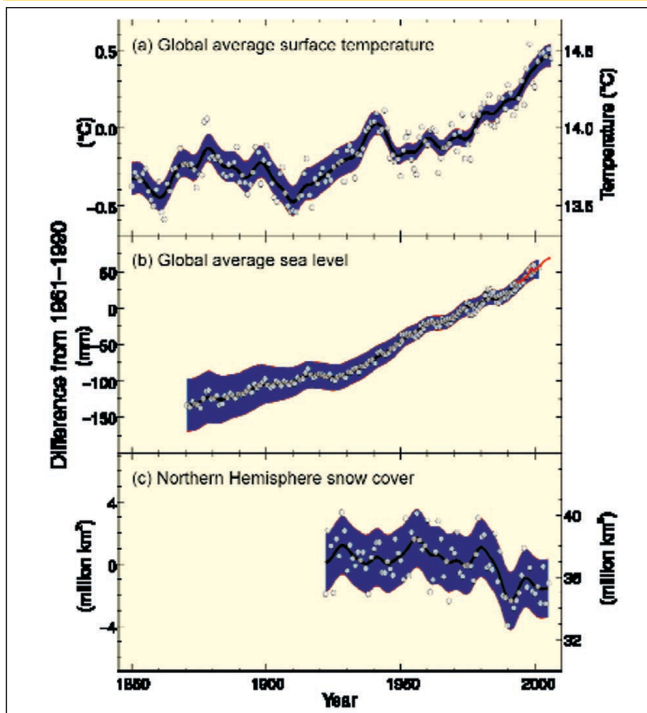
Les données des satellites montrent que, depuis 1978, l'étendue de la banquise (glace) arctique a reculé de 2,7% par an en moyenne [2,1 à 3,3], avec une diminution plus marquée en été de 7,4% [5,0 à 9,8] par décennie. D'après le PNUE (programme des Nations Unis pour l'environnement), les glaces de l'océan arctique ont perdu 40 % de leur volume durant les quatre dernières décennies.

Les augmentations des températures sont largement répandues sur l'ensemble du globe et sont plus élevées aux latitudes les plus septentrionales. Les terres émergées se sont réchauffées plus rapidement que les océans (Fig. 1).

Une chercheuse américaine de l'Université d'Alaska (Katey Walter) a constaté que les lacs de Sibérie sont cinq fois plus importants que lors des mesures effectuées en 2006, une accélération de la fonte sans précédent, ce qui laisse présager de graves conséquences à l'échelle globale.

Le niveau de la mer a augmenté depuis 1961 à une vitesse moyenne de 1,8 mm/an [1,3 à 2,3] et depuis 1993 de 3,1 mm/an [2,4 à 3,8], à cause de la dilatation thermique et en raison de la fonte des glaciers, des inlandsis et des calottes glaciaires polaires.

Figure 1: Changements observés dans la température, le niveau de la mer et la couverture neigeuse au niveau planétaire



- (a) Changements observés dans la température de surface en moyenne mondiale
- (b) le niveau moyen mondial de la mer à partir de données provenant de marégraphes (bleu) et de satellites (rouge)
- (c) la couverture neigeuse de l'hémisphère nord en mars et avril.

Tous les changements sont relatifs aux moyennes correspondantes pour la période 1961-1990.

Les courbes lissées représentent les valeurs moyennées sur une décennie, tandis que les cercles indiquent les valeurs annuelles.

Les zones ombrées sont les fourchettes d'incertitude estimées à partir d'une analyse exhaustive des incertitudes connues (a et b) et des séries temporelles (c).

2. Ce paragraphe constitue un résumé du 4^{ème} rapport du GIEC, paru en décembre 2007 et un extrait de quelques publications scientifiques.

Les précipitations ont diminué de 1900 à 2005 au Sahel, dans le bassin méditerranéen, en Afrique australe et sur une partie du sud de l'Asie et ont augmenté de façon significative dans les parties orientales de l'Amérique du Nord et du Sud, au nord de l'Europe, au nord et au centre de l'Asie.

Les observations mettent en évidence un accroissement de l'activité des cyclones tropicaux intenses dans l'Atlantique nord depuis 1970.

1.2. Causes des changements climatiques

Depuis la révolution industrielle, les pays développés ont produit des quantités croissantes de gaz à effet de serre en brûlant des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel pour les besoins de leur développement socio-économique. Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) dues aux activités humaines ont augmenté depuis la période préindustrielle, avec une hausse de 70 % entre 1970 et 2004.

Le dioxyde de carbone (CO₂) est le plus important des GES anthropiques. Ses émissions annuelles ont cru d'environ 80 % entre 1970 et 2004. Les concentrations atmosphériques de CO₂ (379 ppm) et de CH₄ (1.774 ppb) en 2005 excèdent largement la plage des variations naturelles au cours des 650.000 dernières années.

Le New Scientist annonce que 100 milliards de tonnes de carbone pourraient être relâchées du pergélisol lors du prochain siècle. Si cela se produisait sous forme de méthane, l'effet serait équivalent à 270 ans d'émission de CO₂, soit un véritable emballement du processus climatique.

1.3. Projections futures des changements climatiques

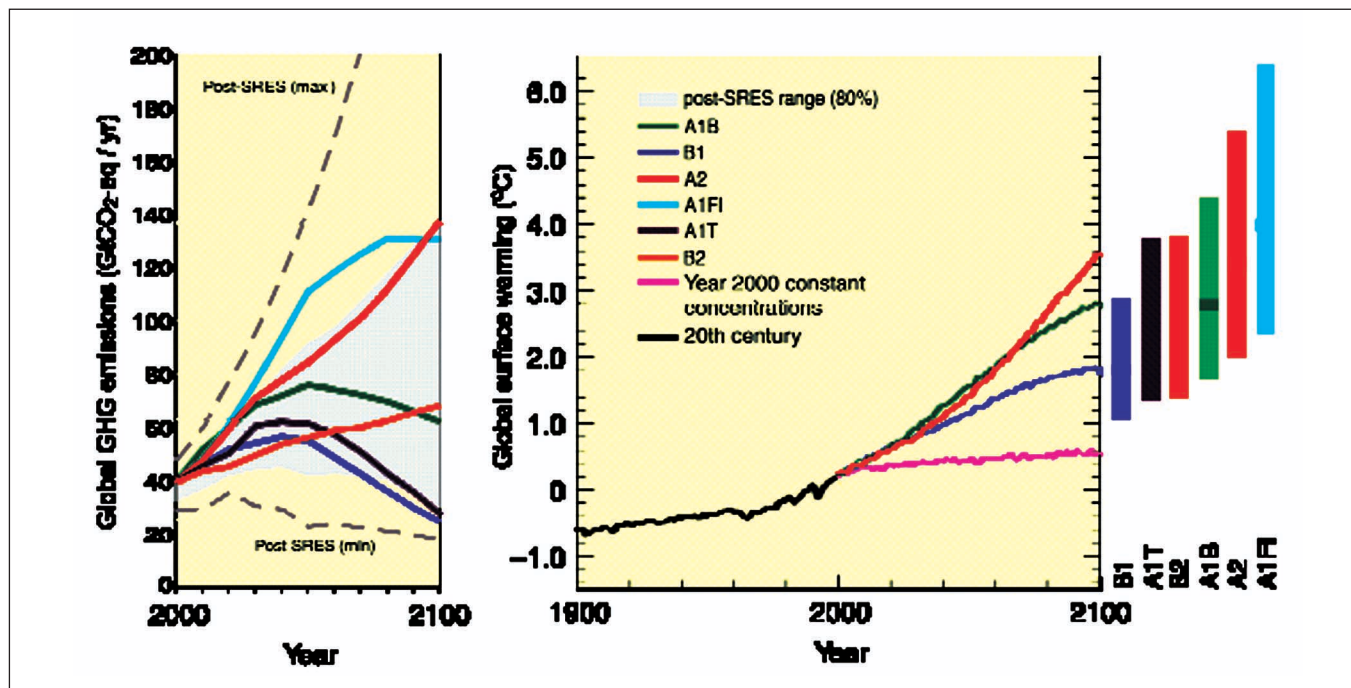
Malgré les politiques actuelles d'atténuation du changement climatique les émissions mondiales de GES vont continuer de croître dans les toutes prochaines décennies.

Les projections du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (RSSE, 2000) présentent un accroissement des émissions mondiales de GES de 25-90% (CO₂-éq) entre 2000 et 2030 (Fig.2), avec un maintien de la position dominante des combustibles fossiles dans le bouquet énergétique mondial jusqu'en 2030 et au-delà.

Les différentes projections (résultats des modélisations) effectuées à l'échelle planétaire à la fin du 21^{ème} siècle ont montré :

- un réchauffement plus important sur les terres émergées (généralement supérieur à 3°C) et en général pour les latitudes septentrionales, et moins important pour l'océan de l'hémisphère sud (généralement inférieur à 2°C) et sur certaines parties de l'Atlantique nord ;
- une hausse très probable de la fréquence des températures élevées, des vagues de chaleur et des précipitations intenses ;
- des augmentations très probables des précipitations aux hautes latitudes et des diminutions probables dans la plupart des terres émergées subtropicales, en continuité avec les tendances récentes observées ;
- de nombreuses zones semi-arides (par exemple le bassin méditerranéen, l'ouest des Etats-Unis, l'Afrique australe et le nord-est du Brésil) vont souffrir d'une diminution des ressources en eau;

Figure 2: Scénarios d'émission de GES de 2000 à 2100 (en l'absence de politiques climatiques supplémentaires) et projections des températures de surface



- un accroissement probable de l'intensité des cyclones tropicaux ;
- la contraction de la calotte glaciaire du Groenland continuera à contribuer à la montée du niveau de la mer après 2100. Les modèles actuels suggèrent une élimination complète potentielle de la calotte glaciaire de Groenland avec pour résultat une contribution à la montée du niveau de la mer de 7 m environ, si le réchauffement mondial moyen devait se maintenir pendant des millénaires à des valeurs supérieures de 1,9 à 4,6°C aux valeurs préindustrielles ;
- le réchauffement et la montée du niveau de la mer se poursuivraient pendant des siècles à cause des constantes de temps associées aux processus climatiques et aux rétroactions, même si les concentrations de GES devaient être stabilisées.

Panneau de gauche : Emissions mondiales de GES (en CO₂-éq) en l'absence de politiques climatiques supplémentaires : six scénarios marqueurs du RSSE (lignes colorées) et la gamme du 80ème percentile des scénarios récents, publiés depuis le RSSE (post-RSSE) (zone grisée). Les lignes avec des tirets montrent la gamme complète des scénarios post-RSSE. Les émissions comprennent le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés.

Panneau de droite : les lignes continues représentent la moyenne, sur de nombreux modèles, du réchauffement mondial pour les scénarios du RSSE A2, A1B et B1, en continuité avec les simulations du 20ème siècle. Ces projections prennent aussi en compte les émissions de GES à courte durée de vie et les aérosols.

Toutes les températures sont relatives à la moyenne de la période 1980-1999.

2. CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC ET SES CONSEQUENCES SUR LE CLIMAT ET LES RESSOURCES EN EAU

Les études sur les changements climatiques au Maroc et ses conséquences sont peu nombreuses et ont commencé il y'a environ une dizaine d'années au maximum. On cite notamment :

- la communication nationale initiale du Maroc, réalisée par le Département de l'Environnement en 2000, en collaboration avec l'Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP). L'impact des changements climatiques sur les ressources en eau a été traité par l'auteur de la présente communication;
- la thèse de Senoussi en 2000, relative à la variabilité climatique et ressources en eau du bassin versant de l'oued Ouergha ;
- le Projet de Fin d'Etudes de MM. Rherrari et Boussetta réalisé en 2006, relatif à l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de trois bassins du Maroc. Ce travail a été réalisé au Centre d'Etudes et de Recherches en Ressources en Eau (CERHYDREAU) de l'EHTP et encadré par l'auteur

de la présente communication;

- quelques travaux réalisés par la DMN (M.Mokssit) et la DGH dans le cadre du projet RAB/94/G31.

Dans la présente communication, nous allons synthétiser les principaux résultats obtenus par ces différentes études.

2.1. Principaux résultats de la Communication Nationale initiale du Maroc réalisée en 2001 par le Département de l'Environnement en collaboration avec l'EHTP

2.1.1. Impact sur le Climat

L'étude des projections climatiques pour le Maroc (effectuée sur un maillage de 5 x 5 degrés) corrobore les tendances au réchauffement et à l'aridité du climat marocain pendant les trente dernières années. L'étude a utilisé le modèle MAGICC/SCENGEN de l'IPCC. Le scénario d'émission adopté est le IS92a de l'IPCC avec une sensibilité moyenne du climat.

Les principaux résultats obtenus (à l'horizon 2020) sont résumés ci-dessous (Jalil. 2001) :

- les changements des températures présentent une très grande homogénéité et affichent toujours le même ordre de grandeur s'inscrivant dans la plage allant de 0,6° à 1,1°C en moyenne;
- les changements probables des hauteurs des précipitations présentent au contraire de grandes disparités, tant qualitativement (sécheresse ou humidité) que quantitativement (amplitude du changement). Cependant la plupart des modèles privilégient des tendances à la sécheresse avec des plages de taux de réduction (par rapport à la fin du 20ème siècle) allant de -7% à 0 %, avec une moyenne nationale de -4%;
- le dérèglement du signal saisonnier des précipitations avec probablement des précipitations d'hiver qui auraient tendance à être moins persistantes et un nombre moyen de jours pluvieux qui aurait tendance à diminuer ;
- l'augmentation probable des fréquences et de l'intensité des sécheresses, avec une tendance à l'aggravation sur les régions situées au Sud et à l'Est du Maroc ;
- l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des orages frontaux. Les régions les plus touchées s'étendraient sur l'ensemble de la partie Nord du Maroc, à l'Est de la chaîne atlasique. Les flancs du Moyen et Haut Atlas constituent des zones particulièrement vulnérables de ce point de vue.
- la diminution des apports en enneigement en corrélation avec la diminution des apports pluviométriques en général et retrait du manteau neigeux suite à la migration vers des altitudes élevées de l'isotherme zéro et accélération des fontes des neiges.
- l'élévation moyenne du niveau de la mer (par rapport

à 1990), due aux effets conjugués de l'expansion thermique et de la fonte des calottes polaires, se situerait entre 2,6 et 15,6 cm.

2.1.2. Impact sur les ressources en eau

Méthodologie adoptée et paramètres climatiques :

Cette évaluation a été basée sur l'extrapolation des résultats de deux études effectuées sur deux bassins différents du Maroc, l'un est situé au centre nord (bassin de l'oued Ouergha) et l'autre au centre sud (bassin du Tensift).

Pour le bassin de l'oued Ouergha, la simulation à l'horizon 2020, a été faite à l'aide d'un modèle hydrologique global, utilisant des données journalières des précipitations et des températures (Senoussi, 2000). Le modèle a été calé à partir de ces données et des débits de l'oued Ouergha, correspondant à la période 1979-1985. Il a ensuite été validé à l'aide des données

enregistrées pendant la période 1986-1993.

Pour le deuxième bassin (Tensift), la méthode utilisée est basée sur l'établissement d'une régression entre les débits des écoulements superficiels et les précipitations parvenues à la surface du bassin de l'oued N'Fis, affluent central et important de l'oued Tensift.

La figures 3 et 4 suivantes montrent clairement les baisses des écoulements de l'oued N'Fis pendant les dernières années, l'approfondissement des niveaux de la nappe (conséquence de la baisse de sa recharge et de sa surexploitation) et la baisse de son drainage par des drains artificiels (khetaras).

La figure 5 suivante montre la droite de régression établie entre les variations des débits des écoulements de l'oued N'Fis et les précipitations tombées dans son bassin versant.

Les deux études ci-dessus ont permis d'évaluer une baisse

Figure 3: Historique des débits de l'oued N'Fis (affluent central de l'oued Tensift)

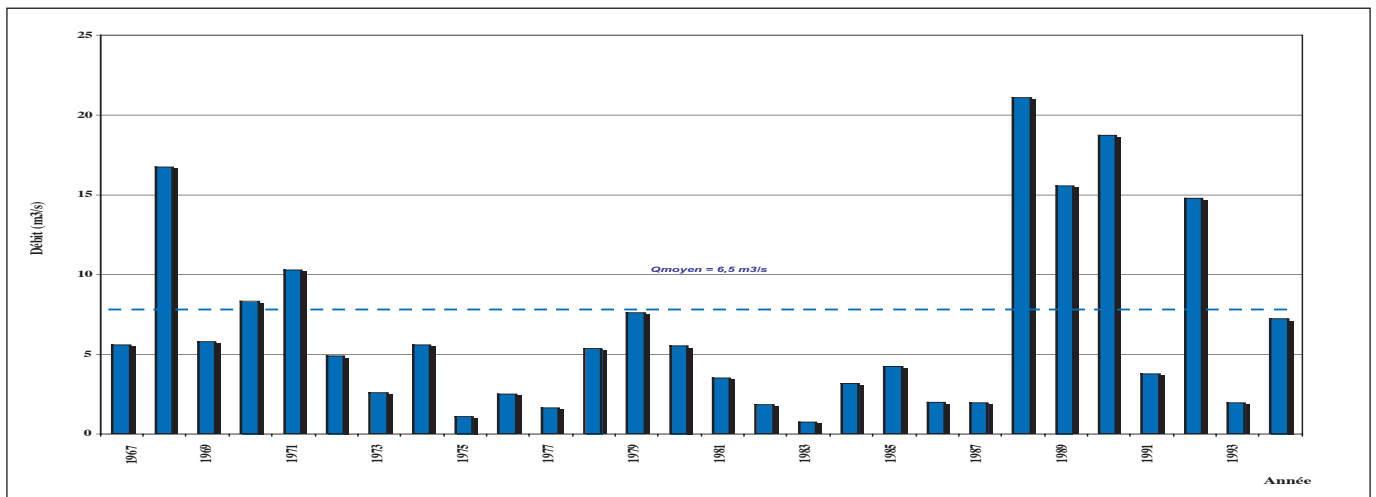
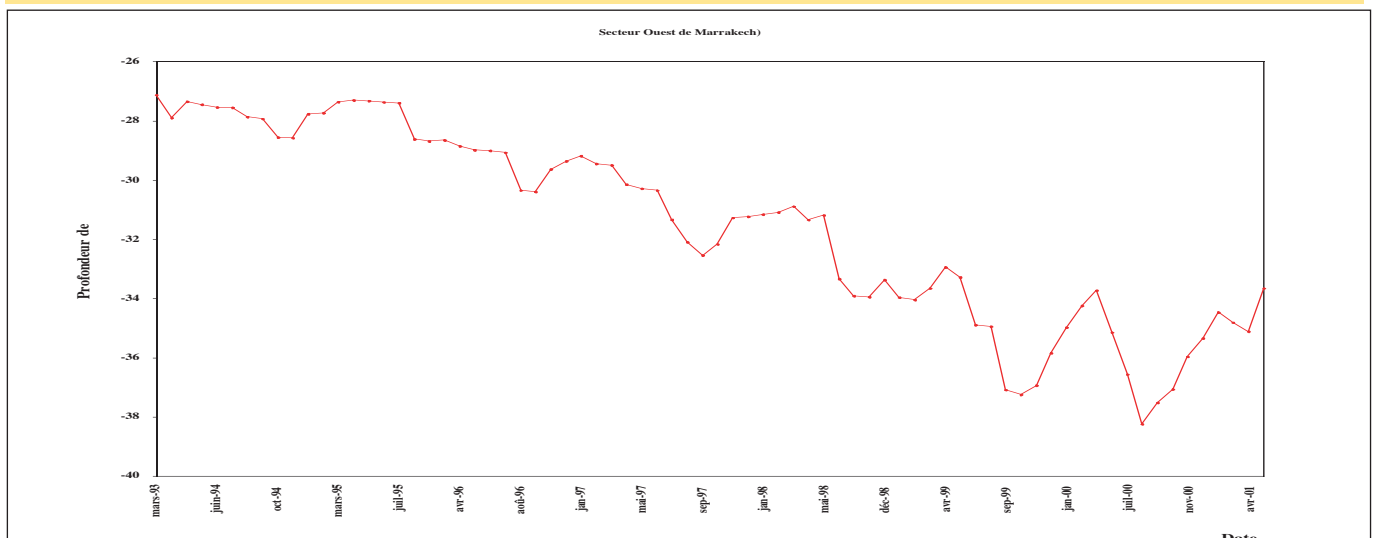


Figure 4: Historique piézométrique de la nappe du Haouz de Marrakech (bassin de Tensift)



moyenne des ressources en eau d'environ 15 % à l'horizon 2020, par rapport au bilan de la période 1998-2000.

En adoptant cette baisse à l'ensemble du pays, l'impact des changements climatiques à l'horizon 2020 se traduirait par une baisse des ressources en eau renouvelables de 4.5 milliards de m³/an et de 3 milliards de m³/an pour les ressources mobilisables (répartis en 2.4 milliards de m³/an de ressources superficielles et 0.6 milliards d'eau souterraines).

Le capital eau/habitant serait de 682 m³/hab/an à l'horizon 2020 au lieu de 775 m³/hab/an en absence de changements climatiques.

2.2. Principaux résultats de l'étude de 2006 réalisée au Centre d'Etudes et de Recherches en Ressources en Eau (CERHYDREAU) de l'EHTP dans le cadre du Projet de Fin d'Etudes de MM. Rherrari et Boussetta.

2.2.1. Bassins considérés

Cette étude s'est basée sur les données de trois bassins hydrologiques situés dans des régions hydro-climatiques différentes. Ce sont les bassins de (Fig. 6) :

- Moulouya représenté par le barrage Mohamed V situé au nord-est ;
- Sebou, représenté par les données du barrage Idriss 1er situé au centre ;
- Ziz - Rhriss, représenté par le barrage Hassan Adakhil situé au sud-est.

2.2.2. Paramètres hydro-climatiques des dernières décennies

Un exemple d'analyses effectuées sur les paramètres hydro-climatiques des bassins étudiés est donné ci-dessous et concerne le bassin de Ziz-Rhriss. Les figures suivantes (Fig. 7, 8 et 9) montrent clairement la tendance à l'augmentation des températures, notamment depuis le début de 1980, ainsi que la baisse significative des précipitations et des débits des écoulements superficiels dans le bassin.

Figure 6: Situation des bassins versants considérés

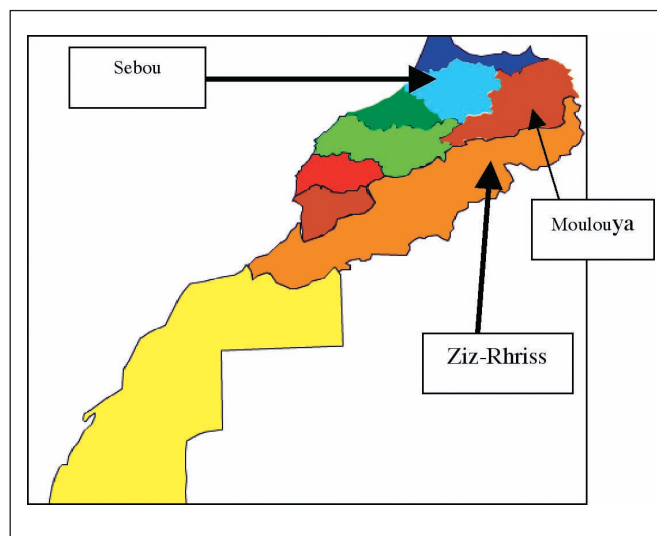


Figure 5 : Droite de régression entre les variations des débits de l'oued N'Fis et celles des précipitations

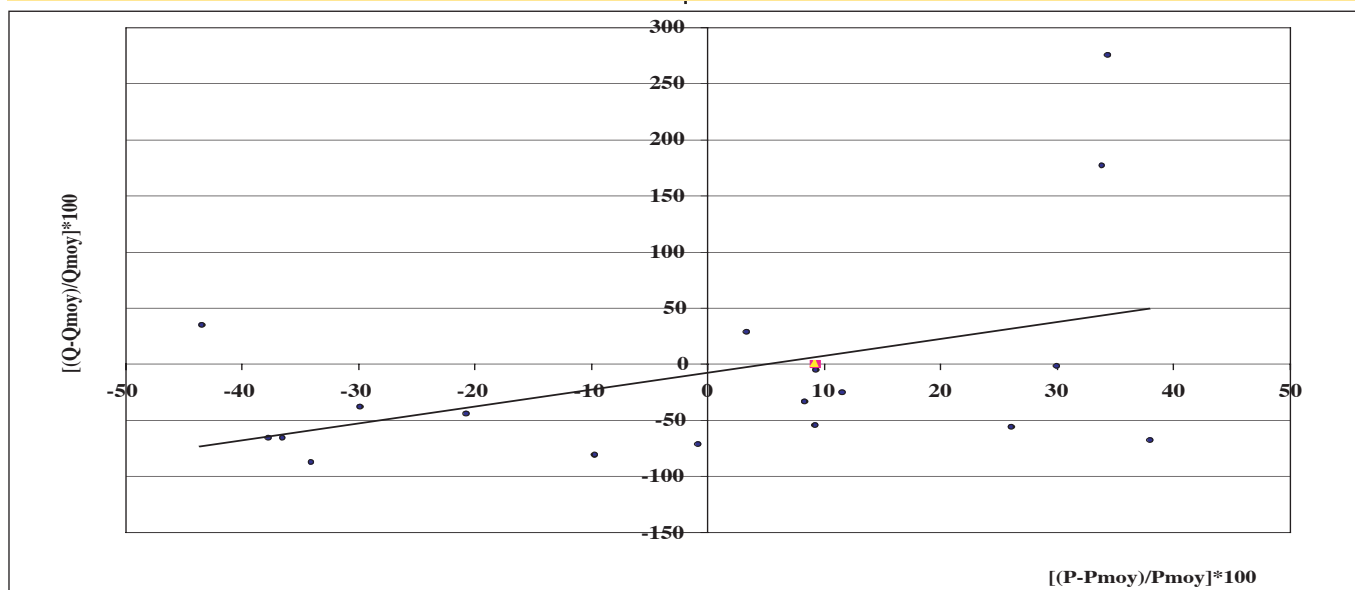


Figure 7 : Historique des variations de température par rapport à la moyenne des températures du bassin de Ziz-Rhriss

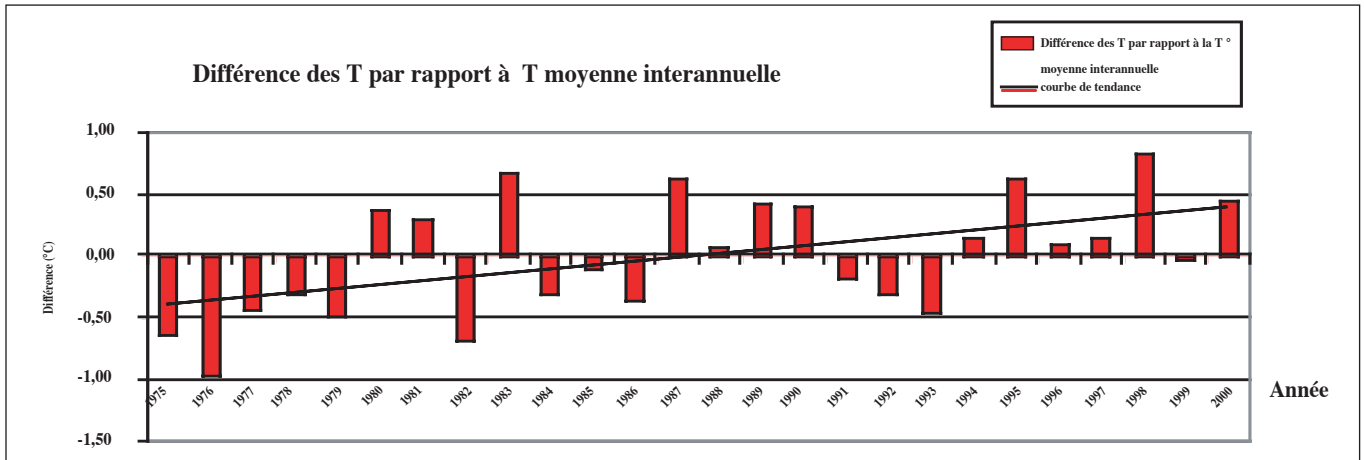


Figure 8 : Historique des variations des précipitations par rapport à la moyenne des précipitations annuelles du bassin de Ziz-Rhriss

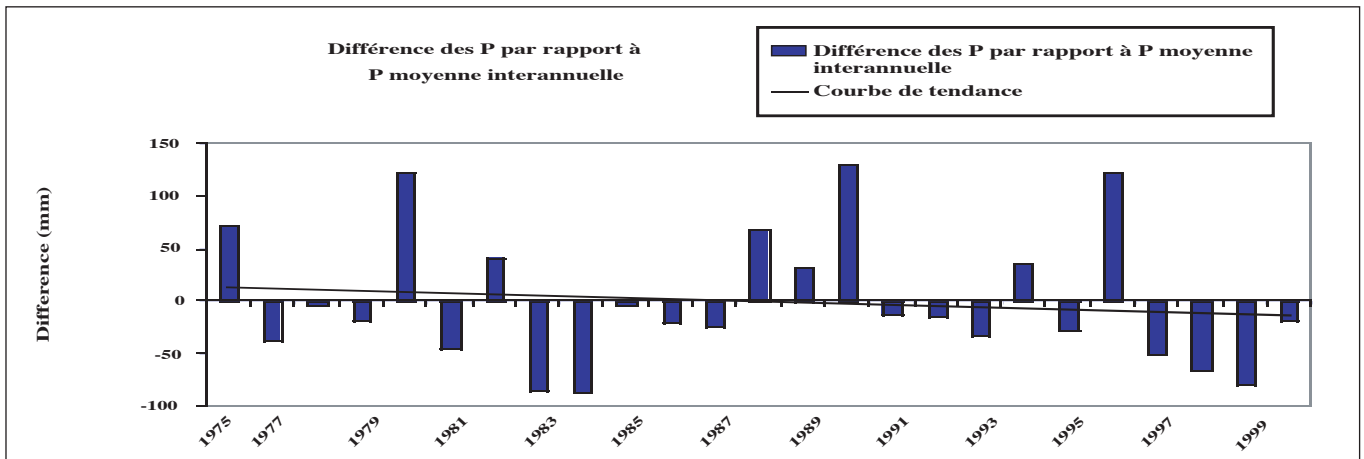
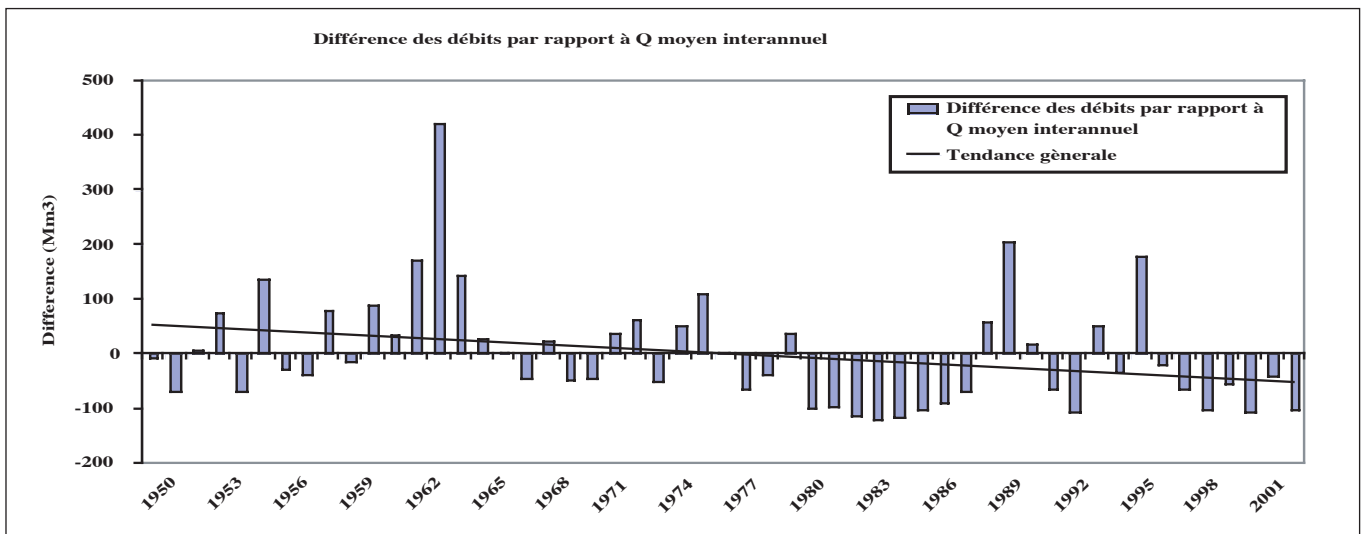


Figure 9 : Historique des variations des apports d'eau du barrage Hassan Addakhil



2.2.3. Méthodologie utilisée et principaux résultats obtenus

La même méthodologie que celle appliquée dans le bassin du Tensift a été adoptée pour l'étude de l'impact des changements climatiques sur ces trois bassins à l'horizon 2050.

La figure 10 suivante montre une nette corrélation entre les débits des apports d'eau au barrage et les précipitations tombées dans son bassin versant.

Les principaux résultats des différentes projections effectuées au niveau des trois bassins sont résumés dans les tableaux 1 et 2 ci-dessous.

Ces résultats corroborent ceux obtenus par les travaux réalisés dans le cadre de la Communication Nationale

Initiale du Maroc, qui ont permis de projeter une baisse des ressources en eau du pays d'environ 15 % à l'horizon 2020. Malgré cette différence d'horizon, les différentes analyses effectuées sembleraient indiquer que la baisse des ressources en eau du pays serait comprise très probablement entre 15 et 20% à l'horizon 2050. Ces baisses devraient ramener le capital eau (à l'horizon 2050) probablement à des modules d'environ 500 m³/an/habitant.

2.3. Mesures d'atténuation des impacts négatifs des changements climatiques sur les ressources en eau

Les mesures d'adaptation et d'atténuation et d'adaptation aux impacts négatifs des changements climatiques sur les ressources en eau du Maroc, concernent notamment :

Figure 10 : Droite de régression entre les variations du débit et celles des précipitations dans le bassin du barrage Hassan Adakhil

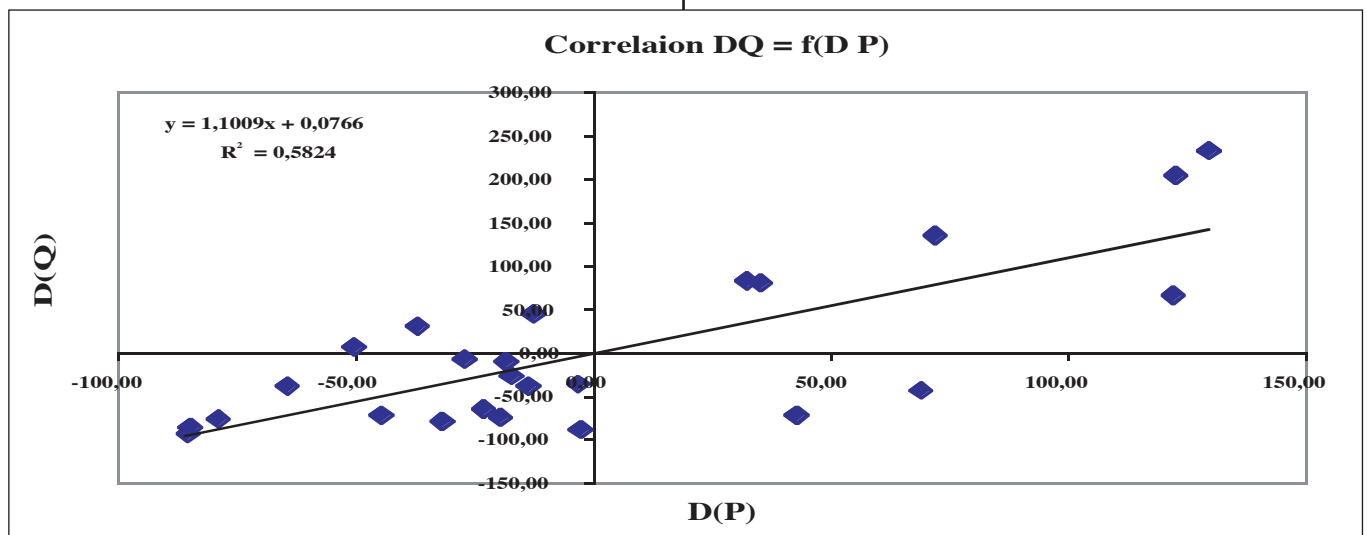


Tableau 1 : Résultats des projections climatiques à l'horizon 2050

Barrage/Bassin	Augmentation de la température en °C	Baisse des précipitations
Br. Hassan Addakhil/Bs. Ziz-Rhéris	+ 2.2.	- 9.3 %
Br. Mohamed V/Bs.Moulouya	+ 2.6.	- 11.05 %
Br. Idriss 1er/Bs. Sebou	+ 2.2.	- 12.05 %
	Moy. = 2.33 °C	Moy. - 10.08 %

Tableau 2 : Impact des changements climatiques sur les ressources en eau des bassins à l'horizon 2050

Barrage/Bassin	Débit actuel en Mm ³ /an	Débit projeté à l'horizon 2050 Mm ³ /an	Déficit du débit en Mm ³ /an	Déficit en %
Br. Hassan Addakhil/Bs. Ziz-Rhriss	100.4	86.8	- 13.6	13.5
Br. Mohamed V/Bs.Moulouya	147.9	126.4	- 21.5	14.6
Br. Idriss 1er/Bs. Sebou	565.3	456.9	- 108.4	19.2
				15.8 %

• Poursuite et accélération de l'effort de mobilisation des eaux conventionnelles

Cette mobilisation devra concerner à la fois :

- les eaux superficielles, par la réalisation de nouveaux barrages (pour régulariser toutes les ressources en eau encore mobilisables) et des transferts d'eau (entre bassins excédentaires et déficitaires) recommandés par les différents plans directeurs ;
- les eaux souterraines, notamment celles des aquifères profonds non encore exploités.

• Maintien et préservation de l'infrastructure hydraulique existante

L'envasement des retenues des barrages constitue un problème majeur au Maroc. En effet, la capacité de stockage perdue par an est évaluée à environ 50 millions de m³ (Jellali. 1999), soit l'équivalent de la capacité d'un barrage moyen par an.

• Utilisation des ressources en eau non conventionnelles

- Réutilisation des eaux usées épurées: Le volume des eaux usées produit atteindra environ 1 milliard de m³/an à l'horizon 2020 (CSEC. 2001). La restauration de la qualité de ces eaux permettra de dégager des nouvelles ressources (estimées à 500 millions de m³/an à l'horizon 2020) (Jellali. 1999).
- Dessalement de l'eau de mer: Le Maroc compte environ 3500 km de côte. Le dessalement de l'eau de mer (déjà pratiqué actuellement dans le sud du pays) pourrait constituer une solution définitive au problème d'alimentation en eau potable des grandes agglomérations (notamment celles situées dans des bassins déficitaires, cas de Souss) du pays situées à proximité du littoral.
- Utilisation des eaux saumâtres: Les eaux saumâtres (superficielles et souterraines) constituent des ressources non négligeables, pouvant être déminéralisées pour leur utilisation dans l'agriculture et pour la satisfaction des besoins en eau potables et industriels des régions qui les contiennent.

• Economie des ressources en eau conventionnelle mobilisée

- Economie de l'Eau potable: Le rendement du réseau de distribution de l'eau potable est parfois inférieur à 70% dans certaines villes et centres urbains du pays. Cette situation génère d'importantes pertes d'eau évaluées en 1998 à environ 185 millions de m³/an, soit environ 37% du volume d'eau potable produit (CSEC, 2001). L'amélioration du rendement des réseaux de distribution d'AEP à un niveau de 80% permettra de faire une économie d'eau, évaluée à environ 200 millions de m³/an (CSEC. 2001).
- Economie de l'eau agricole: Les pertes d'eau dans le secteur agricole sont évaluées à environ 890 millions de m³/an à la fin du 20^{ème} siècle et à 1100 millions de m³/an à court terme (CSEC. 2001).

Références Bibliographiques

- Boussetta, M. ; EL Rherari, R. 2006. Etude de l'Impact des Changements Climatiques sur les ressources en Eau du Maroc. TFE.EHTP .
- CSEC, 9^{ème} session. 2001. Plan directeur pour le développement des ressources en eau des bassins du Tensift.
- DRPE. 1989. Etude du Plan Directeur Intégré d'Aménagement des Eaux des Bassins du Sebou, Bouregreg, Oum Er Bia et Tensift. Sous mission ID: Bilan Ressources-Besoins et scénarios de développement.
- IPCC. 2007. Le 4^{ème} rapport d'évaluation du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.GIEC/IPCC.
- IPCC. 2001. Le 3^{ème} rapport d'évaluation du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.GIEC/IPCC.
- Jalil, M. 2001. Vulnérabilité du Royaume du Maroc face aux impacts des changements climatiques : Premier diagnostic. Impact sur le climat. Ecole Hassania des Travaux Publics et Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement.
- Jellali, M. 1999. La gestion de l'eau au Maroc. Revue des Mines (France) N° 380. Spécial Maroc.
- Mokssit, A., Benbiba A., Ouldbba A., Benabdelfadel A.,Bensaid, F. 1998. Changements climatiques et ressources en eau au Maroc. Projet Maghrebin sur les changements climatiques. Projet RAB/94/G31, PNUD/FEM.
- Senoussi, S. 2000. Variabilité climatique et ressources en eau: cas du bassin versant de l'Ouergha. Thèse de doctorat. Univ. Hassan II, Casablanca, Maroc.
- Sinan, M., Jalil, M. 2004. Impact des changements climatiques sur le climat et les ressources en eau du Maroc. 57^{ème} Congrès canadien de géotechnique et le 5^{ème} Congrès conjoint SCG/AIH sur les eaux souterraines: La géo-ingénierie pour la société et son environnement (24 au 27 octobre 2004), Québec, Canada.
- Sinan, M. 2001. Vulnérabilité du Royaume du Maroc face aux impacts des changements climatiques : Premier diagnostic. Impact sur les ressources en eau. Ecole Hassania des Travaux Publics et Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement.

Ces pertes sont dues essentiellement aux modes d'irrigation pratiqués, constitués notamment par le système gravitaire (83%). La généralisation des techniques économes d'eau (goutte à goutte) permettra de faire une économie substantielle de l'eau estimée à environ 1 milliard de m³/an (CSEC. 2001).

Une adaptation des types de culture, aux ressources en eau projetée du pays, devra être également préconisée au niveau de chaque région du Maroc.

- Economie de l'eau industrielle: La quantité d'eau utilisée dans le secteur industriel est évaluée à environ 1 milliard de m³/an, répartie en 877 millions de m³/an d'eau de mer et 210 millions de m³/an d'eau douce (89% de ce volume est rejeté dans la nature sous forme d'eau usée brute) (CSEC. 2001). La quantité d'eau douce utilisée représente environ 40% du volume d'eau utilisé dans le milieu urbain. Par comparaison aux expériences internationales en matière d'économie d'eau dans le secteur industriel, ce taux est considéré comme très élevé et pourra être réduit de façon significative en procédant au recyclage de l'eau, à l'utilisation des eaux saumâtres...

• Gestion intégrée des ressources en eau

Cette gestion a pour objectif d'optimiser le stockage et l'exploitation des ressources en eau dans un bassin donné. En effet les eaux des crues (des cours d'eau) et celles déversées par les barrages devront être utilisées pour recharger (artificiellement) les nappes déficitaires et pour augmenter leurs réserves. Ces dernières serviront à la satisfaction des besoins en eau dans le bassin pendant les périodes déficitaires (étiage, sécheresse prolongée...).

Cette pratique est déjà utilisée dans certaines régions du Maroc, notamment au niveau des complexes de Charf El Akab (région de Tanger au Nord) et d'Aoulouz (région d'Agadir au centre).

• Protection des ressources en eau contre la pollution

Les ressources en eau du Maroc, notamment souterraines, sont souvent menacées de pollution par le rejet des eaux brutes domestiques et industrielles, par l'infiltration (ou le ruissellement) des lixiviats au niveau des décharges brutes et par la percolation des eaux chargées en nitrates au niveau des périmètres irrigués. La dépollution des aquifères est une opération très coûteuse parfois même presque impossible (cas de pollution généralisée sous les périmètres irrigués).

La vulnérabilité et la sensibilité de ces ressources en eau devront être caractérisées sous forme cartographique. Ces documents devront être pris en compte dans tout projet d'aménagement du territoire (choix des sites des zones industrielles, de décharges domestiques et de produits toxiques, exploitation de carrières...).

Les différents déchets (domestiques, industrielles, hospitaliers...) devront être enfouis dans des décharges contrôlées ou incinérées pour éviter que les lixiviats

ruissellent (vers les cours d'eau superficielle) et/ou percolent (vers les nappes) et contaminer les ressources en eau.

• Renforcement et application du cadre réglementaire

Ce renforcement devra concerner notamment l'application dans les plus délais de la loi sur l'eau (10-95), notamment ses articles relatifs :

- > à la protection des ouvrages d'AEP par des périmètres de protection;
- > au paiement de redevances (par les différents utilisateurs) pour le débit d'eau prélevé et pour la pollution déversée dans le milieu naturel.

Enfin, pour leur assurer une chance importante de réussite à ces mesures d'adaptation, elles devront être accompagnées nécessairement par un vaste programme de :

- renforcement de capacités scientifiques et techniques du Maroc dans le domaine des changements climatiques et de leurs impacts sur les ressources en eau et l'environnement de façon générale;
- renforcement de la sensibilisation du grand public et des différents usagers sur la précarité des ressources en eau et de leur vulnérabilité à la pollution et les inciter à une plus grande économie de cette denrée vitale et hélas non inépuisable.

Références Bibliographiques

- Sinan, M. 2000. Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Doctorat d'état, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc.
- Senoussi, S., Agoumi, A., Yacoubi, M., Fakhraddine, A., Sayoputy, E.H., Mokssit, A., Chikri, N. 1999. Changements climatiques et ressources en eau. Bassin versant de l'Ouegha (Maroc). Hydroécol. Appl. (1999). Tome 1/2 Vol.

ETAT DES DEVELOPPEMENTS EN MATIERE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER PAR PROCEDES MEMBRANAIRES

P. Corsin¹

Résumé

De nombreux laboratoires privés, universitaires et publics, poursuivent des programmes de recherche ayant pour objectifs l'amélioration des performances des membranes semi-perméables appliquées au dessalement, et en particulier à celui de l'eau de mer qui représente les débouchés commerciaux les plus importants.

Ces recherches ont pour but de développer des membranes d'osmose inverse:

- peu sensibles au colmatage, et en particulier au bio-fouling ;
- résistantes aux oxydants, pour maintenir l'état de propreté des surfaces membranaires ;
- présentant des perméabilités importantes, afin de réduire les consommations en énergie électrique, tout en améliorant, ou tout du moins en conservant, leur taux d'élimination des sels dissous ;
- à longue durée de vie, par amélioration de leur résistance au compactage et à la température.

En plus de ces avancées, il est recherché une amélioration de la mise en oeuvre des membranes afin d'augmenter les surfaces actives, tout en diminuant l'encombrement et le nombre d'éléments à mettre en oeuvre, entraînant des emprises au sol et des liaisons hydrauliques moindres.

Les considérations précédentes concernent essentiellement les procédés classiques mettant en oeuvre l'osmose inverse. Par contre de nouvelles technologies de dessalement, faisant également appel à des membranes semipermeables, voient le jour, à savoir l'osmose directe (Forward Osmosis) et la thermo osmose (Memstill).

Ces deux procédés font appel, en plus de l'énergie électrique, à des énergies thermiques économiques (vapeur perdue, énergie solaire).

Il est aussi signalé le procédé Demwax, en cours de développement avancé, qui consiste à immerger des modules d'osmose inverse directement dans la mer, alimentés par la seule pression hydrostatique. Le facteur de conversion adopté est faible afin de limiter la pression osmotique, et donc la profondeur d'immersion.

Les développements en cours concernent également l'amélioration des rendements des différents composants électromécaniques et, notamment au niveau des systèmes de récupération de l'énergie des concentrats.

1. INTRODUCTION

Bien que les membranes d'osmose inverse en film mince, configurées en éléments spiralés, aient atteint des performances satisfaisantes, de nombreux laboratoires privés, universitaires et publics poursuivent des programmes de recherche en vue d'améliorer leur efficacité et de faciliter leur exploitation.

Dans le cadre du dessalement de l'eau de mer, ces recherches ont pour objectif de développer des membranes semi-perméables :

- peu sensibles au colmatage, et en particulier au bio-fouling ;
- résistantes aux oxydants afin de maintenir l'état de propreté de leur surface ;
- présentant une meilleure perméabilité, afin de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation (réduction

de la consommation en énergie électrique), tout en améliorant, ou tout du moins en conservant, leur taux d'élimination des sels dissous ;

- à durée de vie prolongée, par amélioration de leur résistance au compactage et à la température ;
- aisément nettoyables.

Ces objectifs sont développés dans la première partie de cet exposé, tandis que sont présentées dans une seconde de nouvelles technologies de dessalement de l'eau de mer, faisant également appel à des membranes semi-perméables.

2. AMELIORATIONS ENVISAGEES AU NIVEAU DES MEMBRANES D'OSMOSE INVERSE

En premier lieu il convient de définir les principaux problèmes rencontrés lors de l'exploitation des usines de dessalement d'eau de mer par osmose inverse. Ils sont principalement de trois ordres :

1. Ingénieur Conseil en traitement des eaux – compétences spécifiques en traitements pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, et en dessalement d'eau de mer par osmose inverse. FLUID CONSULT EURL. France.E-mail: pierre.corsin@wanadoo.fr

- colmatage et bio-fouling ;
- résistance chimique ;
- efficacité des nettoyages chimiques.

Ce sont ces constats qui vont orienter en premier lieu la recherche et développement. En parallèle, il est investigué de nouvelles voies pour améliorer leur productivité.

2.1. Résistance des membranes au colmatage et au bio-fouling.

2.1.1 Rappel du mécanisme du colmatage et du bio-fouling

Le colmatage des membranes est provoqué par :

- le dépôt de matières colloïdales ;
- l'adhésion et le développement de micro-organismes (bio-fouling) accéléré par la présence de matières organiques qui constituent leur source d'aliments.

D'où l'importance des prétraitements physico-chimiques de l'eau d'alimentation des éléments membranaires pour réduire au maximum les valeurs des paramètres suivants :

- turbidité ;
- indice de colmatage (Fouling Index) ;
- carbone organique total (COT) ;
- matières biologiques.

Malgré tout il subsistera toujours dans l'eau d'alimentation un résiduel de ces paramètres.

Il est à noter que les colloïdes, les matières organiques, les micro-organismes présentent des charges électrostatiques négatives (potentiel zéta négatif - Pz⁻). Il en va de même pour les membranes. Les mécanismes du colmatage sont illustrés par la figure 1. On constate que les matières à caractère colmatant ont tendance à être repoussées, et à être entraînées par le flux, d'où l'importance de sa vitesse tangentielle.

L'eau d'alimentation, pour éviter l'entartrage par précipitation du carbonate de calcium, est acidifiée pour atteindre un pH de 7 environ. L'acidification entraîne pour les membranes classiques une diminution de leurs charges négatives, et donc une diminution des forces de répulsion.

Ces constats ont orienté les recherches pour rendre les membranes moins sensibles au colmatage et au bio-fouling.

2.1.2 Solutions envisagées pour améliorer la résistance au colmatage des membranes.

Plusieurs solutions sont envisagées :

- Développement de membranes à potentiel zéta neutre, quelque soit la valeur du pH. Ceci est obtenu en remplaçant le résiduel d'acide carboxylique (Pz⁻) par un groupement aminé résiduel à Pz neutre aux valeurs de pH généralement adoptées. Il s'agit de membranes en polyamide-urée.
- Amélioration des caractéristiques surfaciques des membranes. Contrairement aux membranes en acétate de cellulose, les membranes en polyamide ont une surface assez rugueuse, facilitant l'accrochage et le dépôt de matières colmatantes, diminuant les forces de cisaillement du flux tangential et l'efficacité des lavages.
- Ajout d'une quatrième couche constituant le film mince, (cf figure 2) afin de protéger la peau sélective. Cette couche supplémentaire, très hydrophile, présente un potentiel zéta négatif qui va augmenter les forces de répulsion et favoriser l'accrochage sur cette couche plutôt que sur la couche sélective.

Figure 1: Mécanisme du colmatage des membranes.

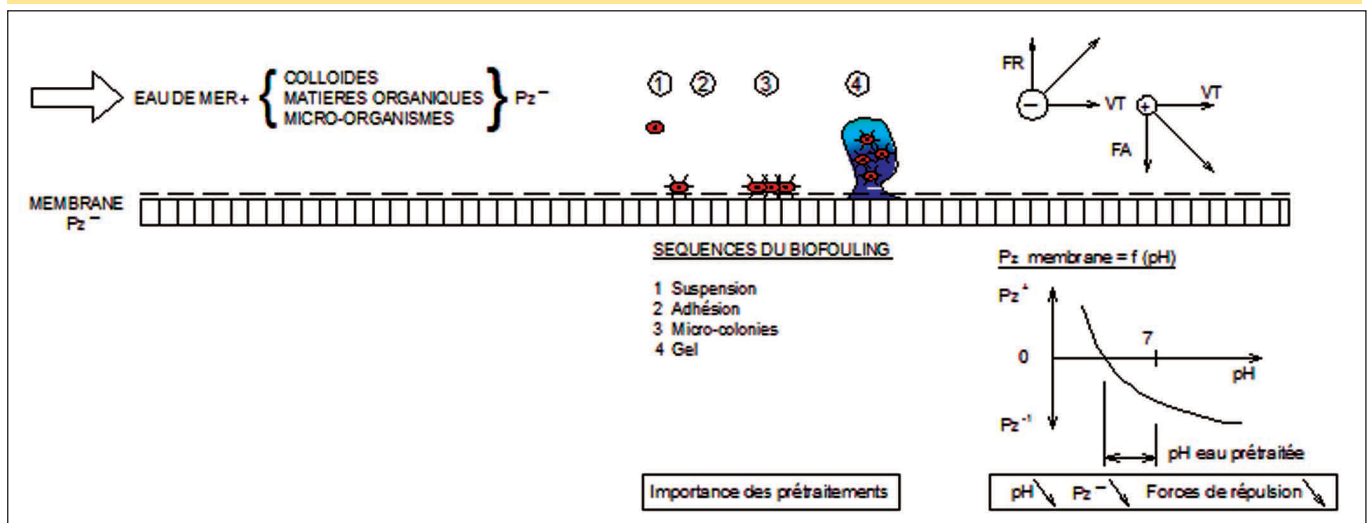
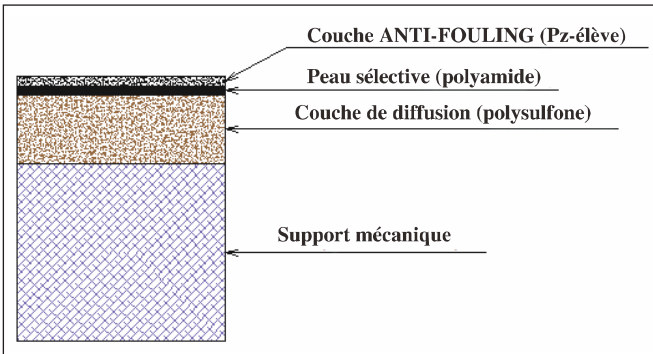


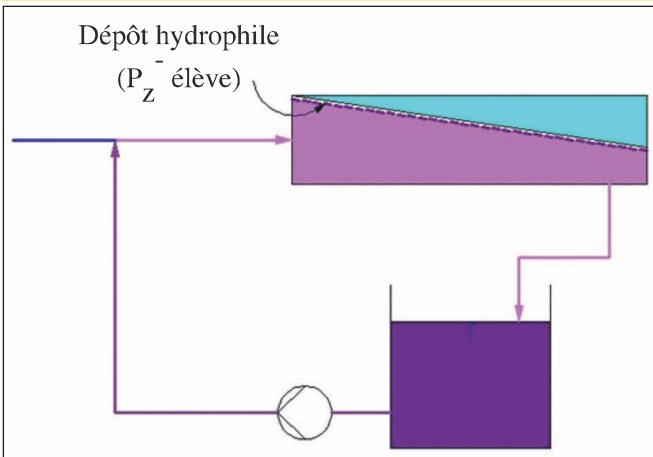
Figure 2 : Coupe d'une membrane possédant une couche anti-fouling.



Il reste à connaître la pérennité de cette couche et son influence sur la pression transmembranaire.

- Dépôt d'une solution de polymère (polydopamine) sur des membranes classiques, à l'aide du poste de nettoyage chimique comme l'indique la figure 3.

Figure 3: Mode de dépôt d'une couche protectrice sur les membranes.



Les promoteurs de cette technologie annoncent les avantages suivants :

- adhésion du biofilm sur le dépôt et non sur la membrane ;
- augmentation du taux de rejet des sels dissous ;
- augmentation de la productivité,

et cela moyennant une légère augmentation de la pression transmembranaire.

L'expérimentation devrait permettre de mesurer la longévité du dépôt dans le temps.

2.2. Augmentation de la productivité des membranes.

La productivité unitaire des éléments spiralés a progressé par :

- augmentation du diamètre des éléments, en passant de 8" à 16", et même 18" ;
- diminution de l'épaisseur des espaces des zones

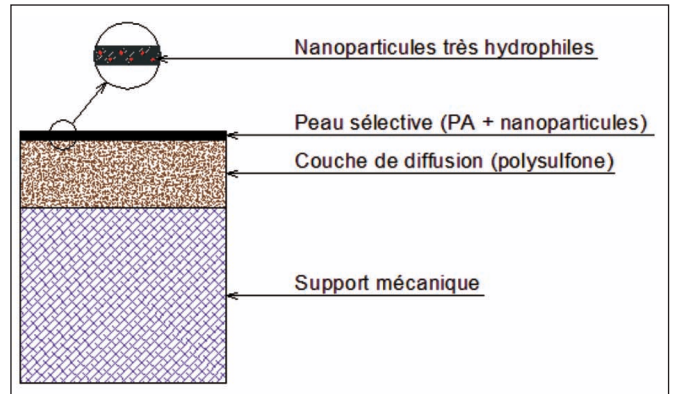
alimentation - concentrat, ce qui par contre augmente la sensibilité au colmatage ;

- augmentation de la surface active par automatisation de la dépose de la colle pour former des cordons les plus étroits et réguliers possibles.

Il reste maintenant à augmenter leur perméabilité (= débit de production par m2 et par bar de pression transmembranaire - L·m²·bar⁻¹).

La voie aujourd'hui privilégiée est l'introduction de nanoparticules dans la couche sélective des membranes en polyamide (cf. figure 4).

Figure 4: Coupe d'une membrane avec une peau sélective contenant des nanoparticules



Les nanoparticules sont des zéolithes poreuses (aluminosilicates) ayant des dimensions légèrement inférieures à l'épaisseur de la peau sélective.

L'augmentation de la perméabilité permet par rapport aux membranes traditionnelles, d'après les premières expérimentations, de diminuer la pression d'alimentation, et donc l'énergie consommée (gain attendu : -20%) ou d'augmenter la production (+70%), et cela pour une même surface membranaire mise en œuvre.

Si on désire conserver la même capacité de production, l'emprise de l'étage membranaire peut être diminuée de 40%.

Les nanoparticules permettent également d'améliorer l'état de surface et les charges électrostatiques des membranes pour les rendre moins sensibles au colmatage.

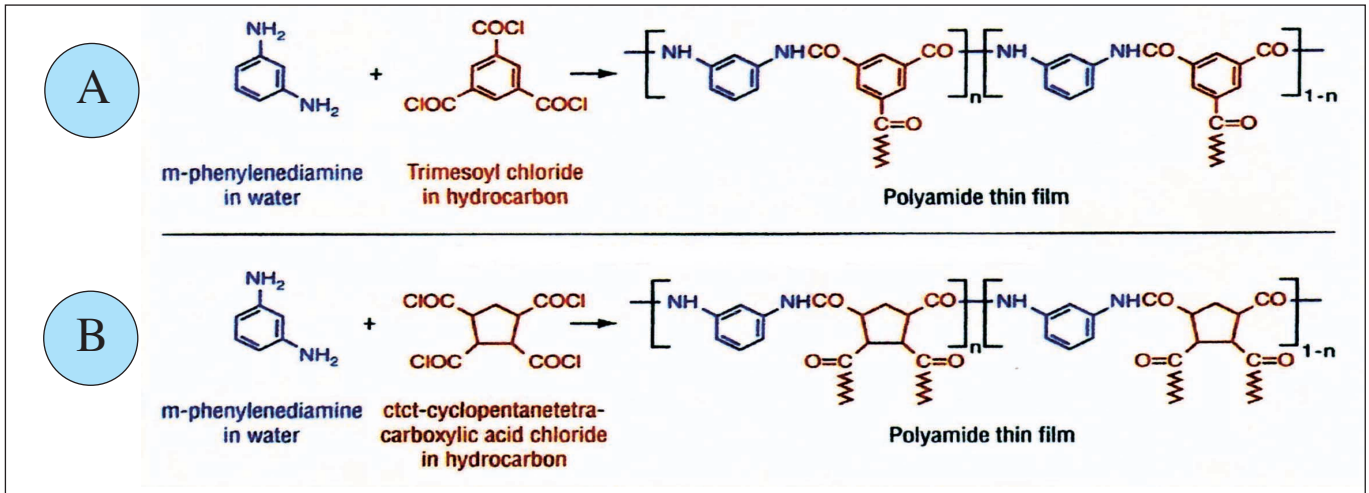
Les membranes chargées en nanoparticules ne modifient en rien les dimensions normalisées des éléments spiralés. Leur fabrication entraîne un surcoût évalué à 5% par rapport aux membranes traditionnelles.

2.3. Augmentation de la résistance chimique.

Il est rappelé que, contrairement aux membranes fibres creuses en tri-acétate de cellulose, les membranes en film mince de polyamide ne tolèrent pas le chlore, ce qui nécessite de déchlorer l'eau d'alimentation ayant subi une préchloration afin de réduire l'activité biologique.

Cette déchloration ne permet donc pas de maintenir un environnement biocide dans l'étage membranaire.

Figure 5: Groupement chimique de membranes ne résistant pas au chlore (A) et de membranes résistant au chlore (B)



En développant des membranes tolérantes au chlore cet inconvénient peut être éliminé. Ce qui permet de protéger les membranes contre le bio-fouling.

La résistance aux oxydants est obtenue en modifiant les groupements chimiques des constituants de la couche sélective (cf. figure 5).

Autre voie de développement possible : membranes en film mince de tri-acétate de cellulose.

2.4. Développement de méthodes de nettoyage des membranes minorant l'usage des produits chimiques

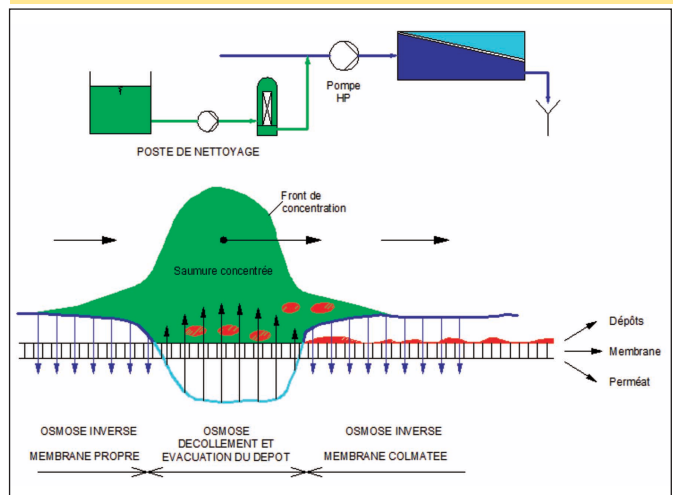
L'utilisation de produits chimiques pour le nettoyage périodique des membranes présente les inconvénients suivants :

- impact sur l'environnement ;
- mise à l'arrêt de tout ou partie de l'étage membranaire pendant une durée assez longue ;
- diminution de la longévité des membranes en cas de nettoyages fréquents ;
- coût d'investissements importants pour le poste de nettoyage en place et pour les circuits de distribution et de retour des solutions recyclées ;
- manipulation de produits dangereux.

Sur la base du principe de l'osmose naturelle qui tend à diluer une solution saline par de l'eau ayant une salinité moins élevée, les deux solutions étant séparées par une membrane semi-perméable, il a été expérimenté une méthode de nettoyage faisant appel à une solution concentrée de chlorure de sodium injectée périodiquement dans le circuit d'alimentation. En se déplaçant le front très salin (pression osmotique : 200 bar) va provoquer le passage du perméat vers la zone d'alimentation - concentration et provoquer ainsi le décollement des dépôts et leur entraînement dans le flux (figure 6)

Ce procédé de nettoyage présente les avantages suivants:

Figure 6: Principe du nettoyage des membranes par injection d'une solution saturée de chlorure de sodium.



- Le chlorure de sodium est un produit non dangereux et dont l'impact sur l'environnement est négligeable ;
- facilité de mise en œuvre (injection en ligne dans la conduite d'alimentation) ;
- Les valeurs du pH de la solution sont proche de 8 et donc sans influence sur la durée de vie des membranes;

Il permet surtout d'effectuer des nettoyages préventifs permettant d'éviter le développement des dépôts et d'espacer les nettoyages chimiques.

2.5. Conséquences des développements envisagés sur les coûts d'investissement et d'exploitation

Les conséquences sur les coûts d'investissement et d'exploitation des développements décrits précédemment sont données dans le tableau suivant :

Amélioration	Conséquence	Diminution	
		Investissement	Exploitation
Résistance au colmatage	vitesse de colmatage ↘ pression moyenne d'alimentation ↘ énergie électrique ↘ fréquence des nettoyages chimiques ↘ qualité perméat ↗ durée de vie ↗	=	•
Productivité	énergie électrique à flux constant ↘ flux à pression constante ↗	•	•
Résistance aux oxydants	nettoyage chimique ↘ énergie électrique ↘ qualité perméat ↗ durée de vie ↗	=	•

2.6. Principaux intervenants concernant les développements envisagés

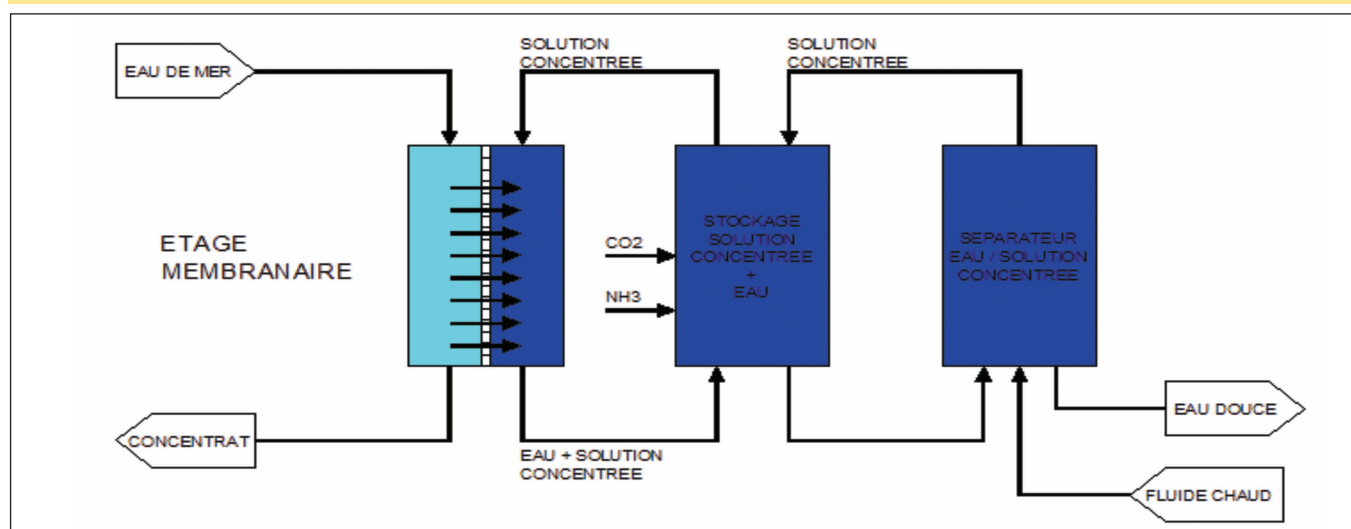
Couche anti-fouling	: Votron (Chine)
Membrane à Pz neutre	: TriSep (USA)
Dépôt d'une solution anti-fouling	: A d v a n c e d Hydro (USA)
Membranes avec nanoparticules	: N a n o H ₂ O (USA)

3. NOUVELLES TECHNOLOGIES SEPARATIVES EN COURS DE DEVELOPPEMENT POUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

3.1. Forward osmosis

Ce procédé est en cours de développement avancé. Son principe repose sur le phénomène de l'osmose, qui tend à diluer une solution saline par de l'eau ayant une salinité moins élevée, les deux solutions étant séparées par une membrane semi-perméable. Le procédé consiste ensuite à séparer l'eau douce produite de la solution saline. Pour cela il est fait appel par exemple à une solution concentrée à base d'ammoniac et de CO₂, séparable de l'eau osmosée par chauffage et stripping (cf figure 7).

Figure 7: schéma de principe du procédé « Forward Osmosis »



Avantages du procédé :

- La perméation s'effectue à basse pression, ce qui permet d'utiliser des membranes à faible résistance mécanique, donc plus économiques que celles utilisées pour l'osmose inverse ;
- Faible consommation électrique, de l'ordre du dixième de celle nécessitée pour l'osmose inverse ;
- Utilisation de chaleur perdue pour recycler la solution concentrée.

Les promoteurs de cette technologie annoncent des réductions par rapport à l'osmose inverse de l'ordre de :

- 20 à 35% au niveau des investissements ;
- 60% au niveau des coûts d'exploitation.

3.2. Thermo-osmose

C'est un procédé qui fait appel à deux types de membranes, à savoir des membranes perméables à la vapeur d'eau et imperméables aux sels d'une part, et des membranes imperméables à la vapeur d'eau et aux sels d'autre part (figure 8)

Description du procédé : l'eau de mer est admise dans un premier compartiment où elle va refroidir la vapeur d'eau qui va se condenser sur sa surface aval pour produire l'eau douce; l'eau de mer reçoit ensuite un complément de chaleur pour permettre son évaporation dans un deuxième compartiment, les deux compartiments étant séparés par un troisième compartiment rempli de vapeur.

Avantage du procédé :

- Faible consommation de vapeur et d'électricité ;
- Emprise au sol plus faible que celle des procédés de distillation thermique, équivalente à celle du procédé par osmose inverse ;
- Prétraitements simplifiés ;
- Faible risque de corrosion et d'entartrage ;
- Faible coûts d'investissement et d'exploitation.

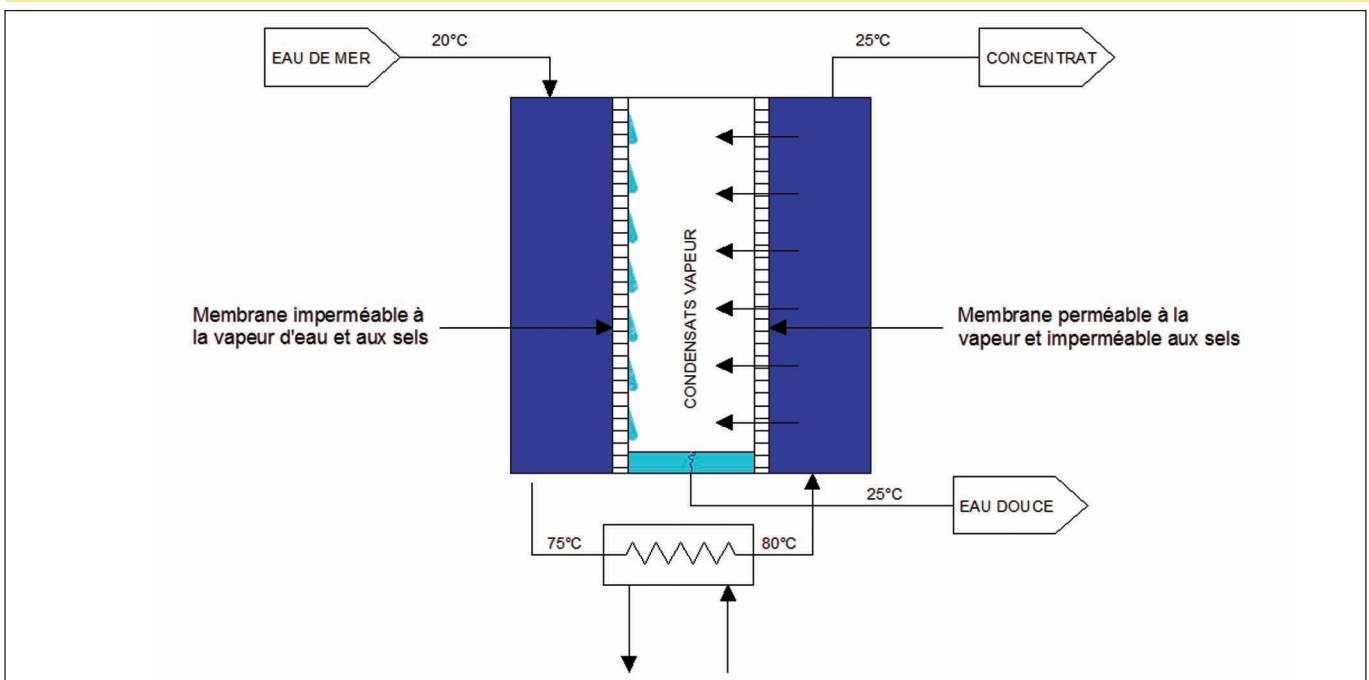
3.3. Osmoseur immergé en mer

Ce procédé consiste à plonger directement dans la mer des modules d'osmose inverse constitués de membranes composites planes, afin de les alimenter par la seule pression hydrostatique. Pour ce procédé, le taux de conversion est très faible, de l'ordre de 2%, ainsi que le flux transmembranaire, en moyenne $3L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$, valeurs à rapprocher des valeurs moyennes des osmoseurs « terrestres », à savoir respectivement 45% et $15L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$. De ce fait :

- la pression d'alimentation ne doit être que très légèrement supérieure à la pression osmotique de l'eau de mer, une profondeur d'immersion de 280m environ étant alors suffisante ;
- les prétraitements sont réduits car il n'y a pas de concentration des sels au voisinage des surfaces membranaires, et de plus, à une profondeur de l'ordre de 280m, les micro organismes sont peu présents.

A part les modules, l'installation comporte un dispositif de mise à l'atmosphère du compartiment perméat, un groupe électropompe immergé pour le refoulement du perméat et une conduite de liaison avec la terre.

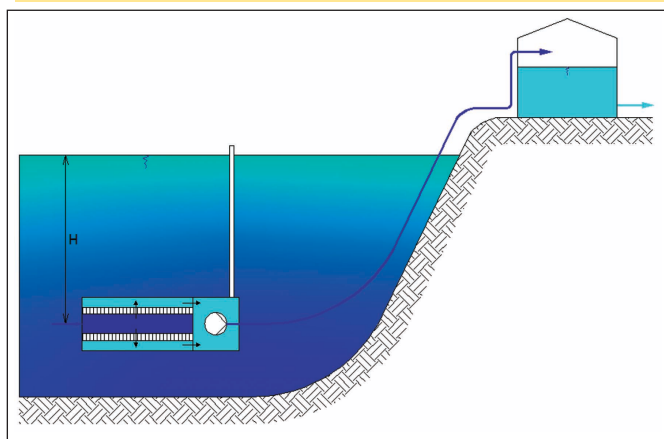
Figure 8: Schéma de principe du procédé « Thermo Osmose »



La consommation électrique est alors inférieure à $1\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$. Ce procédé dont un prototype de $200\text{m}^3\cdot\text{j}^{-1}$ devrait être opérationnel dans 18 mois, présente les inconvénients suivants :

- Sels dissous totaux assez importants, nécessitant éventuellement une deuxième passe installée à terre, faisant appel à des membranes basse-pression ;
- Profil du fond marin permettant d'atteindre rapidement la profondeur désirée, afin de minimiser la longueur de la tuyauterie de refoulement

Figure 9: Schéma de principe d'un osmoseur immergé en mer



3.4. Sociétés à l'origine des nouvelles Technologies de dessalement

Forward Osmosis	: Oasys (USA)
Thermo-Osmose	: TNO (Pays Bas)
Osmoseur immergé	: DXV Water Technologies (USA)

CONCLUSION

Les nouvelles technologies, et en particulier celles envisagées au niveau des membranes, doivent asseoir la position dominante du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, en tant que technologie fiable et économique. Il est attendu une réduction du coût de production d'eau douce de l'ordre de 20% dans les cinq prochaines années, et de 50% d'ici à 2020. Ce pronostic doit permettre de rendre abordable le dessalement de l'eau par osmose inverse à des pays ne possédant pas aujourd'hui les ressources financières et techniques pour envisager la construction d'usines de dessalement pour combler le déficit de leurs ressources conventionnelles en eau.

BENCHMARKING INTERNATIONAL EN MATIERE DE DESSALEMENT DES EAUX

C. M. Freixa¹

Résumé

Dans le cadre de l'Étude stratégique sur le dessalement d'eau de mer au Maroc en cours en 2009, les sociétés AYESA et ADI, en collaboration avec le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, ont comme première mission la réalisation d'un benchmarking international sur le dessalement d'eau de mer.

Ce travail a pour objet l'analyse des expériences d'autres pays en matière de dessalement d'eau de mer. Les pays à analyser seront ceux qui ont la capacité installée la plus grande : Arabie Saoudi, les Émirats Arabes Unis, les États Unis, l'Espagne, etc. L'objectif final de l'étude sera l'adaptation de ces expériences à la réalité du Maroc.

Les sujets à analyser sur le dessalement peuvent être classés en 4 groupes : aspects technologiques, impacts environnementaux, coûts d'investissement et d'exploitation et modes de gestion sur le plan juridique et financier.

Les aspects technologiques à étudier seront les suivants : la prise d'eau de mer (prise d'eau directe ou forages côtiers), le prétraitement (décantation, flottation, filtres ouverts, filtres fermés, membranes d'ultrafiltration, etc.), le dessalement (notamment par osmose inverse ou électrodialyse), le posttraitement (chaux ou lits de calcite), le rejet des saumures, les installations électriques et le système de télégestion.

L'étude des impacts environnementaux va se focaliser sur les deux aspects les plus critiques : l'accroissement de la consommation énergétique et le rejet des saumures sur l'écosystème marin.

L'estimation du coût du dessalement à ce jour et dans l'avenir sera très importante pour connaître la faisabilité de la solution du dessalement par rapport aux autres solutions d'augmentation des ressources en eau potable (eaux superficielles, eaux souterraines, transferts, réutilisation des eaux usées et économie de l'eau). Le coût total à considérer comprend l'investissement, le coût financier, les coûts d'entretien et d'exploitation (fixes et variables) et le coût énergétique, qui peut atteindre plus de 40 % du coût total, malgré que la consommation spécifique soit descendue remarquablement au cours des dernières années pour atteindre 3 Kwh/m³ d'eau dessalée.

L'analyse des modes de gestion dans d'autres pays sera essentielle pour permettre la transposition au cas marocain, par rapport à l'investissement, le financement, l'exploitation public, privé, en concession, etc.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'Étude stratégique sur le dessalement d'eau de mer au Maroc en cours en 2009, les sociétés AYESA et ADI, en collaboration avec le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, ont comme première mission la réalisation d'un benchmarking international sur le dessalement d'eau de mer.

Ce travail a pour objet l'analyse des expériences d'autres pays en matière de dessalement d'eau de mer, l'objectif final de l'étude étant l'adaptation de ces expériences à la réalité du Maroc.

Les sujets analysés peuvent être classés en 4 groupes : aspects technologiques, impacts environnementaux, coûts d'investissement et d'exploitation et modes de gestion.

2. ASPECTS TECHNOLOGIQUES

Les aspects technologiques sur lesquels il faut se focaliser sont les suivants :

• Prise d'eau de mer :

Le captage avec des puits côtiers est plus économique que le captage avec un émissaire sous-marin, mais il est seulement faisable pour de petits ou moyens débits (environ 50.000 m³/jour de production). De plus, les caractéristiques hydrogéologiques du terrain doivent permettre l'extraction de ces débits avec un nombre non excessif de puits.

Cela a impliqué que les usines faites en Espagne au cours des 5 dernières années, dont le débit de production est compris entre 60.000 et 240.000 m³/jour, ont un captage par le biais d'un émissaire.

Un troisième procédé de captage est la prise directe sur la côte. Dans ce cas, la zone de prise est protégée des impacts des houles par le biais de brise-lames qui forment un endroit plus calme, comme un port. En

1. Expert international en dessalement. AYESA. Espagne. E-mail : cmf@ayesa.es

Espagne il y en a deux cas, les deux situés à Las Palmas de Gran Canaria.

• **Prétraitement :**

Sa fonction est de garantir une certaine qualité d'eau brute qui parvient aux membranes d'osmose inverse, caractérisée par un paramètre SDI < 5.

Le prétraitement minimal qu'on fait est une étape de filtration, soit avec des filtres fermés, soit avec des filtres ouverts. Généralement c'est le cas de toutes les usines avec puits côtiers : grâce à la filtration naturelle du terrain, une seule étape de filtration dans l'usine suffit pour atteindre la qualité désirée.

Dans le cas du captage avec un émissaire sous-marin, malgré la décantation qui se produit dans le propre tuyau de captage, une deuxième étape de filtration est souvent nécessaire.

Un troisième cas est constitué par les usines qui ont un captage avec un émissaire dans une zone avec accroissement potentiel des algues marines ou bien possibilité de rejets d'hydrocarbures ou d'eaux polluées. Dans ces deux cas, on a constaté l'intérêt d'ajouter une étape de flottation avant les deux étapes de filtration. En Espagne, il y a deux usines qui disposent d'un prétraitement par flottation avant les deux étapes de filtration.

Dans tous les cas, avant l'entrée de l'eau aux membranes d'osmose inverse, se trouvent les filtres à cartouche, qui constituent la dernière protection des membranes.

L'utilisation des membranes de micro et ultrafiltration pourrait augmenter dans l'avenir, lorsque les deux problèmes principaux, à savoir le prix et le manque d'expérience au niveau international, seront progressivement corrigés.

• **Technologie de dessalement :**

La technologie de l'osmose inverse prévaut d'année en année sur la distillation, dû au surcoût énergétique que cette technologie implique par rapport à l'osmose inverse. La distillation est à ce jour seulement liée à l'extraction de pétrole. Il s'agit donc d'une technologie qui ne continue son implantation que dans les pays arabes : Arabie Saoudite, Emirats Arabes Unis, Koweït, etc.

Par ailleurs, la capacité d'eau produite avec des installations de distillation (58%) est encore à ce jour supérieure à celle de l'osmose inverse (42%). L'ensemble des deux donne une capacité installée au niveau mondial de 27 700 000 m³/jour. Mais l'évolution est sans doute favorable à l'osmose inverse. Comme exemple, le nombre d'usines mises en service durant 2007/2008 : à l'échelle mondiale, il était de 330 d'osmose inverse contre 34 de distillation.

En ce qui concerne l'Espagne et l'Algérie, dont les expériences peuvent être utiles au Maroc, toutes les

usines construites ou en phase de construction après 2000 se basent sur le procédé d'osmose inverse.

L'amélioration technique des membranes au cours du temps permet l'élimination du bore jusqu'aux valeurs acceptables d'1 ppm avec un seul passage. L'installation d'un deuxième passage pour réduire ce contenu peut être nécessaire dans le cas d'une température élevée de l'eau de mer ou dans le cas de l'agriculture, notamment l'irrigation des citronniers et des orangers.

En Espagne, seulement 5 usines sur la côte méditerranéenne disposent d'un deuxième passage, tandis que toutes les usines sur la côte atlantique (Îles Canaries) n'ont qu'un premier passage des membranes.

Un autre aspect intéressant à faire ressortir est le changement de la technologie de récupération énergétique des saumures : les turbines Pelton ont laissé leur espace aux échangeurs de pression. En effet, la plupart des grandes usines projetées à partir de l'an 2000 disposent de la technologie des échangeurs de pression. De cette façon, on a augmenté le rendement de la récupération énergétique d'une valeur approximée de 88% à 95%.

• **Post traitement**

L'addition de l'alcalinité et dureté à l'eau osmosée permet à ce jour deux technologies : d'une part, les saturateurs de chaux ; d'autre part, les lits de calcite.

Les lits de calcite présentent un coût d'investissement plus grand, mais un coût d'exploitation plus faible. Dans le cas de grandes usines (>30.000 m³/j) ils peuvent être compétitifs. Notons tout de même qu'ils dépendent de l'existence de carrières de calcaires à proximité de l'usine.

En Espagne, deux usines en fonctionnement exploitent déjà les lits de calcite, quatre autres sont en phase de construction. L'expérience espagnole et des autres pays dans les prochaines années sera décisive pour l'évaluation de l'alternative optimale au Maroc. Dans tous les cas, une étude d'alternatives sera nécessaire pour chaque usine, tenant compte des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation.

3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

L'étude des impacts environnementaux d'une usine de dessalement doit se focaliser notamment sur les deux aspects les plus critiques : le rejet des saumures sur l'écosystème marin et l'accroissement de la consommation énergétique par rapport aux autres alternatives de ressources en eau potable.

En ce qui concerne l'impact des saumures, il faut souligner que la salinité des saumures est comprise entre 68 et 90 g/l. Cette différence de salinité avec l'eau de mer explique le comportement du rejet hypersalin : la masse d'eau très dense forme une couche sur le fond

marin et se déplace suivant les lignes de pente maximale. Le degré de stratification est tellement élevé que la dilution de cette masse d'eau avec la couche d'eau supérieure de salinité ambiante est très difficile, même avec un certain degré d'exposition hydrodynamique.

Le concentrat contient également les résidus des produits chimiques ayant servi aux prétraitements. Ils entraînent en particulier une acidification de l'eau (pH compris entre 6 et 6.5) ce qui a un impact sur la matière biologique, et en particulier sur les coraux. Si l'on utilise du métabisulfite de sodium pour la déchloration de l'eau d'alimentation ou en tant que traitement biocide, ce produit a un impact sur le phytoplancton en particulier.

Les effets de ces rejets sur le milieu marin, comme l'ont démontré de nombreuses études, sont les suivants :

- Anoxie au niveau des fonds marins : la colonne d'eau se trouve divisée en deux : l'eau de mer constitue la couche supérieure et la saumure la couche inférieure. Dans des conditions de calme du milieu récepteur, avec un faible renouvellement des algues, la présence d'espèces benthoniques, consommatrices d'oxygène, peut conduire à des périodes d'anoxie du fond marin.
- Diminution de la lumière : la présence d'un fluide hypersalin modifie le coefficient de réflexion de la lumière filtrée, provoquant la formation d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales.
- Affection des espèces marines: on a détecté des réductions significatives dans les communautés des échinodermes (utilisés comme bio indicateurs pour leur sensibilité) près de la zone de rejet.
- Affection des fanerogames marines : la mer Méditerranée est la zone du monde où le plus grand nombre d'études a été réalisé à ce sujet. On a détecté des effets négatifs sur les fanerogames marines. Notamment, en ce qui concerne la Posidonia océanique, on a détecté une augmentation de la mortalité des individus, apparition de nécrose sur les tissus et plus grande chute des feuilles. Les valeurs limites d'affection sont très variables selon les espèces : la Posidonia océanique résiste à une augmentation de 1 psu, alors que d'autres espèces résistent jusqu'à une augmentation de plus de 20 psu.

Les moyens à adopter pour mitiger l'impact du rejet de saumures peuvent être classés en deux groupes : moyens à mettre en œuvre durant la phase de projet et programmes de vigilance environnementale.

Les moyens en phase de projet peuvent être résumés dans les points suivants :

- La réalisation d'une cartographie sous-marine des habitats écologiques à protéger dans toute la région. Cette information doit être autant décisive

que les contraintes sociales ou économiques, au moment de choisir la parcelle où on situera l'usine de dessalement.

- La réalisation d'un modèle numérique de propagation de la salinité aidant au dessin du rejet: le modèle en question doit être tridimensionnel, son but étant de pouvoir assurer en phase de projet que le déversement n'affectera pas des zones à intérêt écologique et que la prise d'eau ne captera pas d'eau provenant du rejet. Le résultat du modèle sera le dessin de l'ouvrage de rejet et la dimension tridimensionnelle de la plume hypersaline. Le modèle en question sera calibré postérieurement, durant la phase d'exploitation de l'usine, à l'aide de mesures in situ de la salinité.
- Le choix adéquat du type de rejet, soit direct sur la côte soit par le biais d'un émissaire sous-marin : il faut tenir compte de l'importance de la vitesse et de l'angle de sortie du jet ou des diffuseurs d'eau, de la bathymétrie du fond marin, du régime des houles et courants marins, etc.
- Le rejet simultané de saumures avec les eaux de refroidissement d'une centrale thermique ou avec l'effluent d'une usine de traitement d'eaux résiduelles est une solution intéressante à adopter, dans la mesure du possible.
- La dilution des saumures avec l'eau de mer est une solution intéressante dans les nombreux cas où il y a des zones à protéger et où la production de l'usine n'est pas très grande. On a l'habitude de réaliser des dilutions entre 2:1 et 4:1 (de 2 à 4 volumes d'eau de mer pour 1 volume de saumure). Le problème principal est le surcoût d'investissement et énergétique que cela implique. De plus, dans les zones à forts courants et houle, l'ouvrage nécessaire pour abriter les pompes de captage d'eau de mer peut avoir un coût prohibitif.

Le programme de vigilance environnementale doit correspondre au minimum aux points suivants :

- Contrôle du débit et de la salinité des saumures à l'intérieur de l'usine, avec le but de détecter les possibles anomalies du fonctionnement de l'usine
- Contrôle des saumures dans la zone de rejet, afin de caractériser la géométrie tridimensionnelle et la salinité de l'effluent
- Contrôle de qualité dans les zones à protéger pour leur importance environnementale et qui sont susceptibles d'être affectées par une forte variation de la salinité.

La consommation énergétique importante des usines de dessalement est l'un des principaux inconvénients de cette source alternative d'eau potable. Cette consommation est due, d'une part, au pompage à haute pression (deux tiers du total) et, d'autre part, au reste des pompes de l'usine : pompage d'eau de mer, lavage des filtres et membranes, pompes vide cave, ponts roulants, éclairage, etc.), qui constituent l'autre tiers.

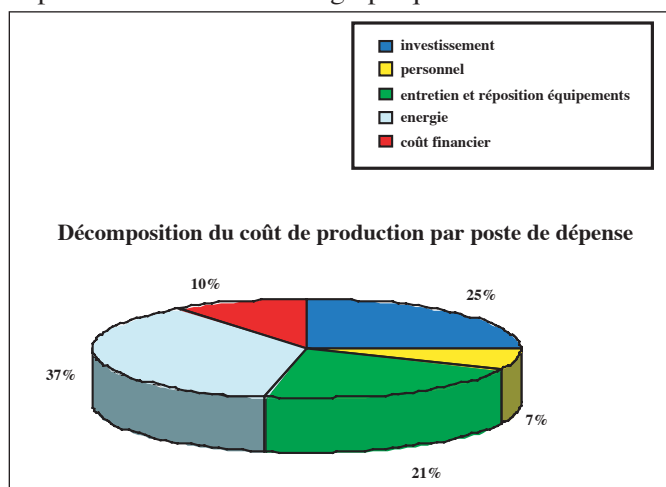
Au cours des dernières années, il y a eu une diminution de la consommation spécifique grâce au remplacement progressif de la distillation par l'osmose inverse, ainsi qu'au système de récupération de l'énergie des saumures.

Pour répondre à la question de si on est déjà arrivé à la limite de réduction de la consommation spécifique, on peut poser l'exercice suivant :

Si on dissout dans 1 m³ d'eau pure 38 kg de sels, une quantité de chaleur de 0,78 kWh se dégage. Si le procédé était réversible, cette énergie serait celle qu'on devrait apporter au système pour séparer à nouveau les sels de l'eau. Avec un facteur de 3 entre le procédé réversible et le procédé pratique idéal, on obtient une consommation spécifique de 2,3 kWh/m³. Par conséquent, il ne faut pas espérer de grandes améliorations du point de vue énergétique.

4. COUT DU DESSALEMENT

L'estimation du coût du dessalement à ce jour et dans l'avenir est très importante pour connaître la faisabilité de la solution du dessalement par rapport aux autres solutions d'augmentation des ressources en eau potable (eaux superficielles, eaux souterraines, transferts, réutilisation des eaux usées et économie de l'eau). La décomposition du coût de production par poste de dépense est montrée sur la graphique suivante :



Il faut noter que :

- Le coût total actuel est de 7,5 DH/m³, ce qui comprend l'investissement, l'exploitation et le coût financier.
- Le coût d'investissement représente 25 % du coût global : 10 000 DH / (m³/j)
- L'ensemble des coûts d'exploitation correspondent à 65 % du coût global.
- Le coût d'entretien et de remplacement des équipements est encore élevé (21%) cependant la tendance est de le diminuer.
- Le coût du personnel est faible (7 %).

S'il y a une stabilisation des prix (énergie et matières premières: acier, cuivre, titane...) et si le développement technologique continue (rejet des membranes, coût des membranes,...), on peut atteindre encore des réductions du coût global du dessalement d'eau de mer.

5. MODES DE GESTION

L'analyse des modes de gestion dans d'autres pays est essentielle pour permettre la transposition au cas marocain, par rapport à l'investissement, le financement, l'exploitation public, privé, en concession, etc.

Il existe cinq variantes fondamentales dans la phase d'exploitation des usines de dessalement. La combinaison de celles-ci donne lieu à un nombre encore plus grand de modalités, que nous ne traiterons pas dans le présent paragraphe (voir tableau ci-après):

• Gestion public:

L'Administration prend directement en charge l'exploitation de l'usine, généralement au travers d'organismes ou entreprises publiques ou bien des Municipalités.

• Contrat d'opératin et maintenance:

L'Administration titulaire de l'usine de dessalement licite l'exploitation durant une période généralement comprise entre 15 et 20 ans.

• Exploitation à charge de l'entreprise constructrice:

Cette méthode de gestion repose sur le fait que le contrat de projet et construction inclut l'exploitation durant une

	EXPLOITATION	FINANCEMENT DE L'INVESTISSEMENT	PROPRIÉTÉ
GESTION PUBLIQUE	Publique	Public	Publique
CONTRAT D'O&M	Privée	Public	Publique
EXPLOITATION A CHARGE DU CONSTRUCTEUR	Privée	Public	Publique
BOT	Privée	Privé	Privée; puis, Publique
PROMOTION PRIVEE	Privée	Privé	Privée

période prédéterminée. Par conséquent, l'entreprise constructrice reçoit le paiement de l'ouvrage de la part de l'Administration, mais continue avec les travaux d'opération et de maintenance de l'usine. L'avantage principal est que le constructeur prend en charge les problèmes qui surgissent, spécialement au cours des premières années.

• **Build-operate-transfer:**

Cette modalité est basée sur un schéma de concession, dans lequel l'investissement net (une fois déduites les possibles subventions) est récupéré par l'exploitation de l'infrastructure sur une durée déterminée (15-25 ans).

Le nom sous lequel on connaît ce système (Build, Operate & Transfer, BOT) indique que le contrat inclut la construction, l'opération et le transfert à l'Administration des installations. Le propre adjudicataire des travaux s'occupe de l'exploitation durant la période préétablie. Durant cette période, il reçoit les rétributions correspondant à l'exécution de l'ouvrage et aux coûts d'exploitation.

La différence avec la modalité «Exploitation à charge du constructeur» est que dans le BOT le constructeur doit financer lui-même les travaux: il ne reçoit aucune rétribution tant qu'il ne commence pas à produire de l'eau. La propriété de l'usine est privée tant qu'il l'exploite, même si au terme de la période d'exploitation, la propriété est transférée à l'Administration.

• **Promotion privée des usines de dessalement:**

Le cas où la promotion de l'usine de dessalement correspond au secteur privé est un cas différent des quatre autres décrits précédemment. On retrouve ce cas dans :

- Secteur touristique : urbanisations, terrains de golf ou complexes hôteliers, qui manquent de ressources hydriques conventionnelles. En général, il s'agit d'usines à petites productions, aux alentours de 1.000 m³/jour. Il y en a plusieurs aux Îles Canaries (España).
- Communautés d'irrigateurs, qui ont besoin de dessalement pour les zones d'irrigation intensive. A Níjar (Almería, Espagne) il en existe une en construction de 60.000 m³/jour.
- Les Industries, qui ont besoin de qualités d'eau pour leurs procédés assimilables à l'eau distillée.

Les modes de gestion qui s'imposent dans les pays principaux du monde sont: l'exploitation à charge du constructeur (par ex., Espagne) et les contrats BOT (par ex., Algérie). Ces deux cas sont basés sur une participation conjointe du secteur privé et du secteur public, que ce soit dans la phase de construction ou d'exploitation. Cela nous amène à conclure que la participation des deux parties de façon coordonnée est fondamentale pour la promotion du dessalement. Sans l'une des deux parties il n'est pas possible d'entreprendre avec succès un programme ambitieux de dessalement dans un pays.

Il faut également toujours tenir compte du fait que les usines de dessalement sont des installations vivantes, qui sont objet d'agrandissements et renouvellements continus. Ça justifie que l'Administration ne doit en aucun cas perdre le contrôle, ni du projet, ni de l'ouvrage ni de l'exploitation.

ASPECTS TECHNIQUES, FINANCIERS ET ECONOMIQUES DES DIVERS PROCEDES DE DESALEMENT DES EAUX

J. L. P. Talavera¹

Résumé

La nécessité de dessalement de l'eau date depuis très longtemps. Au XX^e siècle, il est devenu une pratique courante grâce aux développements énormes qu'ont connus les technologies de dessalement.

Il y a actuellement 3 techniques disponibles : la Distillation, avec ses diverses variantes, l'Electrodialyse et l'Osmose Inverse.

La Distillation est seulement utilisée pour l'eau de mer, l'Electrodialyse pour l'eau saumâtre et finalement, l'Osmose Inverse est utilisée pour toute espèce d'eaux.

Cette article décrit en détail les caractéristiques techniques de deux systèmes d'évaporation (la Distillation Flash et la Distillation à Effet Multiple) et deux systèmes de membranes (l'Electrodialyse Réversible et l'Osmose Inverse).

Finalement, une comparaison est réalisée entre les coûts d'investissement et de production d'une usine de distillation DEM et d'Osmose Inverse, en finissant avec les avantages et les inconvénients des deux systèmes.

1. CHRONOLOGIE

On peut dire que la recherche de méthodes pour dessaler les eaux est aussi ancienne que l'Humanité.

Dans la Bible, on raconte l'histoire de Moïse recevant les plaintes du peuple qui ne pouvait pas boire d'eau parce qu'elle était amère. Moïse jette une branche à l'eau et celle-ci devient douce.

De même, les marins grecs de l'Antiquité, afin de pouvoir faire leurs grands voyages sans avoir à toujours longer les côtes (pour se fournir en eau douce), essayèrent en vain, durant très longtemps, de dessaler l'eau de mer par filtration avec des carafes en céramique, une idée se rapprochant des méthodes actuelles à membranes.

Dans des temps plus récents, la technique de distillation était la seule que l'on connaissait pour dessaler l'eau de mer, aussi bien à bord des navires que sur terre ferme.

Rappelons, par exemple, qu'au XIX^e siècle, au Chili et en Bolivie, il existait un grand nombre de stations de dessalement par distillation, aussi bien par énergie solaire que thermique.

Bien que le dessalement de l'eau de mer fût obtenu par distillation (avec des rendements énergétiques très bas), il n'existait pas de méthode efficace permettant de dessaler les eaux saumâtres. (L'échange ionique était une méthode industrielle pour de petits volumes)

C'est en 1948 que l'on réalise un grand saut technologique, en développant une méthode (l'électrodialyse) qui permet d'une part le dessalement d'eaux saumâtres et qui nous penche, d'autre part, sur une nouvelle technologie : celle des membranes.

Durant la seconde moitié du XX^e siècle, les techniques de distillation se perfectionnent, avec une amélioration leur rendement énergétique et en construisant des Stations de grande capacité, qui emploient le plus souvent les méthodes dites de distillation flash, la distillation à effets multiples et la distillation par compression de la vapeur.

C'est finalement, durant les années 60, qu'apparaît la technologie des membranes, l'Osmose Inverse, qui renferme de nombreux et considérables avantages sur les techniques jusqu'alors employées et qui fera que le dessalement, qui était quelque chose d'exceptionnel, devienne une méthode d'usage commun, qui va permettre la vie et le développement des zones arides de la Planète.

2. SYSTEMES DE DISTILLATION

Les techniques de distillation sont nombreuses:

- Distillation à Tubes Submergés
- Distillation effets Multiples à Tubes Verticaux
- Distillation Effets Multiples à Tubes Horizontaux
- Distillation Flash
- Compression Mécanique de la Vapeur
- Distillation Solaire
- Les plus utilisées sont (par ordre d'apparition sur le Marché)
- Distillation Flash
- Compression Mécanique de la Vapeur
- Distillation Effets Multiples à Tubes Horizontaux.

La Compression mécanique de la Vapeur est utilisée seulement dans les installations à faible débit (Typiquement 500, 1000 et 2000 m³/jour de production)

¹ Ingénieur Industriel Supérieur. Directeur Technique de Sadyt (Groupe Sacyr Vallehermoso). Espagne. E-mail : jtalavera@gruposyv.com

3. SYSTEMES DE MEMBRANES

Il n'y a essentiellement que deux techniques de membranes: l'électrodialyse (ED) et sa variante, l'électrodialyse réversible (EDR) ainsi que l'osmose inverse (OI) et sa variante la nanofiltration (NF).

L'électrodialyse utilise l'électricité comme énergie et ne s'applique qu'aux eaux saumâtres.

L'osmose inverse et la nanofiltration utilisent la pression comme énergie et s'appliquent à tous types d'eau, aussi bien saumâtres que de mer.

4. DISTILLATION FLASH

4.1. Introduction

La distillation flash est la production de vapeur par une soudaine réduction de pression dans un liquide chaud se trouvant initialement aux alentours de sa température d'ébullition. En réduisant la pression, on réduit la température, ce qui provoque la réduction de la chaleur sensible dans le liquide et l'on dispose d'énergie pour la production d'une petite quantité de vapeur.

4.2. Processus de distillation à étapes multiples flash(DF)

4.2.1. Description générale

La station est formée d'une série de chambres de condensation ou sections, dans lesquelles il y a un certain degré de vide (15-24 sections selon le modèle). L'eau de mer entre dans l'unité et avance de section en section. Le transport se fait à travers des tubes. Étant

donné que dans les chambres il y a de l'eau chaude, l'eau se trouvant à l'intérieur des tubes se chauffe peu à peu, au fur et à mesure qu'elle passe d'une section à l'autre. À la fin du trajet, l'eau de mer, préchauffée selon ce procédé arrive à la chaudière principale, qui utilise la vapeur extérieure de la chaudière à vapeur d'une centrale thermique, pour augmenter la température de l'eau jusqu'à 70-110°C (selon le type de station).

Une fois que l'eau a été ainsi chauffée, elle retourne par les mêmes sections en ordre inverse mais à l'extérieur des tubes. Etant donné que dans chaque section la pression est légèrement inférieure à celle de saturation de vapeur correspondante dans chaque chambre, il y a une production de vapeur. La condensation est obtenue dans les mêmes chambres autour des tubes contenant l'eau froide, décrits ci-dessus. La condensation est recueillie dans des plateaux spéciaux.

Comme la quantité de vapeur produite à chacune des étapes est faible, nous aurons besoin de grands flux de circulation et d'un grand nombre d'étapes.

4.2.2. Parties d'une installation

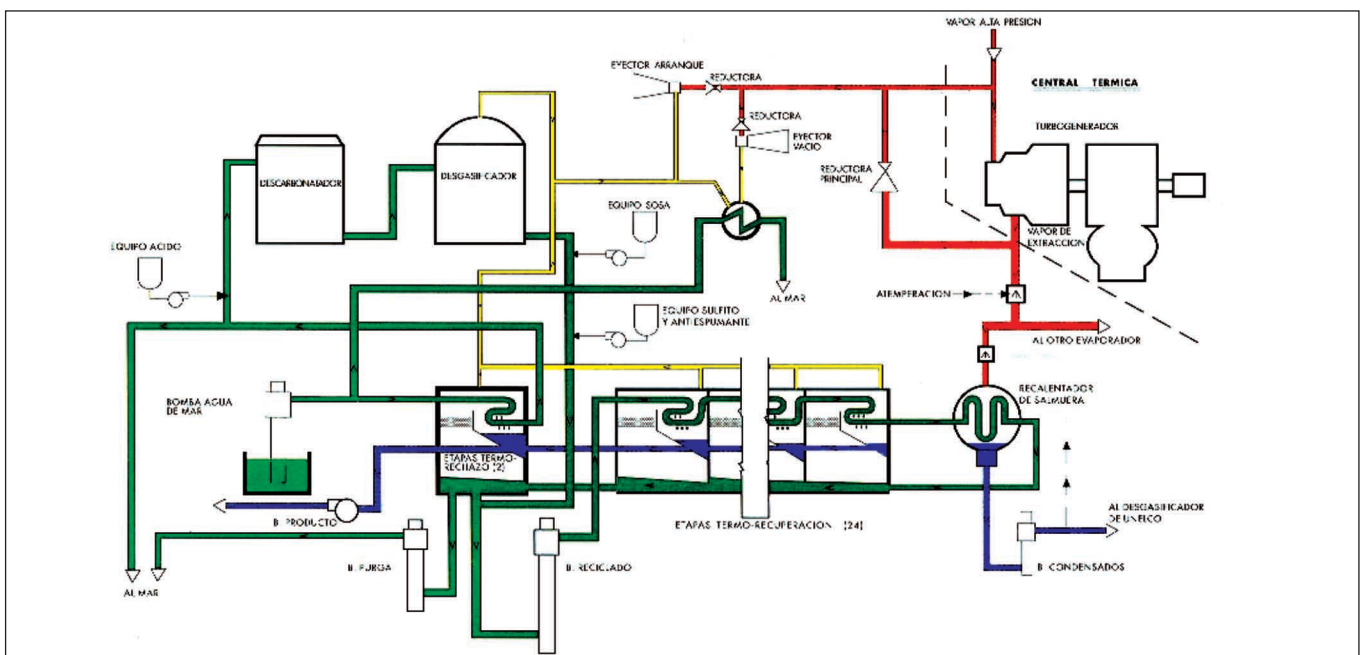
Le diagramme de flux d'un système DF comprend les suivantes sections:

- Prétraitement
- Distillation flash
- Chaudière principale
- Éjecteurs à vide

Prétraitement

Le prétraitement des eaux d'alimentation d'une unité DF se compose de :

Schéma de fonctionnement d'une Unité de dessalement D.F. (Las Palmas II)



• Filtration

Élimination de la matière en suspension au moyen d'une filtration. Dans une station DF, le type de filtres le plus utilisé est du type DUPLEX ; on utilise également des filtres à panier avec un diamètre de trous inférieur à 10mm.

• Réglage du pH

Le pH de l'eau de mer est relativement élevé, ce qui facilite la précipitation des sels peu solubles principalement des carbonates et des sulfates de calcium. En faisant diminuer le pH par l'addition d'un acide, principalement sulfurique, on peut travailler à de plus grandes concentrations sans risque d'incrustations.

Dans la plupart des installations, on réalise l'addition d'acide sulfurique concentré de façon continue jusqu'à obtention d'un pH dans l'eau d'alimentation

• Traitement désincrustant

Pour éviter la précipitation de sels à l'intérieur des tubes de condensation, on ajoute à l'eau d'alimentation un produit désincrustant à base de polyphosphates.

• Dégazage et désaération

Avant de l'introduire dans le corps de l'évaporateur on doit éliminer du courant liquide de circulation les gaz dissous (CO₂, etc.). Le système d'élimination préliminaire des gaz consiste en une tour où l'eau est distribuée par un système d'aspersion sur un joint. Une fois saturée d'air, on fait passer cette eau par une tour où se produit la désaération par la création d'un vide avec des éjecteurs de vapeur.

Evaporateur DF

Le système d'évaporation se compose d'un nombre de sections ou étapes. Les plus chaudes sont dénommées de récupération de la chaleur et les plus froides de rejet de la chaleur.

Les sections de rejet de la chaleur se trouvent à la fin du processus. Ces étapes se refroidissent directement avec de l'eau de mer. On y élimine la chaleur absorbée dans les étapes précédentes du système.

D'autre part, les sections de récupération de la chaleur constituent le cœur de la Station et ce sont celles qui reçoivent l'eau chauffée au préalable dans la chaudière principale. Au cours de ces étapes, la condensation a lieu également dans les tubes qui passent dans la partie supérieure des chambres.

Chambres d'évaporation

Chaque étape consiste en une chambre d'évaporation sous un banc de tubes de condensation. Dans la chambre, il se produit un certain degré de vide où a lieu l'évaporation.

Le vide dans chaque chambre se maintient grâce à une fermeture hydraulique. L'alimentation est introduite dans l'étape à travers un orifice qui sert à rabaisser la

pression au-dessous de la valeur de saturation correspondante à la température en amont de l'orifice. Cette chute de pression donne lieu au refroidissement du courant d'eau d'alimentation et à la production simultanée d'une petite quantité de vapeur, le courant liquide se trouvant à une pression inférieure à la pression de vaporisation correspondante à sa propre température. En d'autres mots, à chacune des étapes, le liquide rencontre une pression inférieure à celle de l'équilibre et donc, une partie du liquide s'évapore en faisant descendre la température du liquide jusqu'à ce qu'elle corresponde à la température de saturation de l'étape.

La vapeur produite par cette évaporation instantanée à chaque étape, se condense autour des tubes de condensation par lesquels circule comme liquide réfrigérant l'eau salée qui se chauffe au fur et à mesure qu'elle passe d'étape en étape.

La vapeur passe par un éliminateur de gouttes ou "demister" avant sa condensation. Le condensé de chaque étape se récupère et passe à l'étape suivante, de telle façon que la température du condensé descend progressivement, et cède en même temps une petite quantité de chaleur à l'eau dans des étapes de plus en plus froides.

Donc, à chacune des étapes, circulent les courants de:

- Courant de circulation d'eau de mer froide à l'intérieur des tubes du condensateur depuis les étapes froides, ou de rejet de la chaleur, à l'étape la plus chaude. Le débit est constant et la température augmente par absorption de l'énergie latente de condensation de la vapeur qui se condense à l'extérieur des tubes.
- Courant d'alimentation d'eau de mer depuis la chaudière principale jusqu'à la dernière étape de rejet de chaleur, par l'extérieur des tubes, tout au long des différentes sections. Au fur et à mesure qu'une partie de l'eau salée se transforme en vapeur, le débit et la température du courant circulant diminuent.
- Courant de condensé est récupéré dans des plateaux et traverse les successives étapes de la première à la dernière. Le débit augmente à chacune des étapes avec la vapeur condensée à chacune des étapes.

Étapes de Rejet de la Chaleur

Ces étapes se trouvent à la fin de l'unité. C'est par elles qu'entre l'eau froide dans les tubes de la partie supérieure des chambres. Dans ces tubes circule un plus haut débit d'eau de mer que dans les étapes de récupération postérieure puisqu'on y incorpore une certaine quantité d'eau de mer (80% du débit) qui refroidit la chaleur apportée dans une autre partie de l'unité. Le reste (20%) se mélange avec le courant d'alimentation et entre à nouveau dans la chaîne des étapes de récupération de chaleur par l'intérieur des tubes de condensation.

Étapes de Récupération de Chaleur

Les chambres des étapes de récupération de chaleur sont identiques à celles de rejet de chaleur.

Les eaux qui y circulent par la partie supérieure dans les tubes de condensation augmentent de température au fur et à mesure qu'elles permettent la condensation dans les différentes étapes. Tandis que la partie qui descend des chambres circule en direction contraire de celle de l'eau chauffée au préalable dans la chaudière principale et qui, par conséquent, baisse de température à chaque étape. Le flash se produit par le vide correspondant qui existe entre chaque chambre.

Chaudière principale

C'est un échangeur de chaleur entre l'eau à la sortie du condenseur de la section de récupération de chaleur et la vapeur provenant d'une source extérieure. L'eau absorbe la chaleur cédée par la vapeur extérieure en se condensant et atteint sa température maximale.

Ejecteurs à vide

Dans les étapes "flashing", on obtient le vide au moyen des éjecteurs de vapeur. Pour simplifier le contrôle de sortie de vapeur, on utilise deux soupapes pour chaque étape situées aux bouts et connectées extérieurement. Au démarrage, on utilise un éjecteur à amorce. Le niveau de vide à chaque étape est calculé selon la température de l'eau de circulation et la perte de pression provoquée par les éléments de « flash ».

Les éjecteurs à vide se composent d'un venturi qui crée lorsque circule de la vapeur une dépression dans l'orifice de sortie de la chambre qui extrait les gaz de son intérieur. Dans les installations industrielles on le place habituellement à chaque 2 ou 3 étapes.

La différence de vide entre étapes se maintient au moyen d'une fermeture hydraulique dans le circuit d'eau salée en évaporation.

5. DISTILLATION A EFFETS MULTIPLES

5.1. Introduction

Le processus de distillation à effets multiples est une technologie classique en ingénierie chimique. Son précurseur était un système à simple effet d'évaporation et de condensation, utilisé historiquement, par exemple, pour produire de l'eau potable dans les navires. Son utilisation dans le dessalement est antérieure au processus DF.

Dans un processus à effets multiples, on utilise un évaporateur à multiples chambres où il y a un certain vide, avec la particularité essentielle qu'une partie importante de l'évaporation se produit par ébullition sur les tubes et seulement une petite quantité se produit par vide.

La température et le vide de chaque chambre décroît dans le sens du flux de l'eau, ce qui permet la réduction

du point d'ébullition de l'eau de mer d'alimentation sans avoir à la chauffer après le premier effet. Les dernières unités DEM construites opèrent à une température maximale de 70°C, ce qui réduit la possibilité d'incrustations dans l'unité, mais demande une plus grande superficie de transfert de chaleur.

5.2. Processus de distillation à effets multiples (DEM)

5.2.1. Description générale

Ce système est constitué par un nombre «n» d'évaporateurs à tubes verticaux ou horizontaux qui composent les différents effets, outre une série de préchauffeurs d'alimentation, l'un desquels peut être un condenseur final, comme celui que nous allons décrire ici.

On fait passer l'eau de mer par le condenseur de rejet de chaleur, en la faisant chauffer par condensation de la vapeur à haute pression. En sortant de la dernière étape de cette section, l'eau de mer se divise en deux courants, dont la plus grande (80%) est déchargée du système comme eau de réfrigération. Le reste (20%) de l'eau est pompée pour alimenter le suivant groupe d'effets. L'eau non évaporée d'un groupe d'effets alimente sous forme de pluie les tubes évaporateurs du suivant groupe d'effets. Cette opération se répète successivement jusqu'à son arrivée aux effets les plus chauds, où l'eau concentrée (saumure) est évacuée du système.

Dans chacun des effets a lieu l'évaporation et la condensation. La vapeur du premier groupe s'alimente directement de la vapeur de la centrale thermique. Les groupes suivants sont alimentés par la vapeur produite dans le groupe précédent. La condensation produite dans chacun des effets constitue le courant d'eau-produit

La source d'énergie du système est la vapeur extérieure à la température à laquelle elle entre dans le premier effet où elle se condense et qui peut être rendu à la chaudière, ou bien être mélangé à l'eau-produit. L'eau est pulvérisée sur les tubes où circule la vapeur. C'est sur ces tubes que se produit l'évaporation et qui provoque également la condensation de la vapeur à l'intérieur des tubes. Par la même occasion, une certaine quantité de vapeur est également produite par l'effet flash à l'intérieur de chaque chambre.

La vapeur qui est générée dans la première chambre est introduite dans le premier préchauffeur d'alimentation où elle se condense partiellement et passe ensuite aux tubes de la chambre suivante où elle se condense à l'intérieur par aspersion d'eau, ce qui produit également de la vapeur dans la chambre. Cet effet est accentué par un certain effet de vide.

L'eau non évaporée dans les chambres alimente le deuxième effet où elle est versée à nouveau sur le faisceau de tubes qui contiennent la vapeur d'eau produite au cours de la première étape. La vapeur à l'intérieur des tubes se condense, se transformant en eau-produit et ainsi de suite.

La vapeur produite dans le dernier effet est introduite dans le condenseur final où elle se condense et se mélange avec le produit ou distillat. Dans ce cas, il n'y a pas d'effet flash.

La saumure du dernier effet se décharge comme rejet dans la mer.

Le distillat de chaque effet s'ajoute aux précédents pour former le total du produit.

Le passage de l'eau d'un effet à l'autre est accompagné d'évaporation soudaine (flash) par suite de la réduction de la pression. Ainsi, la fraction d'eau qui abandonne un effet à la température d'ébullition correspondante, s'évapore par flash quand elle se trouve exposée dans l'effet suivant à une pression de vapeur inférieure. L'effet multi-flash s'obtient en enchaînant les procédés.

Un autre système d'évaporation DEM consiste à alimenter directement en eau de mer les effets, sans avoir à en réaliser le préchauffement. Après avoir joué le rôle de réfrigérant dans le condenseur final, l'eau de mer alimente les effets les plus froids. L'eau non évaporée dans ces froids, alimente le suivant groupe d'effets chauds et ainsi de suite (Las Palmas – Telde).

Les fondements pour la conception d'un système d'évaporation DEM reposent sur le débit de circulation nécessaire à l'obtention d'une production déterminée. Le débit d'apport nécessaire sera déterminé en fonction de la chaleur apportée par la source extérieure. La relation d'alimentation sera d'autant plus faible lorsque le débit sera plus élevé et que l'évaporateur aura un plus grand nombre d'étapes.

Une différence importante avec les systèmes DF, est que le ratio d'économie (production de vapeur/chaleur utilisé) dans les DEM dépend en grande mesure du nombre d'étapes contrairement au cas des DF où il est pratiquement indépendant. En DEM, l'économie est liée au nombre d'effets, et elle est un peu moins importante.

5.2.2. Parties d'une installation

Le diagramme de flux d'un système DEM comprend les sections suivantes:

- Prétraitement.
- Évaporateur multi-effets.
- Thermo-compresseur.
- Système d'évacuation de gaz non condensables
- Éjecteur de démarrage initial

Chacune de ces parties est décrite en détail ci-après.

Prétraitement

Filtration

Élimination de la matière en suspension par filtration. Les systèmes de dessalement par évaporation ne sont pas aussi sensibles à l'encrassement que les systèmes à membranes et, dans la plupart des installations DEM, il suffit d'une ou deux étapes de filtration avec des filtres à panier avec un maillage ou diamètre des trous inférieur à 10 mm. Ou des filtres granulaires de diamètre nominal inférieur à 5 mm.

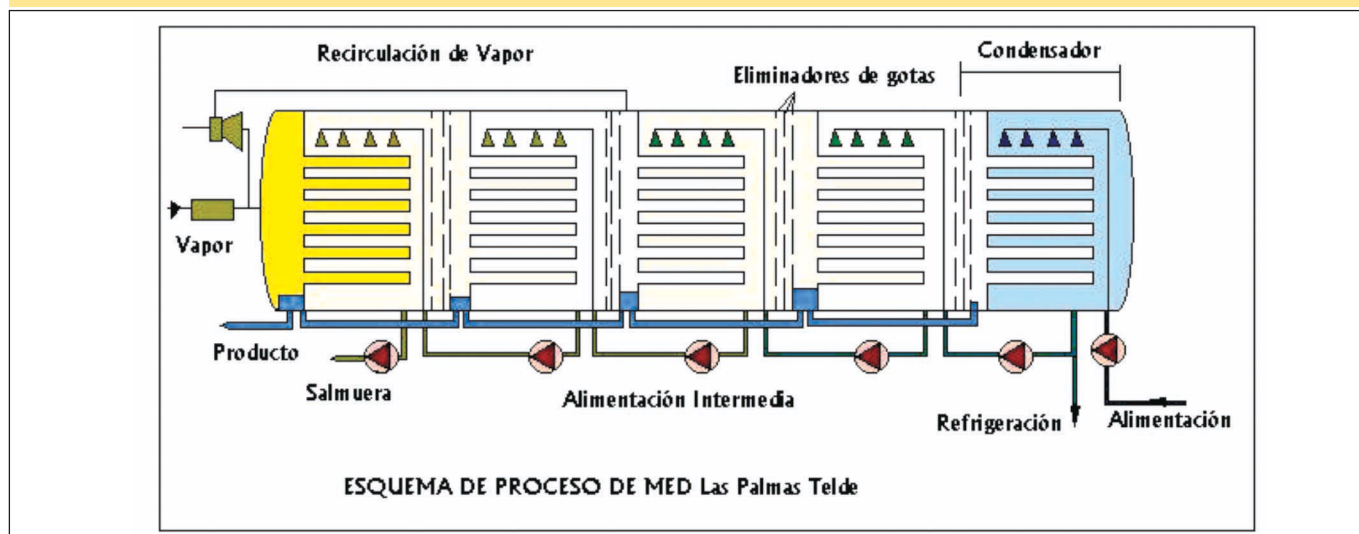
Réglage du pH

L'eau de mer a un pH élevé, autour de 8. À ces valeurs, le risque de précipitation de sels est élevé. Afin d'éviter la précipitation des sels peu solubles, principalement des carbonates et des sulfates de calcium, on réalise une acidification de l'eau d'alimentation du système, généralement par addition d'acide sulfurique concentré.

Traitement anti-incrustations

Les solides en suspension et dissous contenus dans l'eau de mer peuvent se précipiter dans les tubes des échangeurs. Ces dépôts peuvent être mous du type boue ou durs de type alcalin ou par précipitation du sulfate de calcium. Les additifs inhibiteurs sont composés d'une préparation à base de polyphosphates qui permettent de

Schéma d'un procédé D.E.M. (Station Las Palmas –Telde)



travailler à des températures s'élevant jusqu'à 90°C.

Dégazage / décarbonatation

L'équipement d'élimination des gaz dissous dans l'eau d'alimentation est normalement composé d'une tour jointée avec une purge d'air. L'eau est alimentée en cascade sur la couche jointée. À la sortie de la tour, on place un condenseur d'où l'on extrait les gaz au moyen d'un éjecteur de vapeur.

Évaporateur DEM

Comme on l'a déjà indiqué, le système d'évaporation DEM se compose d'un nombre d'effets ; les plus chauds se dénomment de récupération de chaleur et les plus froids de rejet de chaleur, comme dans les DF.

La section de rejet de la chaleur se refroidit directement avec de l'eau de mer sur les tubes où se condense la vapeur produite au cours des étapes précédentes ou de récupération de chaleur.

La vapeur de la source extérieure alimente la première étape de récupération de chaleur, qui est la plus chaude. L'eau qui est pulvérisée dans les étapes de récupération de chaleur est à une température supérieure à celle du rejet puisque c'est là qu'elle s'est chauffée.

Effets de récupération de Chaleur

Tel qu'on l'a dit, chaque effet est formé d'une chambre d'évaporation où se trouve le système de tubes par lesquels circule la vapeur. Dans la chambre, il se produit un certain degré de vide qui permet que l'évaporation ait lieu à une température plus basse. Le vide dans chaque chambre se maintient grâce à une fermeture hydraulique. L'eau d'alimentation est introduite sous forme de pluie formant une fine pellicule ininterrompue sur la superficie extérieure des tubes par lesquels circule la vapeur. Dans chacun des effets, une partie du liquide s'évapore en entrant en contact avec la surface chaude des tubes et une autre petite partie s'évapore soudainement en trouvant dans la chambre une pression inférieure à celle de la vaporisation pour sa température.

La vapeur produite passe par un éliminateur d'humidité ou « demister ». Une partie de cette vapeur se condense dans un préchauffeur et cède sa chaleur latente à l'eau d'alimentation. La partie non condensée sert comme vapeur de chauffage pour alimenter l'effet suivant.

La vapeur condensée à l'intérieur des tubes est récupérée comme courant de produit circulant à travers les différents effets. La saumure, de plus en plus concentrée, est pompée depuis la partie inférieure de la chambre vers le suivant groupe d'effets.

Condenseur à Rejet de Chaleur

Chaque effet se compose d'une chambre semblable à celle de la récupération de chaleur. La différence est que dans le condenseur circule de l'eau de mer qui refroidit la chaleur rejetée par le processus et qui augmente d'environ 10 degrés. À la sortie du condenseur, le débit d'eau de mer se divise en deux courants. Une partie

retourne à la mer, tandis que l'autre part alimenter le groupe d'effets évaporateurs plus froids.

Système d'évacuation de gaz non condensables

Le processus DEM opère à vide et a donc besoin d'évacuer continuellement les gaz non condensables qui s'accumulent dans les effets d'évaporation-condensation.

Ces gaz non condensables (GNC) sont évacués de chaque effet vers un collecteur commun qui est relié au condenseur de l'unité DEM. Du condenseur de l'unité, les gaz non condensables sont évacués au moyen d'un système d'éjecteurs de vapeur et de condenseurs à l'atmosphère.

Le vide à chaque étape est défini par la température de l'eau de circulation et par la perte de pression. La différence de vide entre étapes se maintient au moyen d'une fermeture hydraulique dans le circuit de l'eau salée qui est en train de s'évaporer.

Ejecteur de démarrage initial

L'évacuation initiale de l'unité DEM est effectuée par un éjecteur de vapeur qui évacue l'air de l'intérieur de toute la station équilibrant la pression de la station à la pression d'opération du condenseur de l'unité. En arrivant à cette pression, l'éjecteur initial s'arrête et le système d'évacuation des gaz non condensables démarre.

6. ELECTRODIALYSE REVERSIBLE

6.1. Effets d'un potentiel de C.C. sur les IONS

L'électrodialyse (E.D.) est un procédé de séparation électrochimique dans lequel les ions sont transférés à travers des membranes d'une solution moins concentrée vers une autre de plus haute concentration, comme résultat d'un courant électrique continu.

Pour comprendre ce procédé plus clairement, il est important de connaître l'effet d'un courant continu sur une solution ionique. Supposez un réservoir rectangulaire, figura 6.1, avec une électrode à chaque bout et rempli d'une solution de chlorure de sodium (ClNa).

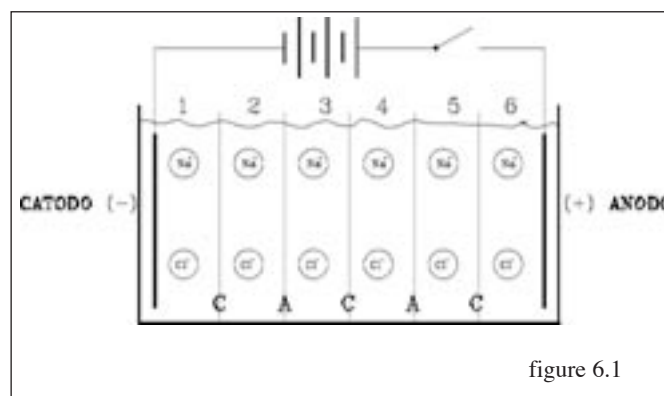
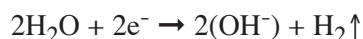


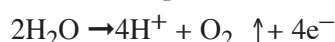
figure 6.1

Lorsqu' on applique un potentiel de C.C. aux électrodes, voici ce qui arrive :

1. Les cations (Na⁺) sont attirés vers l'électrode négative appelée cathode.
2. Les anions (Cl⁻) sont attirés vers l'électrode positive appelée anode.
3. Dans la cathode a lieu une réaction de dissociation de l'eau, en relation avec le gain d'électrons (réduction)



4. Dans l'anode a lieu une réaction de dissociation de l'eau, en relation avec la perte d'électrons (oxydation)



5. Dans l'anode il peut également y avoir une réaction de formation de gaz chlore



6.2. Effets des membranes anioniques et cationiques

Pour contrôler le mouvement des ions dans le réservoir qui contient la solution ionique et les électrodes, on peut placer plusieurs membranes formant des compartiments étanches (voir figure 6.2.).

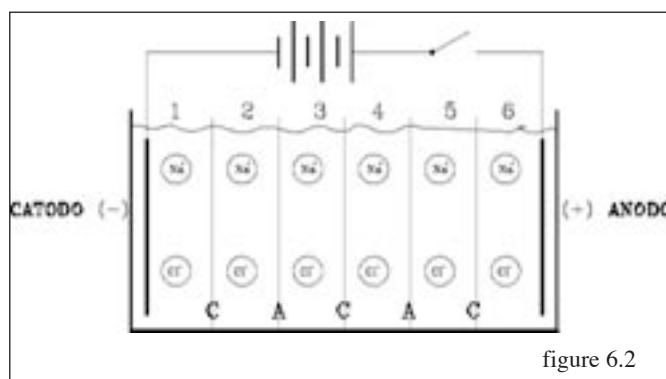


figure 6.2

Dans cette illustration, on utilise deux types de membranes:

1. Membrane de transfert anionique: qui permet seulement le passage des ions chargés négativement. Cette membrane est électriquement conductrice et imperméable à l'eau sous pression (signalée comme A sur la figure 6.2.)
2. Membrane de transfert cationique: qui permet seulement le passage des ions chargés positivement. Cette membrane est également électriquement conductrice et imperméable à l'eau sous pression. (Signalée comme C sur la figure 6.2)

Sur la figure 6.2., on applique aucun potentiel de C.C. et il n'y donc pas de transfert ionique. La figure 6.3. montre ce qui se passe lorsqu'on applique un potentiel de C.C.

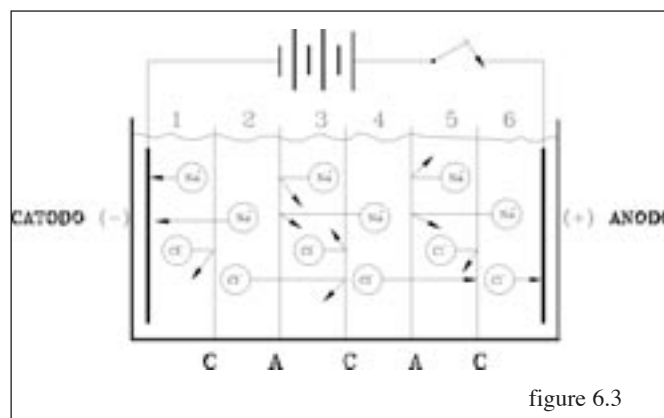


figure 6.3

a) Compartiments 1 et 6:

Ces compartiments sont les seuls à contenir les électrodes métalliques.

Dans l'anode se produisent du chlore gaz et de l'oxygène, ainsi que les ions H⁺.

Dans la cathode ou électrode négative, il se produit du gaz hydrogène et des ions OH⁻.

b) Compartiment 2:

1. Les ions de Cl⁻ passent à travers la membrane anionique (A) vers le compartiment 3.
2. Les ions de sodium (Na⁺) passent à travers la membrane cationique (C) vers le compartiment 1.

c) Compartiment 3

1. Les ions Na⁺ ne peuvent pas passer par la membrane anionique et restent dans le compartiment 3.
2. Les ions Cl⁻ ne peuvent pas traverser la membrane cationique et restent dans le compartiment 3.

d) Compartiment 4

1. Les ions Cl⁻ passent à travers la membrane anionique jusqu'au compartiment 5
2. Les ions Na⁺ passent à travers la membrane cationique jusqu'au compartiment 3

e) Compartiment 5

1. Les ions Na⁺ ne peuvent pas passer à travers la membrane anionique et restent dans le compartiment 5.
2. Les ions Cl⁻ ne peuvent pas passer par la membrane cationique et restent dans le compartiment 5.

L'effet total montre que les compartiments 2 et 4 se sont vidés d'ions, tandis que ceux-ci se sont concentrés dans les compartiments 3 et 5.

Comme le montre la figure 6.3., On a formé des compartiments alternés de solutions concentrées et déminéralisées dans cette cellule à membranes, lorsqu'on a appliqué à travers ses électrodes un potentiel de C.C. Lorsqu'ils se connectent de façon appropriée, cette unité donnera comme résultat deux flux principaux

et séparés; des eaux déminéralisées et concentrées, et deux flux moins importants dans les compartiments des électrodes. Dans des applications normales, on unit plusieurs centaines de ces compartiments déminéralisés et concentrés dans une “pile ou tour de membranes” pour obtenir le débit d’eau recherché. Ces piles à membranes sont le cœur d’un système de E.D.

6.3. Différence entre la E.D.R. et d’autres processus de membranes

- 1) Elle utilise de l’énergie électrique directe et non pas de l’énergie de pression.
- 2) Les membranes de E.D. sont imperméables.
- 3) Le dessalement est effectué par déplacement des ions du fluide à traiter, puisqu’ils passent à travers la membrane.
- 4) Le processus ne requiert pas d’énergie de pression. Dans la pratique, il faut fournir au fluide la perte de charge à travers l’équipement (Max. 3,5 kg/cm²)
- 5) Les membranes sont de deux sortes: Cationiques, chargées négativement et anioniques, chargées positivement.
- 6) La consommation énergétique est directement proportionnelle à la quantité de sels déplacés.
- 7) Le déplacement maximum de sels par étape est de 40 à 50%.
- 8) Il ne déplace que les particules ayant une charge électrique.
- 9) Les pertes en eau sont très basses, variant entre 5 et 20%.
- 10) L’utilisation de produits chimiques n’est généralement pas nécessaire
- 11) Si des produits chimiques sont nécessaires, on ne les ajoute pas au fluide à dessaler mais au circuit auxiliaire de saumure ce qui fait que les quantités à utiliser sont toujours très inférieures à celles d’autres systèmes.
- 12) Les besoins de prétraitement sont très peu puisque les membranes sont très résistantes aux oxydants et à l’encrassement organique, et c’est pourquoi l’on obtient de très bons résultats dans le traitement des effluents de stations d’eaux résiduelles.
- 13) Les membranes admettent un niveau continu de chlore libre résiduel de jusqu’à 0,3 ppm, et des valeurs de pH entre 1 et 10.
- 14) La saumure peut travailler avec des indices de Langelier positifs jusqu’à 1,8 et des niveaux de saturation de sulfate calcique de 150% sans addition de produits chimiques. Avec de petites additions d’hexamétaphosphate dans le circuit auxiliaire de saumure, peuvent atteindre des saturations de jusqu’à 400%.
- 15) Le coût de l’installation est normalement plus élevé et celui de l’opération est moindre, le coût total dans la plupart des cas étant plus bas que celui de l’osmose inverse.

- 16) Le design des systèmes de E.D.R. permet de nettoyer les membranes de trois façons:
 - a) Continuellement par changement de polarité.
 - b) Périodiquement par nettoyage chimique.
 - c) Occasionnellement, et si nécessaire par démontage et nettoyage manuel des membranes individuellement.
- 17) La production de chlore gaz comme sous-produit génère une économie extra dans les usages non agricoles.
- 18) Il est insensible à la quantité de silice se trouvant dans l’eau brute.

6.4. (La pile à membranes)

Le bloc de construction de base d’un système de E.D. est la pile à membranes.

6.4.1. Caractéristiques physiques

Si l’on fait tourner sur un bout le réservoir multicompartiments utilisé dans le chapitre précédent (figure 6.2), nous aurons l’orientation normale d’une pile à membranes (figure 6.4)

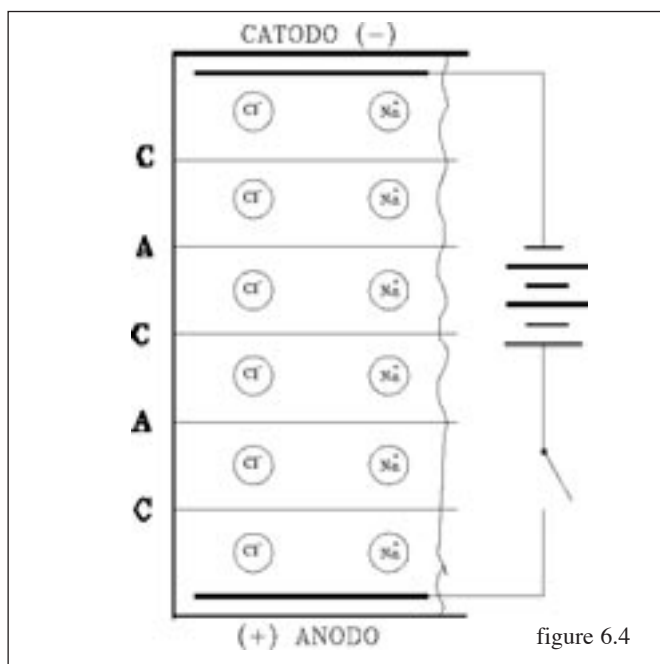


figure 6.4

Après un examen plus attentif, on peut voir dans la pile une succession de membranes anioniques et cationiques. Les espaces entre les membranes représentent les chemins des flux concentrés et déminéralisé formés par des séparateurs en plastique, appelés espacements de flux concentré et déminéralisé respectivement. Ces espacements sont faits de polyéthylène à faible densité et sont disposés dans la pile de telle façon que tous les flux déminéralisés sont en contact entre eux et que tous les flux de concentrés le sont également entre eux.

Une section répétitive, appelée “couple de cellule”, est composée de:

- Une membrane de transfert cationique
- Un espacement de flux d'eau déminéralisée
- Une membrane de transfert anionique.
- Un espacement de flux d'eau concentrée.

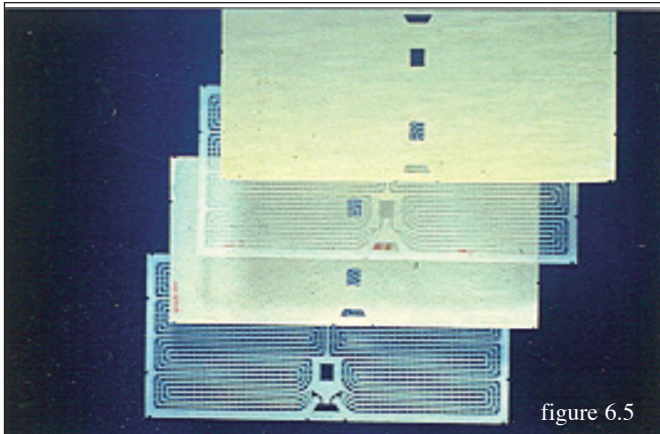


figure 6.5

Une pile typique peut avoir entre 300 et 600 couples de cellules.

Un courant d'eau entre dans la pile et coule en parallèle, seulement par les compartiments de déminéralisation, tandis que l'autre courant, entre dans la pile à membranes et coule en parallèle seulement à travers les compartiments de concentration.

On doit remarquer que les flux d'eau coulent entre les membranes et nous à travers elles. Quand les flux d'eau passent entre les membranes, les ions sont électriquement transférés à travers les membranes, depuis le courant déminéralisé au courant concentré sous l'influence du potentiel de C.C.

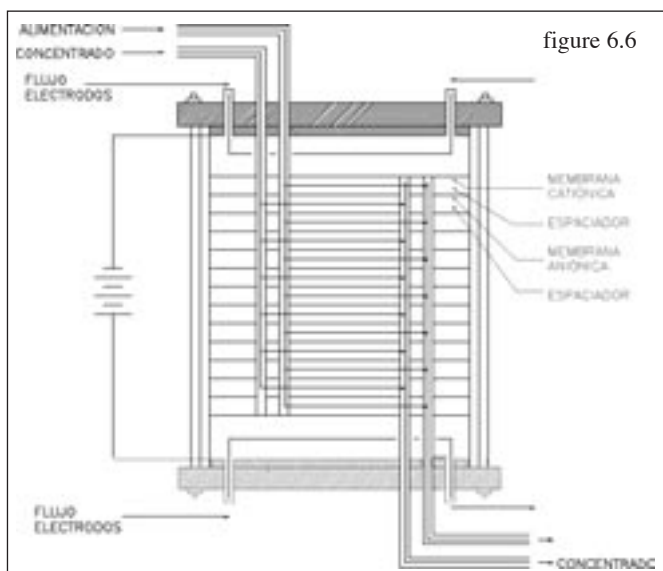


figure 6.6

L'eau des compartiments des électrodes ne se mélange pas aux courants de déminéralisé ni de concentré. Après être sorti de la pile, le flux combiné d'électrodes est envoyé à un dégazeur.

On montre également dans la figure 6.6. les plaque supérieure et inférieure qui sont en acier, et qui sont utilisées avec des tirants pour comprimer la pile entière, en scellant ainsi les membranes et les espacements pour procurer des chemins de concentré et de déminéralisé et éviter les fuites latérales d'eau dans les piles.

6.5. Membranes

6.5.1. Membranes cationiques

La membrane cationique est, essentiellement, une résine échangeuse d'ions, fabriquée sous forme de lamelle, avec une épaisseur d'environ 0,5 mm. Les propriétés essentielles des membranes cationiques sont :

- Essentiellement imperméables à l'eau sous pression
- Électriquement conductrices
- Elles transfèrent seulement les cations et rejettent les anions

6.5.2. Membrane anionique

La membrane anionique est essentiellement une résine échangeuse d'ions fabriquée sous forme de lamelle, avec une épaisseur d'environ 0,5mm. Les trois propriétés essentielles des membranes anioniques sont :

- Essentiellement imperméables à l'eau sous pression
- Électriquement conductrices
- Elles transfèrent seulement les anions et rejettent les cations.

6.6. Espacements

Les espacements sont formés par deux feuilles de polyéthylène à faible densité, avec les orifices que forment les collecteurs qui s'alignent avec les collecteurs des membranes. Lorsqu'une pile à membranes est montée correctement, les orifices des collecteurs dans les membranes et les espacements, forment des tubes verticaux dans la pile. L'eau entre dans un espacement entre deux membranes par les chemins du flux qui sont connectés avec les orifices collecteurs de sortie. Il existe deux coupures dans les orifices de l'espacement qui canalisent sélectivement le flux de l'eau entre les membranes. pour former deux courants séparés de concentré et de déminéralisé.

Les deux types d'espacements sont montrés sur les figures 6.7 et 6.8.

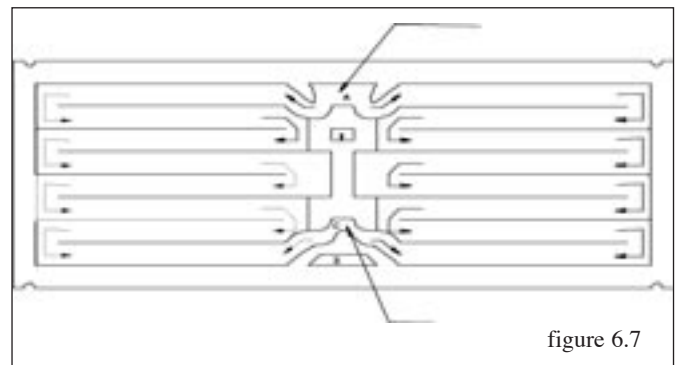


figure 6.7

La figure 6.7 montre l'eau entrant dans l'orifice "A". L'eau coule à travers l'espace, comme l'indiquent les flèches, et sort par l'orifice "C".

Dans la figure 6.8, on apprécie que l'eau entre par le collecteur A, rencontre un espace étanche alentour et ne peut donc s'écouler par l'espace et continue son chemin vers le suivant espace. Même chose dans le collecteur C.

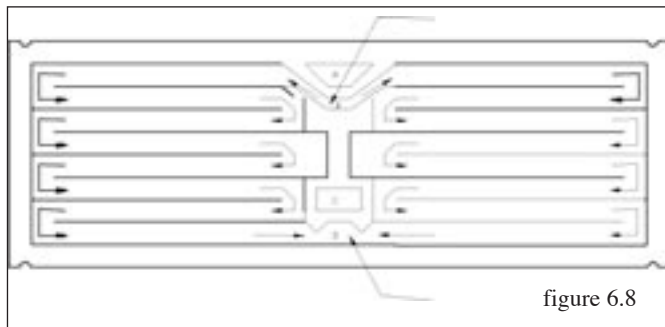


figure 6.8

On observe également que l'eau qui entre par le collecteur B, se trouve obligée de se diviser en deux flux, ainsi que l'indiquent les flèches et après avoir parcouru l'espace, elle sort par le collecteur D.

Supposez que l'espace 4.6, est dans un compartiment déminéralisé et que l'espace 4.5, dans un compartiment concentré. Les deux flux entrant, parcourront la pile verticalement, le déminéralisé par le canal B et le concentré par le canal A. Lorsque le flux de déminéralisé rencontre un espace disposé comme dans la figure 4.6, il se verra obligé de passer entre deux membranes dans son chemin de sortie vers le collecteur D, tandis que le flux de concentré, rencontrant un espace étanche autour de lui ne pourra couler et suivra son chemin vers le suivant espace. Voyons maintenant ce qui se passe dans un compartiment de concentré.

Supposons un autre espace, identique au précédent, mais que nous avons tourné horizontalement de 180°, c'est-à-dire d'un demi-tour sur un plan horizontal.

Maintenant nous nous trouvons dans un compartiment de concentré et puisque nous avons tourné l'espace, le flux qui parcourt maintenant le chemin fait dans l'espace, est le flux qui entre par le collecteur trapézoïdal D, sortant par le collecteur rectangulaire B, tandis que le flux qui entre par le collecteur rectangulaire C, ne peut pas couler et poursuit son chemin vers le suivant espace.

De cette façon. En disposant alternativement les espaces, nous maintiendrons les flux de concentré et de déminéralisé séparés les uns des autres si à l'entrée et à la sortie avec un seul type d'espace, en évitant d'avoir à fabriquer deux types différents d'espaces.

6.7. Electrodes

Les électrodes métalliques situées aux extrêmes supérieur et inférieur de la pile, sont utilisées pour

conduire le courant continu. Une électrode est normalement en titane recouvert de platine. L'apparence physique d'une électrode, par rapport aux collecteurs, peut varier selon la position de l'électrode dans la pile.



figure 6.9

La vie d'une électrode dépend généralement de la composition ionique du flux par électrode et de l'ampérage transporté par unité de surface de l'électrode. En général, de forts ampérages et de l'eau avec un contenu élevé de chlorures ou tendance à l'incrustation, tendront à raccourcir la vie de l'électrode.

6.8. Membranes

On utilise deux types de membranes dans les processus de E.D., les membranes de transfert anionique et cationique. Chaque membrane à l'apparence physique d'une lamelle en plastique, elle est essentiellement imperméable à l'eau sous pression, et elle est renforcée par un tissu de fibre synthétique.

6.8.1. Membrane anionique

Durant la production de la membrane anionique, les charges positives se fixent sur la membrane matrice. Ces charges positives fixées proviennent d'ions ammonium quaternaire qui repoussent les ions positifs et permettent le transfert des ions négatifs à travers elle.

6.8.2. Membrane cationique

Durant le processus de production d'une membrane cationique des charges négatives se fixent sur toute la membrane. Les charges négatives fixées sont des groupes de sulfonates qui repoussent les ions négatifs et permettent le passage d'ions chargés positivement.

6.8.3. Propriétés des membranes

Certaines propriétés sont typiques des deux membranes, anioniques et cationiques:

- Faible résistance électrique
- Insolubles en dissolution aqueuse
- Semi-rigides pour faciliter leur manipulation durant le montage

- Résistance au changement de pH de 1 à 12
- Opération à des températures pouvant atteindre 46°C
- Résistantes à la pression osmotique quand elles travaillent entre des solutions salines de 220 et 30.000 ppm
- Prévision de longue vie
- Imperméables à l'eau sous pression

6.9. Espacements

Les espacements forment les chemins des flux de déminéralisé et de concentré à l'intérieur de la pile. Dans la figure 6.10, on montre le chemin complet du flux.

Dans la figure, le flux entrant dans l'espacement par le collecteur A, se divise en deux flux symétriques B et C, qui se divisent à leur tour en trois ou quatre flux parallèles, qui parcourent leurs chemins dans l'espacement jusqu'à atteindre le collecteur de sortie D

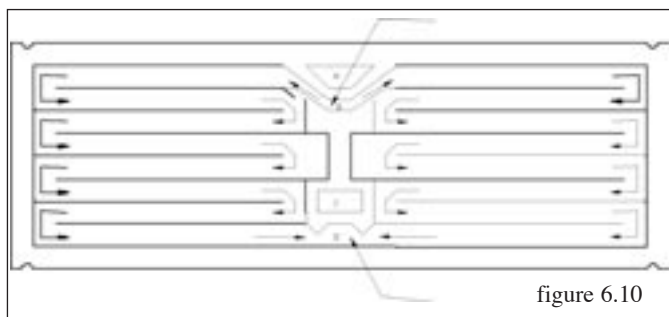


figure 6.10

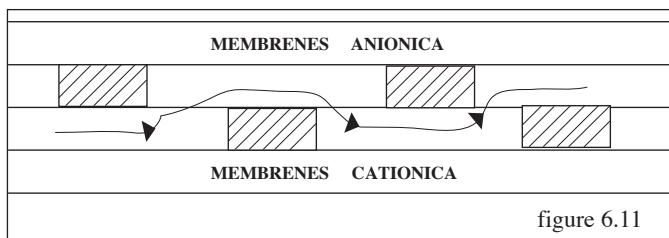


figure 6.11

La figure 6.11 montre une coupe en section d'un espacement illustrant le flux autour des barrières croisées.

Ce diagramme montre un espacement entre deux membranes pour former un compartiment de flux. La turbulence créée dans le flux par les barrières croisées, favorise le mélange, ce qui aide au transfert des ions à la superficie de la membrane

6.10. Electrolyse réversible (E.D.R.)

Les systèmes d'électrodialyse réversible (E.D.R.) sont conçus pour produire de l'eau déminéralisée sans addition constante de produits chimiques durant l'opération normale, ce qui élimine donc le plus grand problème posé par les systèmes unidirectionnels. Le système E.D.R. utilise l'inversion de la polarité électrique pour contrôler continuellement les incrustations et l'encrassement des membranes.

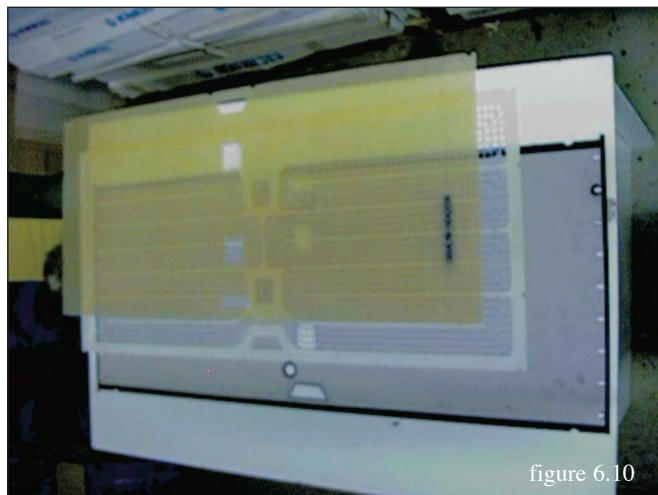


figure 6.10

Dans ce système, la polarité des électrodes est inversée 3 ou 4 fois chaque heure.

Cela inverse la direction du mouvement des ions dans la pile à membranes, contrôlant de cette façon la formation de la pellicule d'encrassement et la formation d'incrustations. Cela est montré dans la figure 6.13, où la polarité des électrodes de "A" est opposée à "B".

Dans un système courant, l'inversion a lieu environ toutes les 15 minutes et se vérifie automatiquement.

On peut voir sur la figure 6.13 qu'après l'inversion, les flux qui occupaient avant les compartiments déminéralisés, deviennent des flux concentrés et les flux qui occupaient avant les compartiments de concentré, arrivent maintenant à être déminéralisés. Donc, dans l'inversion, les soupapes opérées automatiquement changent les deux flux d'entrée et de sortie, de façon que l'eau d'alimentation qui entre coule dans les nouveaux compartiments déminéralisés et le flux de concentré coule dans les nouveaux compartiments de concentré.

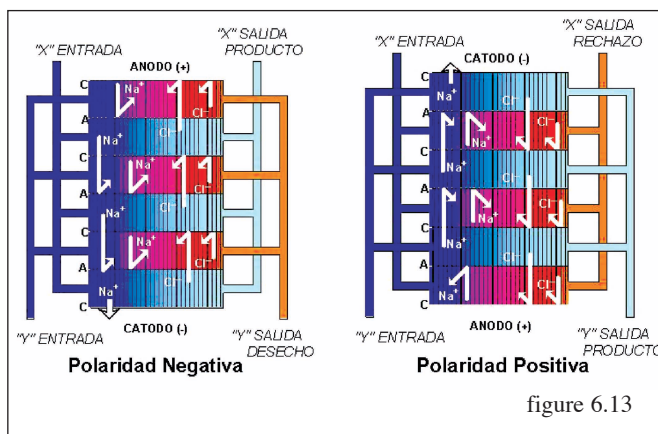


figure 6.13

A cause de l'inversion, aucun compartiment de flux de la pile n'est exposé à de hautes concentrations pour une période de plus de 15 ou 20 minutes de suite. N'importe quel commencement de formation de sels se dissout rapidement et est chassé à l'extérieur lorsque le cycle est

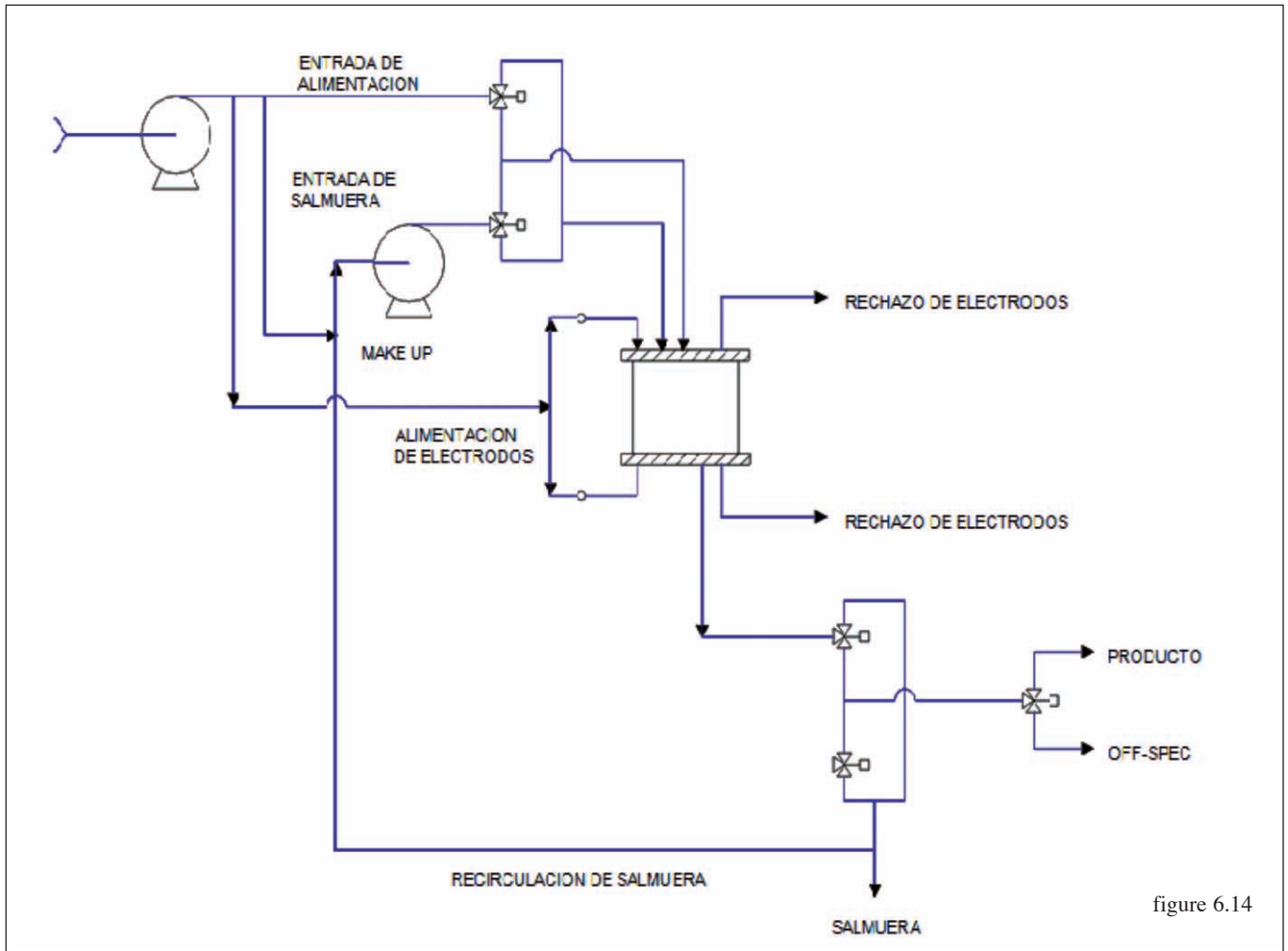


figure 6.14

inversé. La figure 6.14 est un diagramme de flux E.D.R. typique.

En résumé, le procédé de E.D.R. a cinq effets positifs sur un système de membranes :

- Il casse la couche de polarisation 3 ou 4 fois toutes les heures, évitant ainsi les incrustations et les polarisations
- Il casse les incrustations récentes et les élimine avant qu'elles ne puissent s'étendre et donner lieu à des problèmes.
- Il réduit l'encrassement ou des formations semblables sur la superficie des membranes.
- Il élimine l'exigence d'une alimentation continue en acides ou autres produits chimiques.
- Il nettoie automatiquement les électrodes avec de l'acide formé durant l'étape anodique.

7. FONDEMENTS DE L'OSMOSE INVERSE

7.1. Osmose Inverse

L'osmose est un phénomène naturel qui a lieu dans toutes les cellules vivante et qui est le fondement de la

vie sur la Terre.

Le processus de l'osmose se vérifie dans les membranes dites osmotiques, telles que les membranes cellulaires, la peau des fruits, les racines, etc.

Dans ce processus, ces membranes, également dénommées semi-perméables, possèdent la caractéristique de permettre le passage à travers elles, seulement de l'eau et non pas des autres substances comme les sels.

Une autre caractéristique est que le passage de l'eau depuis le côté où la concentration de sels est plus faible, vers le côté où la concentration est plus haute. Ceci explique pourquoi une plante arrosée avec de l'eau très salée sèche, car la concentration de sels dans le terrain est plus grande que celle de la sève de l'intérieur de la racine. Il se passe que non seulement il n'entre pas d'eau à l'intérieur de la plante, mais au contraire, celle qui se trouve dans la plante en sort vers le terrain.

7.2. Pression osmotique

Si nous plaçons une membrane osmotique entre deux colonnes remplies de liquides de différente concentration, nous verrons que l'eau commence à passer de la colonne de moindre concentration à celle de plus forte concentration, et donc le niveau d'eau descend

dans une colonne tandis qu'il monte dans l'autre. Après un certain temps, le processus s'arrête.

La différence de niveau d'eau entre les deux colonnes est appelée pression osmotique et a une valeur fixe qui dépend de la différence de concentrations entre les deux fluides. Par exemple, la pression osmotique de l'eau de mer est de 26 kg/cm^2 , ou ce qui revient au même, la différence de hauteur entre colonnes serait de 260 m.

Donc une membrane osmotique se comporte comme une pompe à pression variable.

Logiquement, le processus de l'osmose naturel n'a aucun intérêt industriel, car l'eau de bonne qualité se mélange à celle de haute concentration et l'objectif est d'extraire l'eau pure de la solution saline. C'est pourquoi nous devons inverser le processus et c'est ce que l'on dénomme comme osmose inverse.

Pour y arriver, il faut seulement appliquer une pression sur le fluide concentré, pour compenser la pression osmotique créée par la membrane.

Si la pression appliquée est plus faible que la pression osmotique, nous freinerons le processus mais nous ne l'éviterons pas, lorsque la pression appliquée sera égale à la pression osmotique, le processus se détient et il n'y a pas de transfert d'eau dans aucun sens, mais si nous appliquons une pression plus élevée, nous verrons maintenant que l'eau commence à passer en sens contraire, depuis la solution saline vers celle de plus basse concentration.

Nous avons donc déjà un système qui nous permet d'obtenir de l'eau douce à partir de l'eau de mer ou de toute autre solution concentrée.

7.3. Comportement de la membrane

Les membranes d'osmose possèdent un triple comportement, selon les caractéristiques des substances présentes dans le fluide à traiter.

La membrane discerne les particules chargées des non chargées.

Parmi les particules chargées, elle discerne également les ions des molécules bipolaires.

Pour comprendre la façon d'opérer d'une membrane, nous pouvons utiliser l'exemple des deux soupapes, c'est-à-dire que le passage de l'eau et des sels à travers la membrane se réalise au moyen de deux soupapes indépendantes par l'une desquelles passe l'eau et par l'autre les sels.

Il faut tenir compte que les membranes ne sont pas parfaites et permettent le passage d'une petite quantité de sels (0,2%)

La soupape de passage de l'eau est réglée de façon directe par la pression nette, c'est-à-dire la différence entre la pression appliquée et la pression osmotique. Cette pression nette est celle qui produit le travail, puisque de la pression appliquée, on perd une quantité

égale à la pression osmotique, dont l'énergie est utilisée pour compenser la pression générée par la membrane en sens contraire.

Donc plus la pression appliquée est élevée, plus on ouvre la soupape et par conséquent, la membrane produit un plus haut débit.

Afin de produire la plus grande quantité possible d'eau, on essaie d'obtenir la plus grande pression nette possible. Ainsi, par exemple, dans l'eau de mer ou la pression osmotique est de 26 kg/cm^2 , on utilise des pressions d'alimentation entre 60 et 70 kg/cm^2 , ce qui équivaut à des pressions nettes de 34 et 44 kg/cm^2 respectivement.

Cependant, la soupape de passage des sels est réglée par la différence de concentrations des fluides existants d'un côté et de l'autre de la membrane, c'est-à-dire que plus la salinité de l'eau à traiter est grande, plus s'ouvre la soupape et permet donc le passage d'une plus grande quantité de sels, en augmentant la concentration de l'eau produite.

Le fait que les deux soupapes soient réglées par des variables différentes, peut être à l'origine de six conditions différentes, qui rendent parfois difficile la compréhension de ce qui se passe et qu'on tire des conclusions erronées.

Le débit d'eau produite peut augmenter et en même temps la salinité de l'eau produit peut augmenter, baisser ou se maintenir et, inversement, le débit d'eau produite peut baisser et la salinité du produit peut également augmenter, baisser ou se maintenir.

7.4. Morphologie

Les membranes osmotiques sont homogènes, non poreuses, de façon que le mécanisme de transport se fait par diffusion.

Les membranes sont composées de trois couches, l'inférieure étant un tissu de support en polyester d'environ 120 microns d'épaisseur, par-dessus il y a une couche d'un substrat microporeux de "poli sulfone" d'environ 40 microns d'épaisseur et finalement la couche active, la membrane osmotique, faite de polyamide aromatique ou acétate de cellulose, d'une épaisseur de 0,4 microns.

7.5. Variables opératives

Les variables qui conditionnent l'opération des membranes sont:

La pression appliquée, le type de fluide à traiter, la température, le pH, la concentration saline de la solution et la récupération du système.

7.6. Systèmes à osmose inverse

Le procédé de conception d'un système à osmose inverse comporte trois pas essentiels :

- Sélection de la membrane

- Définition de la configuration de l'O.I. et des conditions d'opération
- Détermination des besoins de prétraitements.

7.6.1. Sélection de la membrane

Les caractéristiques des membranes dont il faut tenir compte pour leur sélection sont les suivantes:

- Superficie
- Perméabilité (litres /m² /heure)
- Rejet de sels
- Grosseur de l'espacement de saumure
- Charge électrique
- Matériel de la couche active

7.6.2. Définition de la configuration de l'O.I. et des conditions d'opération

- Les points à tenir en ligne de compte pour la configuration sont:
 - Nombre de membranes par tube
 - Nombre d'étapes
 - Nombre de passages
 - Nombre de tube par étape et par passage
 - Existence de repressurisation entre étapes
- Les conditions d'opération sont:
 - Pression d'opération
 - Flux moyen
 - Récupération
 - pH
 - Température
 - Conductivités d'alimentation, produit et saumure
 - Niveaux de saturation des sels.

7.6.3. Détermination des besoins de prétraitement.

- Ils varient en fonction des caractéristiques physico-chimio-biologiques de l'eau à traiter.
- Ils comportent fondamentalement des traitements de coagulation, filtration et conditionnement chimique.

7.7. Sections d'une Station d'O.I.

Les sections d'une Station d'O.I. sont:

- Captation
- Prétraitement
- Haute pression
- Récupération d'énergie
- Post-traitement
- Système de nettoyage
- Pompage du produit

7.8. Prétraitement

La conception du prétraitement est conditionnée par le type de captation utilisé.

La captation d'eau au moyen d'un puits, a besoin généralement d'un traitement très léger et dans quelque cas d'aucun, car le terrain tient le rôle de filtre.

Par contre, la captation en prise ouverte (Mer, fleuve, Barrage) requiert un traitement plus sophistiqué et logiquement une plus grande quantité d'équipement.

Il y a trois types de prétraitement, le physique, le chimique et le biologique. Le physique a pour objet l'élimination des particules en suspension présente dans l'eau, jusqu'à l'obtention d'un degré de saleté (S.D.I.) inférieur à 3.

(Le S.D.I., initiales anglaises de Silt Density Index, est une mesure du degré de saleté d'une eau et consiste en une épreuve normalisée, où l'on mesure les temps que met à passer un certain débit d'eau par une membrane de 0,45 microns de taille de pore)

La méthode physique employée le plus fréquemment est la filtration, aussi bien sur un lit filtrant qu'à travers des cartouches jetables. Dans des cas spéciaux, on a recours à l'éclaircissement/décantation.

On utilise l'addition d'un coagulant afin d'améliorer l'efficacité de la filtration. Les produits les plus utilisés sont des sels de fer.

La méthode chimique poursuit l'élimination du risque de précipitation des sels qui incrusteraient les membranes.

Les sels les plus communs qui peuvent apparaître comme incrustation sont: Carbonate de calcium, sulfate de calcium, sulfate de baryum, sulfate de strontium et silice

Les méthodes employées sont le ramollissement, la décarbonatation, l'acidulation et la séquestration.

La méthode biologique essaie de minimiser les effets de croissance bactérienne sur les membranes.

Les systèmes employés passent par l'application d'oxydants, de biocides et de radiations ultraviolettes

7.9. Section de Haute Pression

Elle est composée de la pompe à haute pression, le châssis de tubes de membranes et toutes les tuyauteries et soupapes d'interconnexion.

La disposition des châssis varie en fonction de l'application.

En eau de mer, nous avons une ou deux étapes et moins fréquemment deux passages, bien que, dernièrement, le nombre d'installation avec un deuxième passage ait tendance à augmenter, à cause des exigences au sujet du contenu en bore du produit.

En saumâtre, nous avons deux ou trois étapes et il n'existe pratiquement pas d'installations avec deux passages.

Quant à la pompe intermédiaire de repressurisation, son usage es quasi général dans les stations d'eau de mer à

deux étapes, mais rarement utilisée dans les eaux saumâtres.

7.10. Récupération d'énergie

Dans les Stations d'eau de mer principalement, où l'on travaille avec des pressions comprises entre 60 et 90 kg/cm², la récupération de l'énergie contenue dans le débit de rejet, est obligatoire pour des raisons énergétiques-économiques.

Au début, on utilisait des turbines Francis, avec des rendements très bas, de l'ordre de 65%, plus tard on a utilisé des turbines Pelton, avec des efficacités supérieures à 80%.

Récemment, ces dernières sont devenues également obsolètes grâce à l'apparition sur le marché des systèmes d'échange d'énergie (SIP), qui, outre des rendements supérieurs à 90%, ont, comme caractéristique, besoin d'une pompe à haute pression approximativement 50% plus petite que celle d'une Station conventionnelle, ce qui a signifié d'importantes réductions dans la consommation d'énergie.

7.11. Post-traitement

Les eaux destinées à la consommation, spécialement celles qui proviennent de l'eau de mer, ont un haut niveau d'agressivité, avec des indices de Langelier arrivant à -5, ce qui provoque l'apparition d' "eaux rouges", par la destruction des tuyaux métalliques.

Leur correction est donc nécessaire, par l'addition de produits chimiques qui élèvent le niveau d'alcalinité et de dureté, afin d'atteindre un indice de Langelier autour de 0, conformément à la législation actuelle.

Pour y arriver, la méthode la plus usuelle est l'addition de chaux et d'anhydride de carbone, bien que ces derniers temps, l'usage de la calcite s'impose à celui de la chaux, moins chère puisqu'elle a besoin de la moitié du CO₂ pour le même résultat.

7.12. Nettoyages

À plus ou moins grande échelle, toutes les membranes subissent un processus d'encrassement qui limite de plus en plus son efficacité.

Le résultat de l'encrassement se reflète dans la perte de débit et de qualité, ainsi que dans une augmentation de la quantité d'énergie consommée.

On vient donc à se poser la question : Quand et comment doit-on nettoyer ?

Pour ce qui est du quand, il y a beaucoup de règles, mais les plus utilisés sont :

- Lorsque le débit a baissé de 10%
- Lorsque la qualité a empiré de 10%
- Lorsque la pression différentielle a atteint 0,5 kg/cm² par élément.

Dans tous les cas, c'est l'opérateur avec son expérience

qui fixera le moment approprié pour l'effectuer.

Il est recommandable que dans des eaux de bonne qualité, on effectue un nettoyage par an.

Quant au comment, le type de nettoyage dépendra de la composition de l'encrassement.

Pour des encrassements de matières inorganiques, on utilise un lavage à bas pH à base d'acide chlorhydrique ou citrique.

Pour des encrassements organiques, on utilise un lavage à pH élevé à base de soude caustique, de détergent et un séquestrant.

De temps en temps, on peut aussi effectuer un lavage stérilisant à base de biocides

Le débit de lavage a une grande importance; il doit être de 10m³/heure par tube de pression.

Les temps de lavage varient en fonction du type de contaminant et de la sévérité de l'encrassement.

Normalement, les lavages acides sont courts, deux ou trois heures sont suffisantes, mais les lavages alcalins peuvent durer 24 heures.

L'équipement de lavage se compose essentiellement d'un dépôt de solution de lavage, une ou plusieurs pompes et un filtre à cartouches, travaillant en circuit fermé.

7.13. État de l'art

Durant ces dernières années, une série d'améliorations ont été apportées à pratiquement toutes les phases du processus.

- Prétraitement:
- Usage du concentré pour le contre lavage des filtres.
- Élimination des oxydants et réducteurs.
- Élimination de l'acide.
- Élimination des anti-incrustants et des dispersants.
- Membranes:
- Augmentation de la superficie.
- Augmentation de la perméabilité.
- Augmentation du rejet total de sels.
- Augmentation du rejet d'ions spécifiques comme le bore.
- Diminution de l'encrassement.
- Diminution de la consommation d'énergie:
- Grâce à des membranes plus perméables.
- Utilisation de système d'échange d'énergie
- Design de double étape, dont il existe différentes variantes (avec ou sans pompe intermédiaire, de basse ou de haute pression)

8. COÛT D'INVESTISSEMENT

Le coût d'Investissement de deux Stations égales sera différent en fonction principalement des caractéristiques de la prise d'eau de mer et de l'émissaire sous-marin de la saumure.

Les Installations d'Osmose Inverse réalisées par le Gouvernement Espagnol au cours de l'année dernière, affiche un coût moyen unitaire d'investissement de 1.200 €/m³.jour (www.acuamed.com)

Quant à l'installation DEM de 35.000 m³/jour, achevée aux Îles Canaries en 2005, son coût unitaire a été de 1.450 €/m³.jour, quoique ce chiffre se serve pas de comparaison, puisque cette installation n'a pas de prise d'eau de mer ni d'émissaire sous-marin de saumure, ce qui aurait évidemment augmenté le coût.

9. COÛT DE PRODUCTION

Le coût de production de 1m³ d'eau dépend principalement du coût de l'énergie et du personnel, ce qui fait que des Stations semblables dans des endroits différents auront des coûts différents, en fonction des coûts locaux de ces deux composantes.

Comme référence, nous exposeront les données réelles de production d'une Usine de Distillation à Effets Multiples de 35.000 m³/jour et d'une autre d'Osmose Inverse de 80.000 m³/jour situées aux Îles Canaries.

Usine d'O.I.:

Énergie électrique:	0,294 €/m ³
Personnel:	0,097 €/m ³
Sous-traitances:	0,054 €/m ³
Membranes:	0,020 €/m ³
Pièces Détachées :	0,018 €/m ³
Produits Chimiques:	0,024 €/m ³
Autres:	0,038 €/m ³
TOTAL:	0,545 €/m ³

Usine de DEM

Combustible:	2,587 €/m ³
Personnel:	0,134 €/m ³
Maintenance:	0,083 €/m ³
Produits Chimiques:	0,033 €/m ³
Autres:	0,064 €/m ³
SOUS-TOTAL:	2,901 €/m ³

Déduction pour vente

D'énergie Électrique:	-0,458 €/m ³
TOTAL	2,443 €/m ³

10. AVANTAGES, PROBLÈMES ET INCONVÉNIENTS

Les stations de Distillation ont comme unique avantage, la production d'une eau presque pure, valable pour usage industriel mais qui n'est pas apte à la consommation humaine, que l'on doit de préférence mélanger avec des eaux saumâtres ou reminéraliser avec de la calcite ou mieux encore avec de la dolomite.

Elles ont l'inconvénient d'un plus grand coût de production et d'Investissement face à celles d'Osmose Inverse et elles doivent nécessairement être installées à côté d'une Centrale Thermique.

Du point de vue environnemental, outre une plus grande production de CO₂, la saumure produit une contamination thermique dans la mer.

Les Stations d'Osmose Inverse, par contre, représente un coût d'investissement et de production plus bas, elles produisent moins de CO₂ et ne produisent pas de contamination thermique.

D'autre part, on peut les installer partout où il y a de l'énergie électrique.

EXPLOITATION DE RESSOURCES D'EAU SAUMATRE POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE : EXEMPLE DE L'INSTALLATION DE WADI MA'IN, ZARA, ET MUJIB, JORDANIE.

V. Bonnely¹

Résumé

Afin d'illustrer plus en détail les spécificités de ce traitement, le cas de l'installation de Wadi Ma'in, Zara, et Mujib est présenté. Cette installation de production d'eau potable est localisée en Jordanie, proche de la mer morte. L'eau traitée devant être acheminée jusqu'à Amman située à 40 km. Le débit de l'installation est de près de 130 000 m³/j., et représente 40% de la demande en eau d'Amman.

L'eau brute provient de trois ressources saumâtres, dont la salinité combinée est de l'ordre de 1500 à 2000 mg/L, donc impropre à la consommation humaine en l'état. Ces trois ressources sont aussi sujettes à des dégradations périodiques de la qualité de l'eau durant les pluies. Ces ressources en eau sont aussi caractérisées par une forte amplitude de variation de la température (15 à 45°C) et par une contamination bactérienne notable.

Le prétraitement conventionnel dimensionné en amont de l'osmose inverse comprend :

- une coagulation - floculation – décantation sur des décanteurs à lit de boue ;*
- une filtration sur filtres multimédias (sable-anthracite).*

Le traitement de dessalement comprend une passe d'osmose inverse caractérisée par un taux de conversion élevé (85-90%) sur une eau à forte teneur en silice.

Un post-traitement de reminéralisation permet de 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 ajout de CO₂ et de chaux ou de CO₂ suivi d'une filtration sur lit de CaCO₃.

La filière est complétée par une désinfection finale eau chlore. L'objectif de désinfection de la filière est de 5 log d'inactivation/d'élimination de virus et de 4 log d'inactivation/d'élimination de Cryptosporidium et Giardia, pour une salinité finale inférieure à 250 mg/L.

L'installation de traitement de Wadi Ma'in, Zara, et Mujib constitue l'une des installations de traitement d'eau saumâtre les plus importantes au monde en terme de capacité de traitement. Outre sa taille, le challenge de cette filière est de s'adapter à la grande variabilité de la ressource en termes de salinité/température, mais aussi de fiabilité de prétraitement.

INTRODUCTION

La recharge naturelle des ressources d'eau souterraines est impactée par la diminution des précipitations dans certaines régions. Cette diminution de l'alimentation, associée à une exploitation importante de cette ressource d'eau potable protégée, entraîne une augmentation de la salinité des eaux souterraines, les rendant impropre à la consommation. Dans d'autres régions, l'accroissement de la demande en eau potable conduit les gestionnaires de l'eau à se tourner vers des ressources d'eau saumâtre pour la production d'eau potable. Dans les deux cas, des traitements de dessalement peuvent être mis en œuvre pour la production d'eau potable à partir d'eau saumâtre, si les options de dilution ne sont pas possibles.

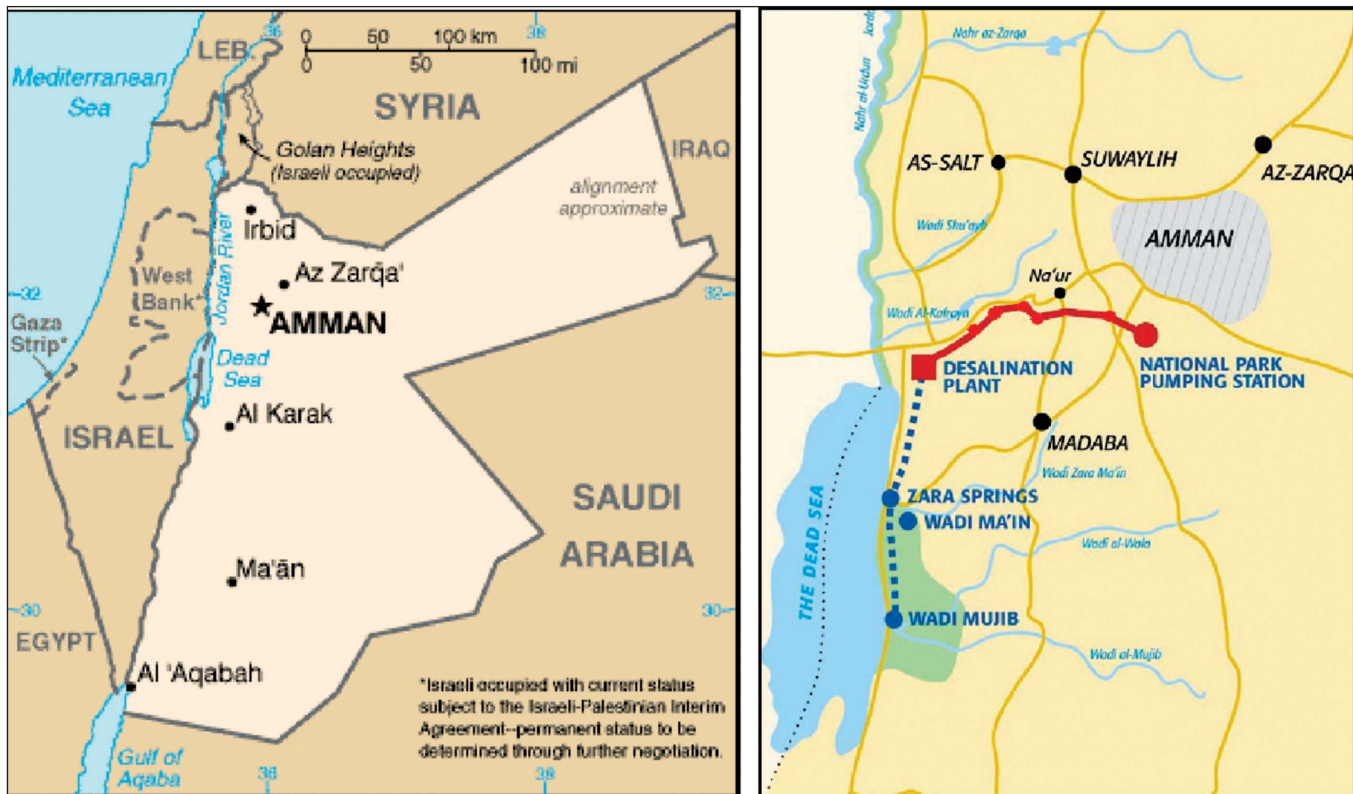
Les procédés de dessalement mis en œuvre dans le traitement des eaux saumâtres sont généralement basés sur l'osmose inverse. Similaire au procédé de dessalement d'eau de mer, l'osmose inverse d'eau saumâtre présente toutefois des spécificités liées aux

caractéristiques de la ressource et au taux de concentration appliqué. La qualité de l'eau à traiter est liée aux caractéristiques de la ressource : eau de forage, eau de rivière. La concentration en sels étant plus faible que dans le cas de l'eau de mer, les pressions mises en œuvre, et la consommation d'énergie qui en découle sont bien inférieures: ceci positionne le traitement des eaux saumâtres comme une solution de choix pour augmenter la ressource en eau douce.

L'étude de cas de l'installation de Wadi Ma'In, Zara et Mujib illustre parfaitement cette problématique. L'installation est située en Jordanie, pays soumis à un stress hydrique. La figure 1 présente une carte de la Jordanie, ainsi que la localisation de l'usine de production d'eau potable située à l'extrémité nord de la mer morte. L'eau traitée est délivrée à Amman, capitale de la Jordanie, située à 40 km du site de production.

1. Expert technique spécialisé dans le traitement d'eau potable, le dessalement et la réutilisation des eaux au sein de la Direction Technologie et Innovation de la Société Degremont, France. E-mail : veronique.bonnely@degremont.com

Figure 1 : Localisation de l'installation en Jordanie



La ressource en eau alimentant l'installation comprend la rivière Wadi Mujib (pour environ 50%), la rivière Wadi Ma'In Zarqa (38%) et la source chaude de Zara (12%). La valeur moyenne de salinité de l'ensemble de ces eaux combinées est de 1475 mg/L, pour une valeur maximum de 1980 mg/L. La qualité de l'eau de ces trois ressources est significativement différente, et les paramètres clés varient au cours du temps, notamment en fonction des épisodes pluvieux.

Au regard du traitement de dessalement, les caractéristiques de la ressource peuvent être résumées comme suit :

- ressources de surface à caractère colmatant élevé (SDI75% > 20),
- présence en concentration importante d'ions pouvant entraîner des risques de précipitation sur les membranes d'osmose inverse (silice, sulfate, baryum),
- présence de matière organique,
- forte variation de la température.

Ces facteurs techniques, combinés à une nécessité de rechercher un rendement de production élevé (de part la rareté de l'eau disponible et des besoins d'eau potable), font de l'installation de WMZJ un projet ambitieux pour le dimensionnement du prétraitement et de l'étape de dessalement.

L'objectif de traitement correspond aux normes d'eau potable jordaniennes (basées sur des données similaires à l'OMS et au standard Américain USEPA), complété de limites spécifiques en termes de :

- salinité totale : 250 mg/L
- capacité d'abattement de virus : 5 Log
- capacité d'abattement de Giardia et Cryptosporidium: 4 Log
- indice de Langelier de -1 à +1.

Enfin, afin de tenir compte de la localisation du site (bords de la mer morte) et de contraintes locales, des objectifs spécifiques de réductions des rejets, de fiabilité et de capacité d'extension ont aussi été pris en compte.

La ressource

L'installation de WMZM est alimentée par trois ressources pour une capacité totale de 55 millions de m³/an. Les principales caractéristiques du mélange d'eau peuvent être résumées comme suit :

- eau saumâtre de salinité moyenne 1.5 g/L
- faible turbidité pendant une partie du temps (<10 NTU), mais avec des excursions à plus de 40 NTU,
- importantes variations de température (15 à 40°C)
- présence significative de silice, de baryum et de strontium,

Tableau 1: principales caractéristiques de l'eau alimentant l'installation de WMZM

		Wadi Mujib	Zarqa Ma'In	Source chaude de Zara	Eaux combinées	Valeurs maximales
Ratio de capacité	%	50	38	12		
Température	°C	18-29	28-31	31-50	20-40	40
pH		8.2-8.3	8.2-8.3	6.65-8.2	7.9-8.3	8.3
Salinité	Mg/L	1050-1150	1650-1980	1420-1483	1300-1500	1980
Turbidité	NTU	sep-71	aoû-95	30-50	oct-80	180
Matières en suspension	Mg/L		1-550		1	550
Silice	Mg/L	13-21	28-31	18-28	19-26	32-41
Baryum	Mg/L		0.051-0.086		0.065	0.086
Strontium	Mg/L		1.8-14.5		6.83	14.5
Algues	cellules/mL		0-500		10	500

- risque de contamination de la rivière Wadi Ma'In Zarqa par des eaux résiduaires provenant d'une localité proche (Madaba, 80,000 habitants) et d'eau de ruissellement durant les épisodes pluvieux,

Les principaux paramètres caractérisant ces différentes ressources et mélange d'eaux sont résumés dans le tableau 1.

Ces valeurs proviennent du projet initial. Les points les plus notables résident dans la plage de variation de ces différents paramètres. L'emploi d'un prétraitement extrêmement robuste est apparu nécessaire pour faire face à ces eaux de caractéristiques changeantes.

Description de l'installation

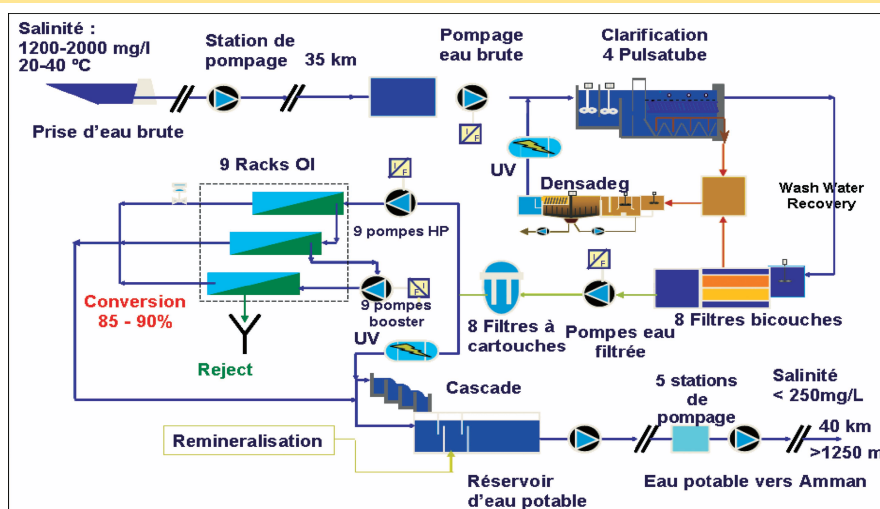
La filière de traitement a été dimensionnée afin de répondre aux objectifs suivants :

- atteindre les objectifs de qualité de l'eau potable recherchés,

- avoir un procédé fiable et robuste,
- optimiser le coût d'investissement et les coûts d'exploitation,
- maximiser la production de l'installation et réduire le volume de rejets,
- adaptabilité de l'installation aux caractéristiques d'eau variables,
- installation évolutive en termes de capacité de production.

Les objectifs principaux retenus à la base du dimensionnement du prétraitement sont ceux liés à la désinfection des eaux et à un objectif de qualité en amont de l'alimentation de l'osmose inverse. Bien que le traitement de dessalement par membrane soit efficace pour éliminer les sels, et donc les particules et micro-organismes, une approche multi-barrière a été appliquée. La filière de traitement est présentée dans la figure 2.

Figure 2 : Filière de traitement



Un décanteur à lit de boue pulsé équipé d'une séparation lamellaire (Pulsatube) permet d'assurer la coagulation-floculation-décantation (Figure 3) : le coagulant utilisé est du sulfate ferrique. Une pré-acidification avec de l'acide sulfurique est réalisée pour maintenir le pH optimum de coagulation de 6.9-7.2, pH optimum d'élimination de la matière organique, et afin de maintenir un résiduel de Fer dissous inférieur à 20 µg/L.

Figure 3: Décanteurs à lit de boues pulsé Pulsatube



L'étage de filtration est constitué d'un étage de filtres gravitaire bicouche (Figure 4), afin d'assurer la production d'une eau de faible turbidité en accord avec l'objectif de SDI inférieur à 3. L'eau de maturation (après le lavage des filtres) est recirculée en tête de l'usine. Une filtration de sécurité sur filtre à cartouches à usage unique est réalisée.

L'étape d'osmose inverse comprend 9 racks (Figure 5) dimensionnés en 3 étages avec une répartition 66/31/16 des tubes de pression, chacun équipé de 7 membranes de 8" de diamètre. Le dimensionnement a été optimisé en termes d'hydraulique et de choix du type de membrane d'osmose inverse pour faciliter la maintenance et réduire la consommation d'énergie (dimensionnement hybride comprenant des membranes résistantes au colmatage BW30-400FR, et des membranes à faible pression de fonctionnement LE-400).

La capacité de production maximale de l'installation est assurée avec 8 racks (7 racks pour la capacité moyenne), le 9^{ème} rack pouvant être arrêté pour les opérations de maintenance.

L'une des particularités de l'installation de WMZM est la grande variabilité de la qualité de la ressource alimentant l'installation. Cela se traduit au niveau de l'osmose inverse par une optimisation de la production en fonction des paramètres limitant. En pratique, un analyseur de silice permet d'ajuster le taux de conversion de l'installation et de limiter les pertes en eau tout en assurant un fonctionnement sécurisé au regard des risques de précipitation. Un retardateur de précipitation est utilisé en permanence, ajusté en fonction de la concentration en silice, de la salinité et de la température.

Le traitement de potabilisation comprend deux étapes :

Figure 4: Filtres bicouche Mediazur durant un lavage



Figure 5: Racks d'osmose inverse



- une reminéralisation de l'eau afin de limiter l'agressivité de l'eau produite : la reminéralisation est réalisée par ajout d'eau de chaux, le CO₂ étant produit lors de l'acidification de l'eau alimentant les racks d'osmose inverse,
- une désinfection finale de l'eau au chlore afin d'assurer une protection de l'eau vis-à-vis d'une contamination lors de sa distribution.

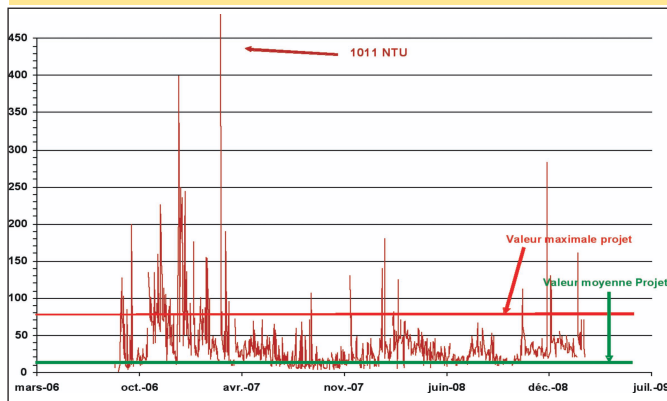
Résultats d'exploitation

La première eau produite par l'installation a été acheminée jusqu'à Amman en août 2006, les tests finaux de performances s'étant déroulés en mai 2007. Depuis cette date, l'installation est exploitée avec succès par les équipes de Degrémont.

La maîtrise de la qualité de l'eau alimentant une osmose inverse est un paramètre clé du fonctionnement des membranes de dessalement. Grâce à son prétraitement robuste, l'installation a pu faire face à des qualités d'eau extrêmement dégradées, avec des pointes de turbidité ayant dépassées 1000 NTU (Figure 6), le prétraitement

permettant de maintenir la valeur de SDI en dessous de l'objectif de 3 (Figure 7).

Figure 6: Turbidité de l'eau brute durant les premières années d'exploitation



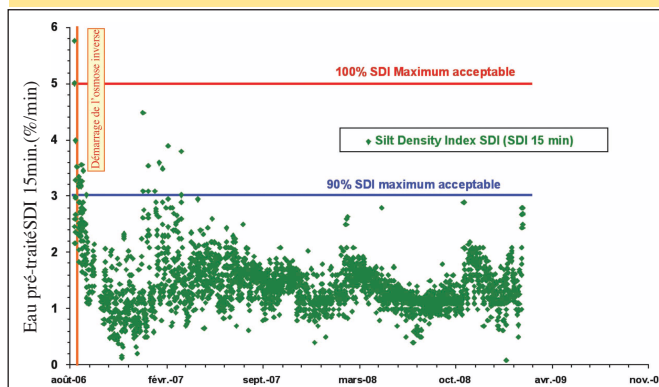
L'osmose inverse fonctionne régulièrement depuis la mise en route. La réalisation de lavages chimiques périodiques, en accord avec les bonnes pratiques d'exploitation, permet de maintenir les performances des membranes en termes de consommation d'énergie et de rejet de sels.

Le tableau 2 récapitule les résultats de qualités de l'ensemble de la filière de traitement.

CONCLUSION

L'installation de Wadi Ma'in, Zara, et Mujib est une des plus grandes installations de dessalement d'eau saumâtre. Le choix de la filière de traitement et de dimensionnement de chacune des étapes ont été réalisés afin de répondre aux exigences strictes du cahier des charges, ainsi qu'aux nombreuses contraintes techniques imposées par le site et par la ressource. On pourra citer

Figure 7: Qualité de l'eau prétraitée - Evolution du SDI en entrée osmose inverse.



en particulier la variabilité de la ressource, l'importance de minimiser les pertes en eau dans cette région particulièrement soumise au stress hydrique, et des besoins de flexibilité de cette installation.

Les principaux points forts de la filière choisie résident dans :

- un prétraitement robuste ayant démontré son efficacité sur des eaux brutes de qualité extrême,
- un ajustement de la conversion de l'étape de dessalement en fonction des paramètres limites de l'eau brute, afin de minimiser les pertes en eau du système,
- un fonctionnement automatisé poussé afin d'assurer une exploitation optimum en termes d'énergie et de disponibilité.

L'installation, exploitée par les équipes de Degrémont, fonctionne depuis plus de 2,5 ans, assurant la production d'eau potable pour une partie de la Ville d'Amman dans des conditions de sécurité sanitaires poussées.

Tableau 2 : Qualité de l'eau aux différentes étapes de traitement

Paramètres	Unités	Projet	Garanties	Performances (2,5 ans d'exploitation) (max., moyenne, min)
Eau brute				
Turbidité	NTU	7 – 180		2 – 38 – 1011
Conductivité	µS/cm	1 300 – 1 980		1555-2400-2970
Température	°C	20 - 40		18 – 28 – 36
Silice	mg/L	19 – 40		13 – 23 – 34
Eau décantée				
Turbidité	NTU	0,5 – 2		0,25 – 0,9 – 10
Eau filtrée				
Turbidité	NTU	0,1 – 0,3		0,01 – 0,04 – 0,3
SDI	%/min		90% < 3	90% < 2
Eau traitée				
Turbidité	NTU		< 1	0,6
Salinité	mg/L		< 250	130
pH	-		< 8,5	7,9

ADOUCCISSEMENT PARTIEL D'UNE EAU DE DURETE ELEVEE PAR NANOFILTRATION

S. Ghizellaoui¹

Résumé

La nanofiltration, technique membranaire relativement récente est utilisée ici pour l'adoucissement d'eaux très dures.

Pour cela, notre étude s'est basée sur l'élimination d'une partie de la dureté temporaire des eaux du Hamma qui alimentent la ville de Constantine en eau potable.

Deux techniques ont été adoptées pour avoir un adoucissement partiel.

- La première consiste à travailler à de faibles pressions (0,5, 1, 2) bar.
- La seconde consiste à exercer des pressions relativement fortes (4-16) bar sur 50% d'eau brute qui est ensuite mélangée en fin de traitement à 50% d'eau dure.

D'après les résultats obtenus, il ressort que cette technique membranaire présente un grand intérêt pour l'élimination de la dureté temporaire avec des taux de rétention qui dépendent principalement de la pression appliquée et de la vitesse d'écoulement tangentiel.

1. INTRODUCTION

La nanofiltration est une technologie membranaire de plus en plus utilisée au cours de ces dernières années. Elle fonctionne sous l'effet d'une pression appliquée (5-20 bar). Elle fonctionne également sans ajout de produits chimiques, avec une consommation d'énergie relativement faible.

Elle a trouvé de nombreuses applications dans divers domaines: le traitement d'eaux souterraines (VAN PAASSEN et al. (1998), SCHAEF et al. (1998), KHALIK et PRAPTOWIDODO (2000), VAN DE LISDONK et al. (2000), traitement des effluents d'eaux usées et celles du secteur industriel (L'industrie textile, pharmaceutique, chimique...etc) MEHIGUENE et al. (1999), GARBA et al. (2000).

Dans ce travail nous avons utilisé la nanofiltration pour assurer une faible rétention des ions monovalents (HCO_3^- , Cl^-) et une forte rétention des ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2+}). Par ailleurs, nous l'avons appliqué, aux eaux du Hamma pour éliminer la dureté temporaire. Nos expériences ont été réalisées d'une part, à faibles pressions (0.5, 1 et 2 bar) et d'autre part, sous de fortes pressions (4-16 bar). Dans ce dernier cas, nous avons mélangé 50% d'eau brute à 50% d'eau nanofiltrée.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Essais d'adoucissement par nanofiltration

2.1.1. Description du pilote

La Photographie (1) nous montre globalement le pilote de nanofiltration Millipore Proscale alors que le Schéma (1) nous donne une description détaillée de cet appareil

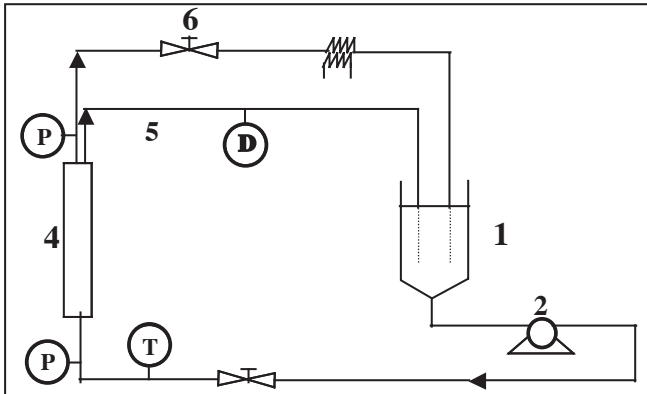
(capacité 12 litres). Il est équipé d'une pompe volumétrique, d'un échangeur de chaleur, de deux vannes pour évacuer les solutions après la filtration ainsi que de deux autres vannes pour régler la pression transmembranaire mesurée par deux capteurs, l'un avant et l'autre après le module de nanofiltration. Ce module peut accueillir des membranes spirales de diamètre 4.54 cm et de longueur 30.5 cm.

Photographie 1: Pilote de nanofiltration Millipore Proscale



1. Docteur en Chimie Analytique et Traitement des Eaux. Chercheur au Département de Chimie de l'Université de Constantine. Algérie. E-mail: gsamira@yahoo.com

Schéma 1: Pilote de nanofiltration



- (1) Bac d'alimentation
- (2) Pompe volumétrique
- (3) et (4) Vannes de régulation de pression
- (5) Module de nanofiltration
- (6) Recirculation du perméat
- (7) Recirculation du rétentat
- (8) Echangeur de chaleur
- (D) Débitmètre
- (T) Thermomètre
- (P) Compteur de pression

2.1.2. La membrane

2.1.2.1. Nature de la membrane

Il s'agit d'une membrane NANOMAX 50 commercialisée par la société MILLIPORE. Elle est de type composite organique, chargée négativement et équipée d'un module spiralé de surface filtrante 0.37 m² (Figure1). Elle est constituée de trois couches.

- une couche active d'épaisseur 0.4 μm ou (0.1-0.5) μm constituée de polymères du type polyamides aromatiques.
- un support microporeux en polysulfone d'épaisseur 40 μm.
- un support mécanique macroporeux d'épaisseur 120 μm en polyester.

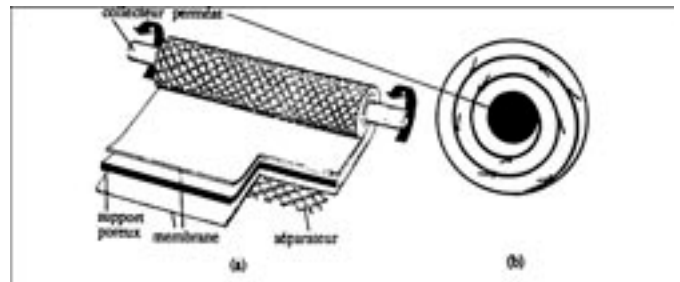
(a) Principe de construction

(b) Schéma en coupe montrant la collecte du perméat

2.1.2.2. Caractéristiques de la membrane

- Surface filtrante 0.37 m²
- Seuil de coupure de 350 Dalton
- Gamme de pH utilisé : 2 et 10.
- Température maximale : 40°C
- Gamme de pression : 0-20 bars

Figure 1: Module spiralé d'une membrane Nanomax 50



2.1.3. Mode opératoire

Tout d'abord, toutes les expériences ont été effectuées en mode discontinu avec un retour total du rétentat et du perméat vers le bac d'alimentation afin de maintenir constante la concentration de la solution à traiter.

Les expériences ont été réalisées sur 4 litres d'eau brute du Hamma. Les échantillons de rétentat et de perméat ont été prélevés pour analyse après 30 et 60 min de filtration.

Les essais relatifs à l'influence de la faible pression ont été effectués pour 0.5, 1 et 2 bar. La température de l'eau est maintenue à 20°C. L'influence de la température et la vitesse d'écoulement tangentiel a été étudiée sous une pression de 1 bar.

D'autres essais ont été effectués sur 4L d'eau brute du Hamma. Les échantillons de rétentat et de perméat ont été prélevés pour analyse après 60 minutes de filtration.

Les essais relatifs à l'influence de la forte pression ont été faits entre (4-16) bar, tout en maintenant la température à 20°C. L'influence de la vitesse d'écoulement tangentiel a été prise en considération sous une pression de 10 bar.

Après chaque expérience, la membrane est lavée avec une solution d'acide chlorhydrique à pH=2, puis rincée à l'eau déminéralisée jusqu'à l'obtention d'une conductivité de l'ordre de 1 μS/cm de l'eau de rinçage.

2.1.4. Analyses

Le suivi analytique de la concentration des anions (Cl⁻, SO₄²⁻) a été réalisé à l'aide d'une chaîne de chromatographie comprenant une pompe (WATERS 501) dont le débit est fixé à 1.3 ml/min, un détecteur conductimétrique (WATERS 431) et une colonne anionique (Shodex I-524A). L'éluant contient pour un litre 0.207g d'acide para-hydroxybenzoïque, 5 ml de méthanol et de l'éthanolamine afin d'ajuster le pH de cette solution à 8. Les hydrogénocarbonates ont été analysés à l'aide d'un appareil (DOHRMANN-XERTEX DC 80). La concentration des cations (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺) a été déterminée par spectrophotométrie d'absorption atomique à l'aide d'un appareil VARIAN 1275 utilisé en flamme air-acétylène.

Le pH des solutions a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre TACUSSEL équipé d'une électrode combinée.

Avant chaque expérience, on étalonne le pHmètre à l'aide de deux solutions tampons encadrant la valeur à mesurer. Pour la mesure de conductivité, nous avons utilisé un conductimètre de marque RADIOMETER.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques des eaux du Hamma

Les résultats d'analyse physico-chimiques du Hamma sont portés dans le Tableau (1).

Au vu des résultats d'analyse, il est à constater que les eaux de Hamma ont une teneur en matière organique modérée (COT 3.84-7.5 mg/L). Par contre, elles sont fortement minéralisées et présentent une dureté assez importante. Elles sont essentiellement bicarbonatée calcique.

Tableau 1 : Analyse de l'eau du Hamma.

paramètre	L'eau du Hamma
T°C	31-33
pH	6.95-7.94
CE mS/cm	0.9-1.30
COT mg/L	3.84- 7.5
CO ₂ mg/L	16.21-37.05
HCO ₃ ⁻ mg/L	320- 432
Cl ⁻ mg/L	128-150
SO ₄ ²⁻ mg/L	120-212
PO ₄ ³⁻ mg/L	0.006-0.02
NO ₃ ⁻ mg/L	3.90-7
NO ₂ ⁻ mg/L	-
NH ₄ ⁺ mg/L	-
TH mg/L CaCO ₃	475-600
Ca ²⁺ mg/L	124-131
Mg ²⁺ mg/L	30.48-43.2
Na ⁺ mg/L	84-115
K ⁺ mg/L	2.22-13

3.2. Perméabilité de la membrane au solvant pur

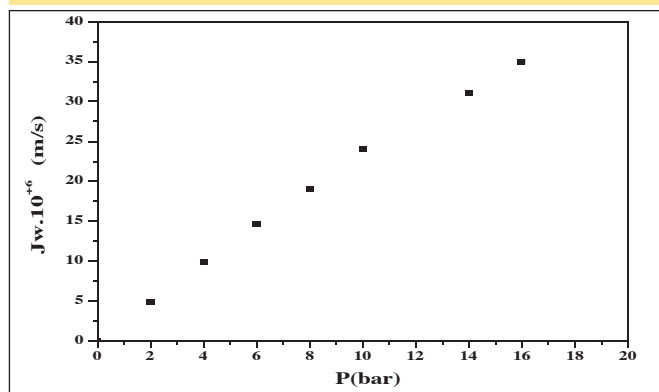
Avant d'entamer les expériences, il est important de caractériser la membrane en déterminant sa perméabilité à l'eau (solvant pur). La variation du flux du solvant pur en fonction de la pression transmembranaire suit la loi de DARCY.

$$J_w = L_p \times \Delta P$$

J_w: flux du solvant pur

L_p: perméabilité hydraulique de la membrane ; elle a été déduite de la pente de la droite de la Figure (2) et a pour valeur 2.25 10⁶ m/S.bar.

Figure 2: Evolution du flux de l'eau pure en fonction de la pression



3.3. Caractérisation de la membrane par Microscopie électronique à balayage

Selon PAUGAM (2002), la microscopie électronique à balayage a permis d'observer les propriétés structurales de la membrane Nanomax 50, telles que l'épaisseur de sa couche active et sa structure asymétrique, qui sont en relation étroite avec ses propriétés de séparation.

Les photographies (2,3) représentent une coupe transversale à deux agrandissements distincts (x350) et (x1000) où l'on confirme les données commerciales relatives aux différentes épaisseurs de couche de la membrane.(Tableau 2).

Photo. 2: Coupe transversale de la membrane Nanomax-50 à deux agrandissements. 1 cm = 45 μm et 1 cm = 13 μm.

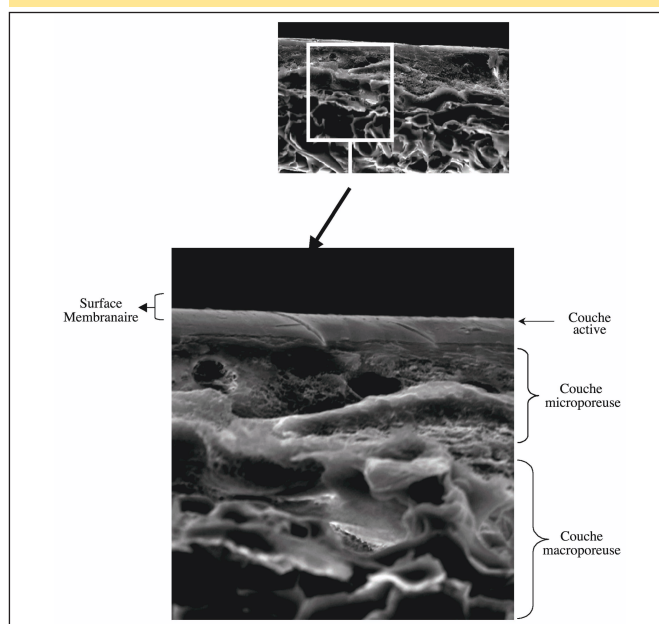


Photo. 3: Vue superficielle de la couche active de la membrane Nanomax-50.

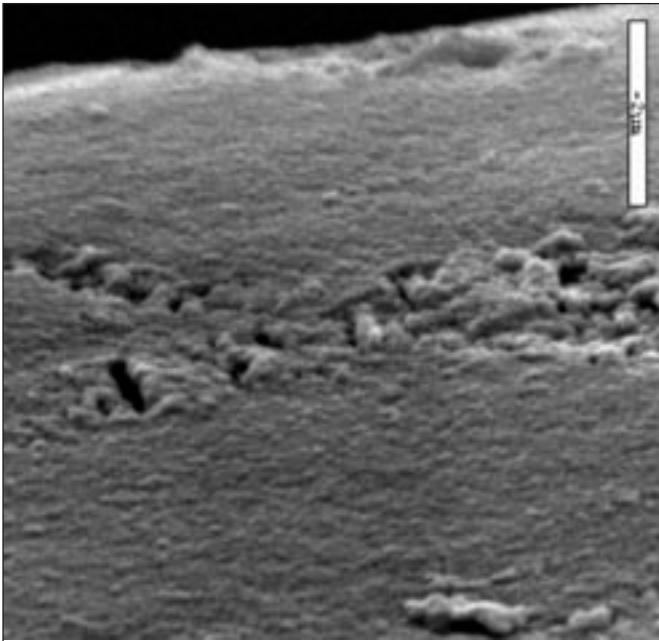


Tableau 2: Epaisseurs des différentes couches constituant la membrane Nanomax50

Couche	Epaisseur
Couche active	$0.1 < C_p < 0.5 \mu\text{m}$
Support microporeux	$40 \mu\text{m}$
Support macroporeux	$120 \mu\text{m}$

La photographie (3) présente de plus, une vue de la surface externe de la couche active où l'on confirme la porosité de la couche active de la membrane.

3.4. Influence de la faible pression transmembranaire sur la rétention des ions

Les essais relatifs à l'influence de la pression ont été effectués à 0.5, 1 et 2 bar. Ces pressions sont utilisées pour l'adoucissement partiel afin de maintenir des minéraux dans l'eau potable. La température de l'eau est maintenue à 20°C.

Le Tableau (3) résume les valeurs minimales et maximales des paramètres chimiques analysés dans l'eau brute et dans le perméat respectivement après 60 min de filtration. Les Figures (3) et (4) montrent l'effet de la pression sur la rétention des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ et des anions HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} . On constate que la rétention des cations et des anions augmente avec la pression appliquée. Au vu des résultats obtenus, la rétention des cations divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}) est supérieure à celle des cations monovalents (Na^+ et K^+), d'où une prédominance de l'effet de charge. En outre, la rétention des ions Ca^{2+} a été trouvée inférieure

à celle des ions Mg^{2+} . Cela s'explique par le rayon ionique de Mg^{2+} qui est de l'ordre de 0.65 \AA par rapport au rayon de Ca^{2+} (0.99 \AA) ce qui conduit à une énergie de solvation de Mg^{2+} supérieure. Entraînant ainsi une augmentation de rétention. Ainsi, plus l'ion est solvate, plus il est retenu.

On observe également sur la Figure (3) que la rétention de Na^+ est inférieure à celle de K^+ sous l'effet de concentration et ce, en se basant sur le mécanisme de Donnan (MAUREL, 1997). Ainsi, plus l'ion est concentré moins il est retenu. Concernant les anions, la rétention des sulphates est élevée, mais n'atteint pas 100%. Car leur concentration est relativement forte.

Les hydrogencarbonates sont retenus par l'effet stérique vis à vis des chlorures mais on s'attendait à une rétention plus importante. Etant donné que leur concentration est plus forte par rapport à celle des chlorures, la rétention est donc réduite. Les chlorures ne sont pas retenus car ces éléments vont compenser l'électroneutralité du système.

Tableau 3: Composition de l'eau brute et du perméat

	Eau brute	Perméat	Rétention %
CE $\mu\text{S/cm}$ à 20°C	1010-1032	725-813	18-26
Cl mg/L	129-130	121-126	0.75-2
SO_4^{2-} mg/L	131-132	7.9-9.2	93-94
HCO_3^- mg/L	408-466	298-365	10-30
Ca^{2+} mg/L	120-125	78-89	24-34
Mg^{2+} mg/L	36-37	21.5-27	23-40
Na^+ mg/L	74-77	59-66	11-17
K^+ mg/L	4.40-4.60	3.25-3.58	12-24
pH	7.30-7.58	7.72-8.19	-

Figure 3: Pourcentage de rétention des cations

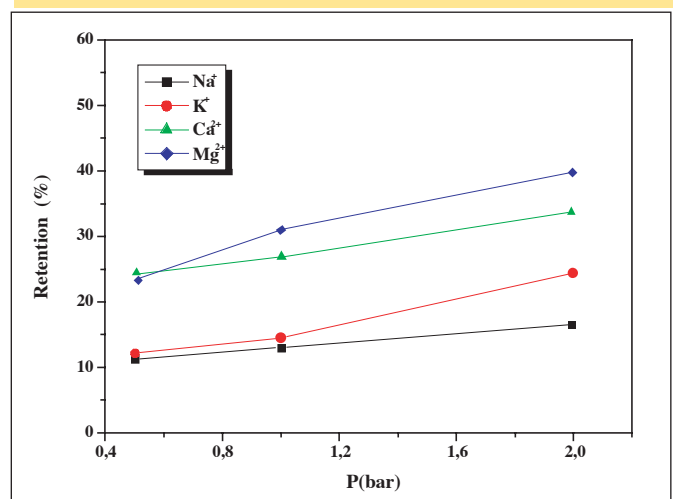
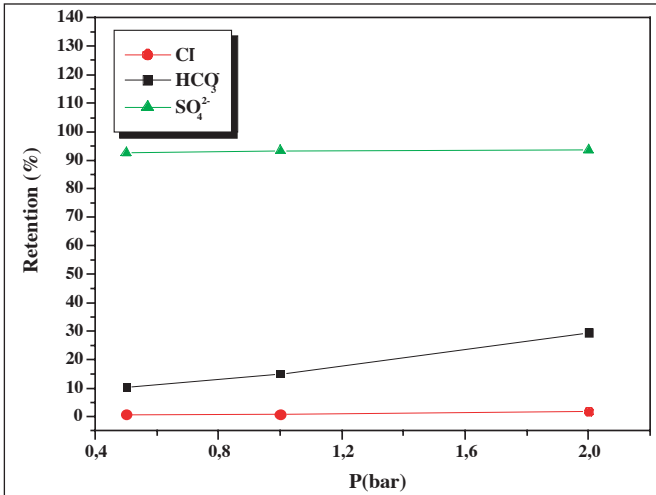


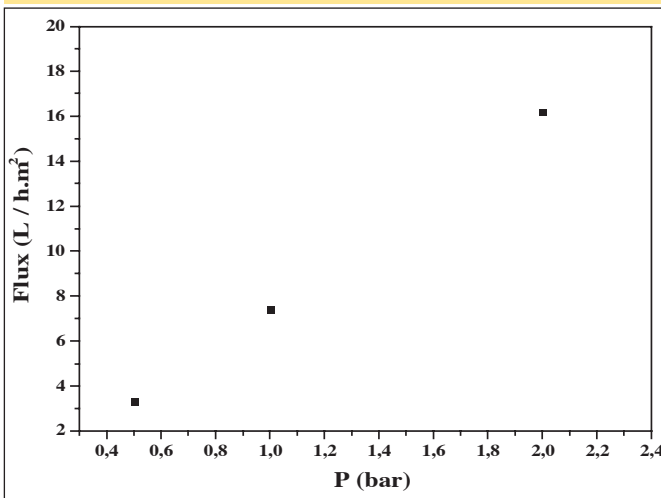
Figure 4: Pourcentage de rétention des anions



3.5. Effet de la pression sur le flux du perméat

La Figure (5) montre l'effet de la pression sur le flux du perméat. On a observé une relation linéaire entre les deux.

Figure 5: Influence de la pression sur le flux du perméat



3.6. Influence de la température sur la rétention

Selon les résultats des rétentions des ions pris en considération à 20°C, nous avons jugé utile de prendre une température de 25°C pour voir son effet sur l'élimination de la dureté temporaire pour une pression de 1bar.

Nous avons noté une stabilité de la rétention des anions, il y a par contre, une légère élévation de la rétention des cations (Ca²⁺, Na⁺, K⁺)

3.7. Influence de la vitesse de circulation tangentielle sur la rétention

Les données sur l'effet de la vitesse de circulation tangentielle sur le flux de perméat et sur la rétention des

ions ont été obtenues en réalisant des expériences à deux vitesses de flux (180 et 250 L/h), en fixant la pression transmembranaire à 1bar.

L'effet de la vitesse de circulation tangentielle sur le flux de perméat est négligeable, mais la rétention des ions divalents Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻ ainsi que celle des HCO₃⁻ augmente lentement lorsque la vitesse de flux tangentielle croît.

L'augmentation de la rétention est due à la diminution de la concentration dans la couche de polarisation induite par l'augmentation du coefficient de transfert de masse avec l'augmentation de la vitesse de circulation tangentielle.

3.8. Influence de la pression transmembranaire sur le flux

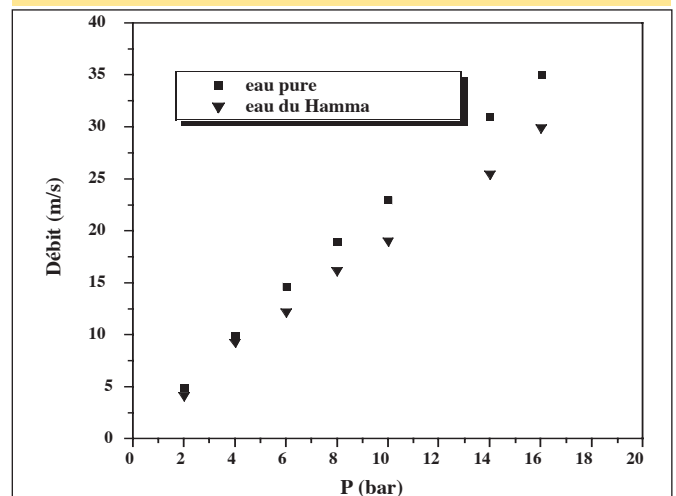
Les essais ont été effectués en maintenant le débit d'alimentation constant, la température à 20°C et en variant la pression de 2 à 16 bar.

L'évolution du flux en fonction de la pression transmembranaire est représentée dans la Figure (6). Il est à noter que lorsque la pression augmente, un écart est observé entre la droite relative à l'eau pure et celle correspondant à l'eau du Hamma.

Cet écart est dû à l'accumulation des ions sur la membrane à l'origine d'une polarisation de concentration. Ce gradient de concentration à travers la membrane entraîne une résistance supplémentaire à travers la membrane due à la pression osmotique. D'après Paugam (2002) cette observation a été faite par Xu et Spencer (1997) et Boucard (2000).

En travaillant avec des sels concentrés, ces auteurs ont noté une forte différence entre la pente de la droite du flux à l'eau et celle du flux de perméat dû à la polarisation de concentration.

Figure 6: Evolution du flux de l'eau déminéralisée et Hamma en fonction de la pression



3.9. Influence d'une forte pression transmembranaire sur la rétention des ions

Comme les membranes de nanofiltration sont de plus en plus utilisées pour le traitement de l'eau : (élimination des matières organiques, sulfates, dureté.....).

Nous avons, dans cette partie, pratiqué un adoucissement sur une partie de l'eau en exerçant des pressions variant de (4-16) bar.

La température a été maintenue à 20°C comme précédemment. En fin de traitement, l'eau nanofiltrée est mélangée à l'eau brute à 50%. Les résultats sont portés dans les Tableaux (4, 5).

Tableau 4: Composition de l'eau brute et du perméat.

	Eau brute	Permeat	Rétention (%)
CE μ S/cm	998-1033	572-905	39.35-47.05
Cl- mg/L	120-125	80-100	12.5-17.8
SO ₄ 2- mg/L	116-158	1.30-10	98.0-98.6
HCO ₃ ⁻ mg/L	414-475	238-247	32.00-39.77
Ca ²⁺ mg/L	128-132	54-65	45.30-49.45
Mg ²⁺ mg/L	36-39	12.5-13.2	55.77-63.40
pH	7.14-7.72	7.61-8.38	-

Tableau 5: Composition de l'eau mélangée

	Mélange
pH	7.16-8.07
CE μ S/cm à 20°C	799-828
Cl- mg/L	105-110
SO ₄ 2- mg/L	66.66-91.20
HCO ₃ ⁻ mg/L	342-385
Ca ²⁺ mg/L	89-100
Mg ²⁺ mg/L	23.4-25.0

Il est à noter que lors de la nanofiltration de l'eau du Hamma Figures (7, 8, 9), la rétention des ions augmente en premier lieu avec la pression, puis évolue légèrement où elle se stabilise sous la forme d'un plateau. La même constatation a été faite par RANATAMSKUL et al. (1998).

L'augmentation de la rétention peut être expliquée, comme indiqué, par l'augmentation du flux de solvant (MEHIGUENE, 1999). Puisque le transfert de soluté n'augmente pas comme le solvant, le soluté se partage dans un volume plus important. Le perméat est alors moins concentré et le taux de rétention plus important.

Une autre explication peut être donnée : sous l'effet de la pression il y a accumulation progressive des ions à la surface de la membrane qui entraîne une polarisation de

concentration, c'est à dire, un gradient de concentration entre la surface membranaire et la solution d'alimentation. Cette différence de concentration, induit un flux diffusif dans le sens inverse du flux convectif, entraînant une diminution de transfert des ions au niveau de la membrane, d'où une rétention plus importante.

Il est à constater que dans le domaine de faibles pressions, le taux de rétention des chlorures est faible ; il augmente régulièrement avec l'augmentation de pression (Figure 10)

Par contre, les sulfates présentent le taux de rétention le plus élevé, indépendamment de la pression transmembranaire (Figure 11). Ces ions ayant la même charge négative que la membrane vont être repoussés entraînant une accumulation de charges négatives près de la membrane.

Aux faibles pressions, les co-ions monovalents (Cl-) traversent la membrane plus facilement.

La rétention des hydrogencarbonates augmente légèrement avec l'augmentation de pression mais ils sont plus retenus que les chlorures car c'est l'effet stérique qui l'emporte (Figure 9). En plus, leur concentration étant élevée, leur rétention reste faible.

Figure 7: Pourcentage de rétention du Ca²⁺

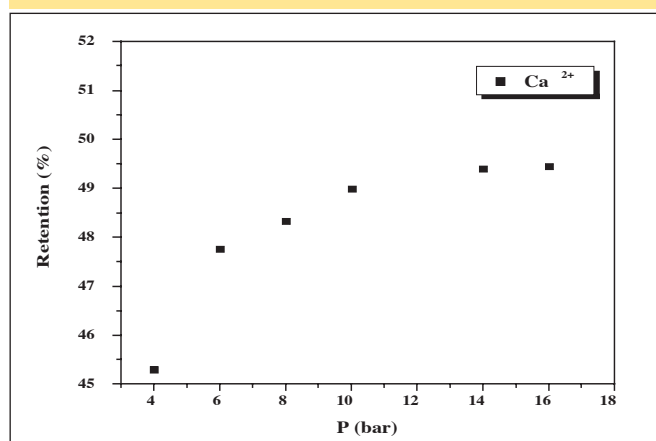


Figure 8: Pourcentage de rétention de Mg²⁺

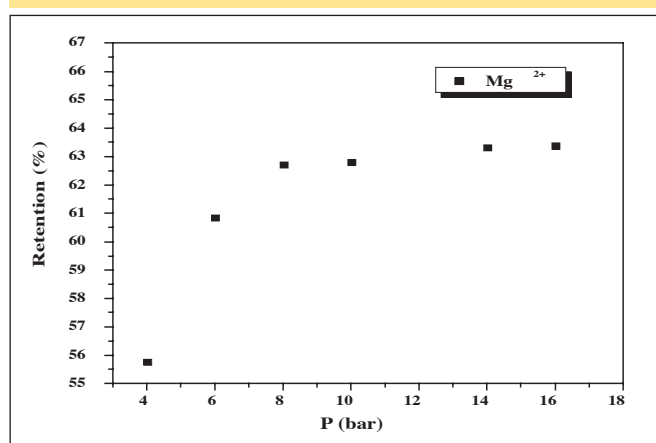


Figure 9: Pourcentage de rétention de HCO_3^-

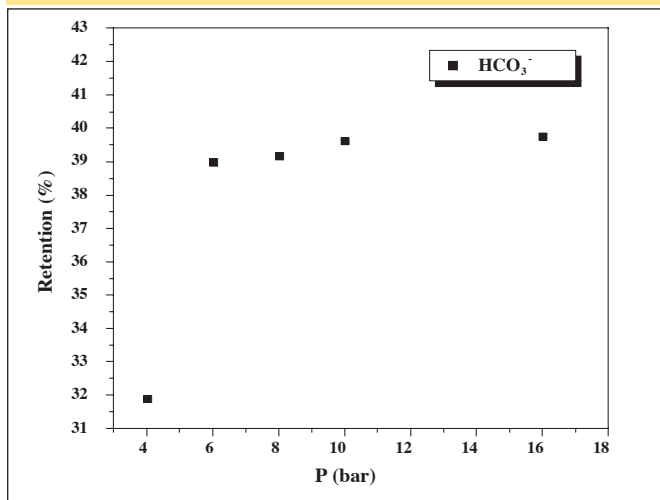


Figure 10: Pourcentage de rétention de Cl^-

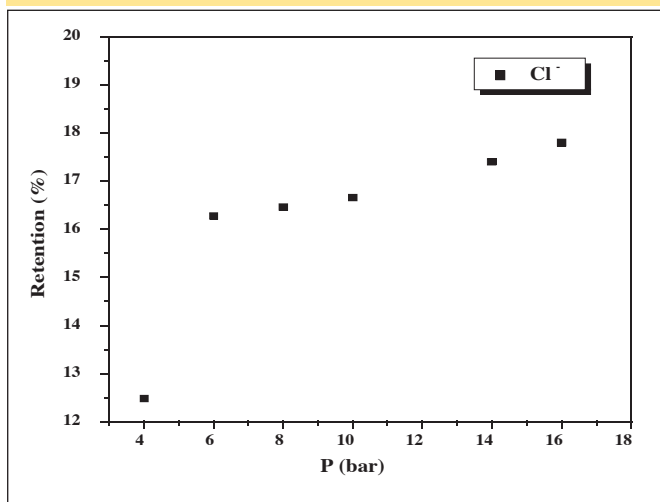
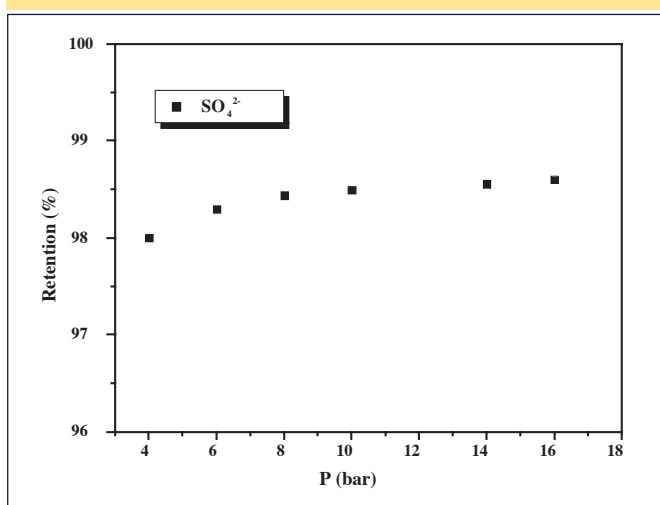


Figure 11: Pourcentage de rétention des SO_4^{2-}



3.10. Influence de la vitesse d'écoulement tangentielle sur la rétention

Comme la rétention augmente avec la vitesse de circulation, accroître la vitesse d'écoulement tangentielle a comme conséquence une augmentation de la rétention.

Nous avons constaté que l'augmentation de la vitesse a conduit à une légère augmentation du taux de rétention des divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) et des HCO_3^- (Figures 12-15) à la pression fixe de 10 bar car, à vitesse plus élevée, l'entraînement des divalents vers le rétentat est plus important; l'influence des forces d'entraînement vers le perméat est moins grande et les forces de surface sont dans ce cas plus efficaces. Par contre, plus la vitesse d'écoulement tangentielle est faible, plus la quantité des ions à la surface de la membrane est faible.

Dans le cas où les forces d'entraînement vers le perméat deviennent plus fortes que les forces de surface, il y a diminution de la rétention des ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) et HCO_3^- .

Figure 12: Pourcentage de rétention du Ca^{2+} en fonction de la vitesse d'écoulement tangentielle

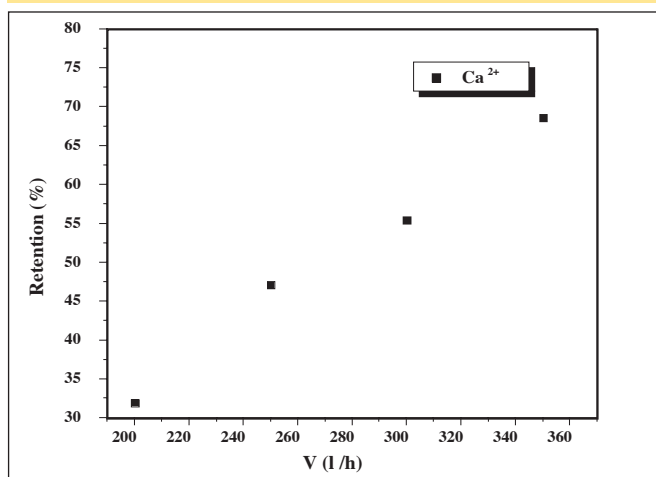


Figure 13: Pourcentage de rétention de Mg^{2+} en fonction de la vitesse d'écoulement tangentielle

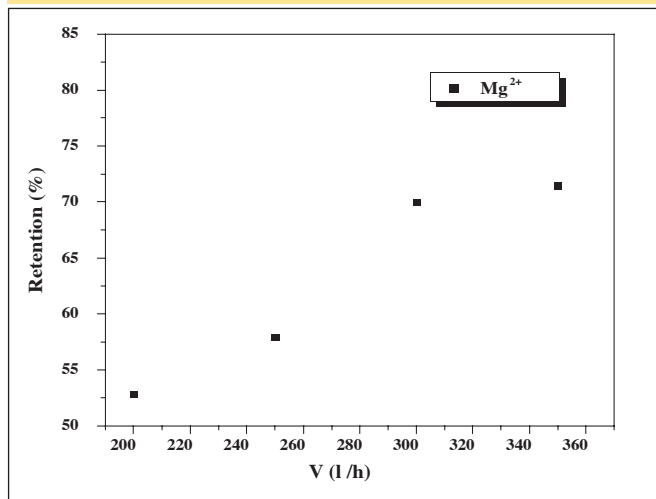
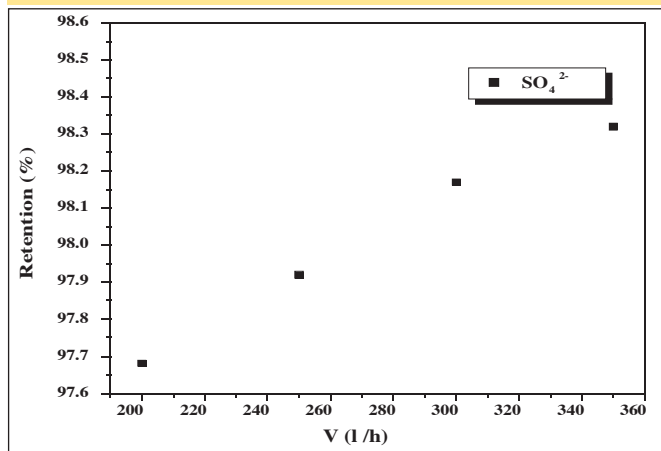


Figure 14: Pourcentage de rétention des SO_4^{2-} en fonction de la vitesse d'écoulement tangentiel



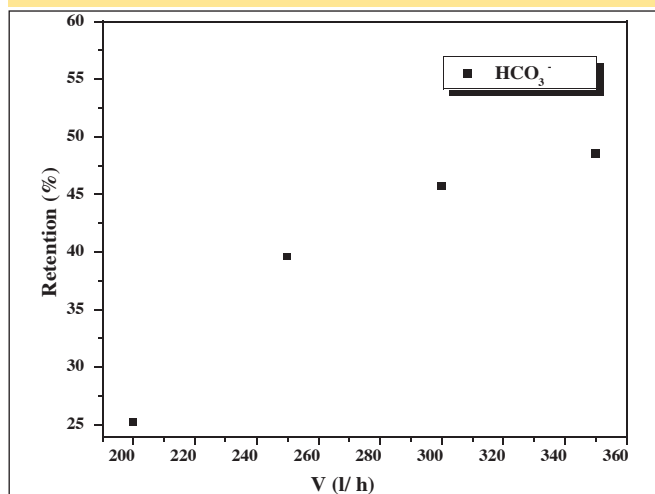
4. CONCLUSION

Pour adoucir partiellement les eaux du Hamma, deux techniques ont été adoptées :

- la première consiste à travailler à de faibles pressions (0,5, 1, 2) bar.
- la seconde consiste à exercer des pressions relativement fortes (4-16) bar sur une partie d'eau qui est mélangée à 50% d'eau dure en fin de filtration.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de produire une eau partiellement adoucie de bonne qualité et qui renferme les minéraux nécessaires à sa

Figure 15: Pourcentage de rétention des HCO_3^- en fonction de la vitesse d'écoulement tangentiel



consommation. De plus, on a pu confirmer l'intérêt de la nanofiltration pour l'abattement de la dureté temporaire.

Les taux de rétention ont atteint 50% pour Ca^{2+} et 40% pour HCO_3^- à des pressions relativement fortes et à des taux de rétention de 34% pour Ca^{2+} et 30% pour HCO_3^- à des pressions faibles. Ces taux dépendent principalement de la vitesse d'écoulement tangentiel. Par contre, pour l'évolution de la rétention en fonction de la pression, on a noté une certaine évolution au départ et qui se stabilise par la suite sous la forme d'un plateau due au phénomène de la polarisation de concentration.

DESSALEMENT DES EAUX : POINT SUR LES RECENTES EVOLUTIONS TECHNIQUES ET LE DEVELOPPEMENT DES APPLICATIONS EN PRODUCTION D'EAU POTABLE.

V. Bonnelye¹

Résumé

Le rapide développement des applications de dessalement, et le repositionnement des procédés d'osmose inverse par rapport aux procédés thermiques permettent de dynamiser les innovations technologiques et procédé dans ce domaine.

Les procédés de dessalement évoluent pour faire face à la demande en eau croissante dans certaines parties du monde soumises au stress hydrique, et dont les ressources sont limitées en qualité et quantité, aboutissant à la mise en place de solution de traitement sur eau saumâtre et eau de mer. Les évolutions ont pour principal objectif une baisse de la consommation énergétique et des coûts d'investissement et d'exploitation : évolution des performances des membranes d'osmose inverse, pompage, systèmes de récupération d'énergie, matériaux et corrosion,....

Les filières de production doivent s'adapter à la qualité de la ressource en eau, mais aussi à l'évolution de la réglementation en matière d'eau potable et aux problématiques associées au dessalement (reminéralisation, bore, bromures).

La communication inclura deux études de cas illustrant l'application de ces évolutions en matière de procédé et de technologie : l'installation de Perth, en Australie, et celle de Barcelone en Espagne.

Pour chacune des deux installations, différentes informations sont données :

- une vision globale de la problématique de la fourniture d'eau dans la région considérée,
- un schéma du projet mettant en avant le financement et les partenariats,
- un résumé de la filière de traitement, en mettant en avant les spécificités technologiques du projet,
- un point sur l'organisation de l'exploitation de l'installation, avec une présentation des coûts d'exploitation par poste.

INTRODUCTION

Les installations de dessalement par osmose inverse se sont développées à partir de la fin des années 90, avec des capacités de production de plusieurs dizaines de m³/j, aboutissant à des débits pouvant atteindre 100.000, 200.000 jusqu'à 500.000 m³/j.

Durant ces 15 dernières années, les techniques ont évoluées, de même que les types de contrat.

La présente communication présente le cas de deux installations dimensionnées avec les dernières techniques de dessalement et de récupération d'énergie.

1. PERTH, AUSTRALIE

1.1. Le contexte

Ces dernières années, l'Australie a été soumise à des sécheresses répétées, impactant l'ensemble du réseau d'approvisionnement d'eau potable du sud de ce pays – continent. Dans ce contexte de stress hydrique, la production d'eau douce à partir d'eau de mer est apparue

comme une solution de ressource alternative pouvant intégrer le système d'alimentation en eau potable déjà existant, fait de pompage d'eaux souterraines et de réservoirs de stockage d'eau de surface.

Le projet de dessalement de Perth a débuté en 2005, et a été mené en urgence [1]. L'usine de dessalement est localisée au sud de Perth, capital et plus grande ville de l'état d'Australie de l'ouest. Avec un climat méditerranéen (850 mm de pluie par an) et une population de 1.6 millions d'habitants, l'agglomération de Perth est le lieu d'un développement rapide, avec une prévision de 2.9 millions d'habitant d'ici 2060 [2].

1.2. Le contrat

Le contrat est un projet de DBO (Design Build Operate) développé avec Western Australian Water Corporation sur la base d'un contrat en alliance public-privé. L'installation a été dimensionnée et construite par une Joint Venture 50-50% Degremont & Multiplex avec un contrat d'exploitation de 25 ans assuré par Degremont Australia.

1. Expert technique spécialisé dans le traitement d'eau potable, le dessalement et la réutilisation des eaux au sein de la Direction Technologie et Innovation de la Société Degremont, France. E-mail : veronique.bonnelye@degremont.com

1.3. Description de l'installation

L'installation PSDP (Perth Seawater Desalination Plant) a une capacité de production de 143.700m³/j (45 millions de m³ par an), ce qui représente 17% de la demande actuelle d'eau potable de l'agglomération de Perth (IWSS pour Integrated Water Supply System). PSDP forme une partie clé dans la stratégie du distributeur d'eau, la Water Corporation, organisme public assurant gestion et distribution de l'eau potable de l'agglomération.

L'installation comprend (Figure 1) :

- une prise en mer d'une capacité d'environ 350 000 m³/j équipée d'une tour d'alimentation, d'une conduite de 200 m et d'une bache d'eau brute équipée d'un tamisage,
- le pompage d'eau brute constitué de 6 pompes alimentant 2 lignes de prétraitement en parallèle,
- un prétraitement, coagulation sur 2 groupes de 12 filtres bicouches sous pression (figure 2)
- une filtration sur filtres à cartouches de seuil de coupure 5 µm,
- 12 racks de dessalement d'eau de mer, alimentés par des pompes haute pression dédiées, et équipés de système de récupération d'énergie de type échangeur de pression ERI (figure 3).
- 6 racks eau saumâtre alimentés par le perméat produit sur la première passe, et permettant d'atteindre les objectifs de salinité et de bromures.

- un système de reminéralisation comprenant un injection de CO² (stockage sur site en silo sous pression) et d'eau de chaux (production d'eau de chaux par un saturateur à recirculation de boues),
- une désinfection finale au chlore avant stockage (capacité de stockage sur site de 3 heures à capacité de production nominale) (figure 4).

Figure 2: Installation PSDP (Perth, Australie) – Filtres bicouches sous pression Mediazur FH



Figure 1 : Installation PSDP (Perth, Australie) – Filière de traitement

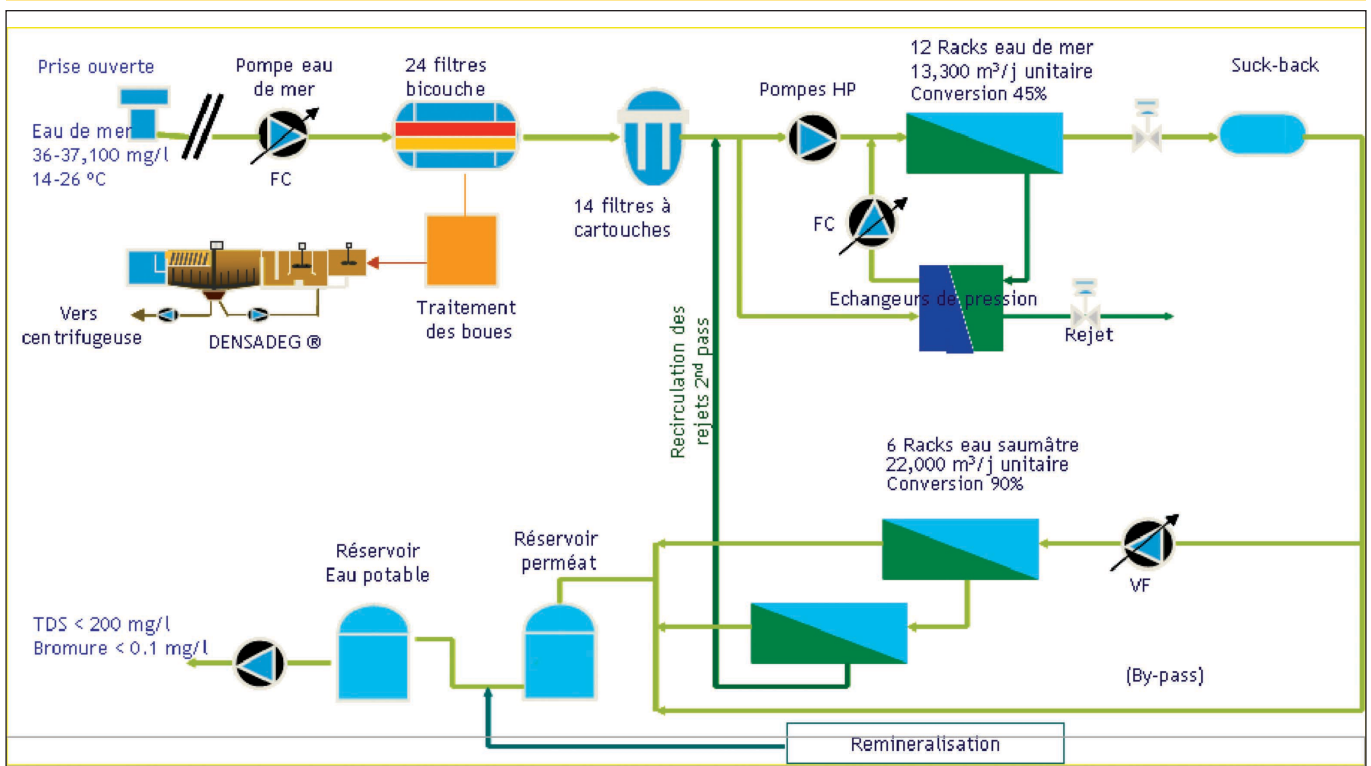


Figure 3: Installation PSDP (Perth, Australie) – Vue de la salle d'osmose inverse, racks eau de mer.



Figure 4: Installation PSDP (Perth, Australie) – Vue globale du site



2. BARCELONE (ESPAGNE)

2.1. Le contexte

ATLL (Aigües Ter Llobregat) est une société publique, dépendant du département environnement du gouvernement de Catalogne. ATLL a en charge l'alimentation en eau potable de plus de 100 municipalités de l'agglomération de Barcelone (plus de 4.5 millions d'habitants)(Figure 5). L'approvisionnement en eau est principalement assurée par deux installation de production d'eau potable: Cardedeu et Abrera

(respectivement 8 et 4 m³/sec., production à partir des rivières Ter et Llobregat).

La région de Barcelone fait face depuis plusieurs années à une baisse de sa ressource d'eau disponible pour la production d'eau potable. Le fleuve Llobregat voit son débit baisser, alors que la salinité et la dureté de son eau augmentent. La salinité de l'eau de nappe augmente. ATLL a des difficultés à approvisionner en eau l'agglomération et à faire face à l'augmentation de la demande liée à un développement économique intense.

Plusieurs solutions ont été étudiées, comme de transport d'eau de régions du Nord de l'Espagne, voir de France,

le transport d'eau en barge, et la construction d'une installation de dessalement.

C'est cette dernière solution qui a été retenue, avec pour objectifs :

- une augmentation de la ressource en eau potable,
- garantir l'approvisionnement en eau potable de la

population : l'installation, avec une capacité de 60 millions de m³/j (2.3 m³/sec. au maximum) représentera 15 à 20% de la demande en eau de la région,

- une amélioration de la qualité de l'eau distribuée en termes de salinité et de concentration de matières organiques.

Figure 5 : Barcelone (Espagne) – Région gérée par ATLL



Figure 6 : Barcelone (Espagne) – Vue de la filière de traitement

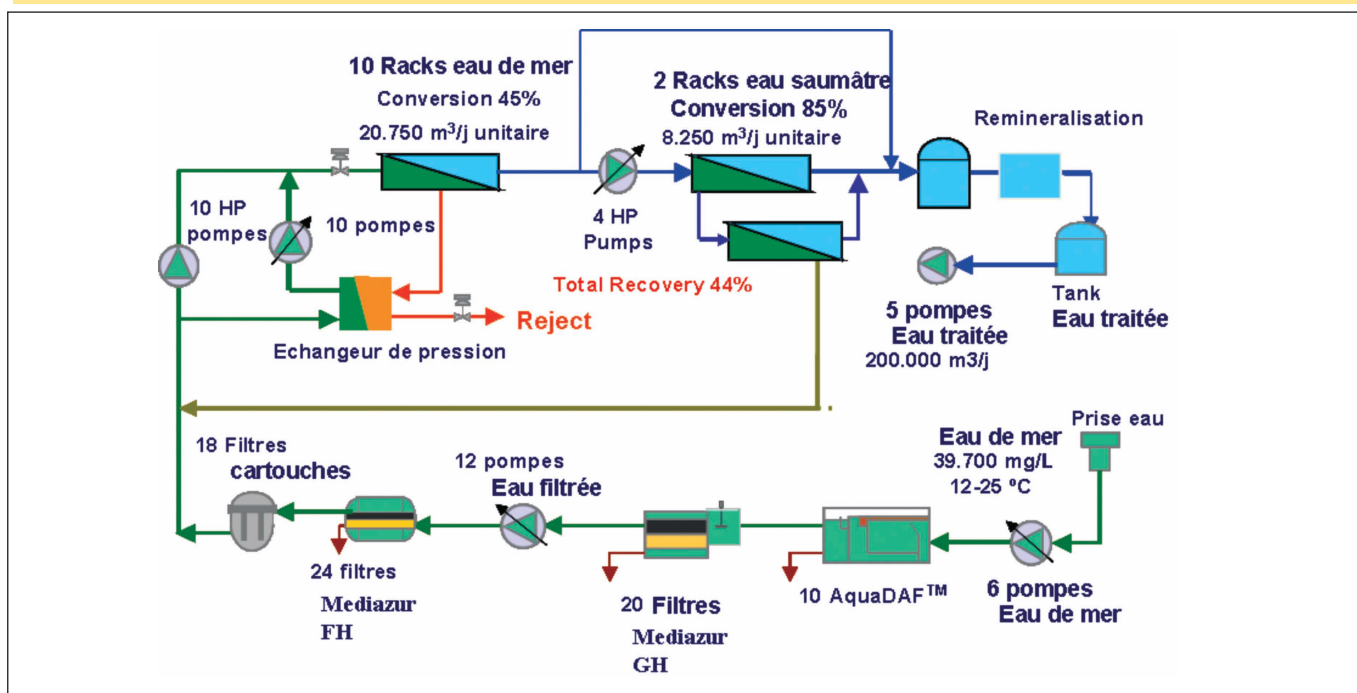
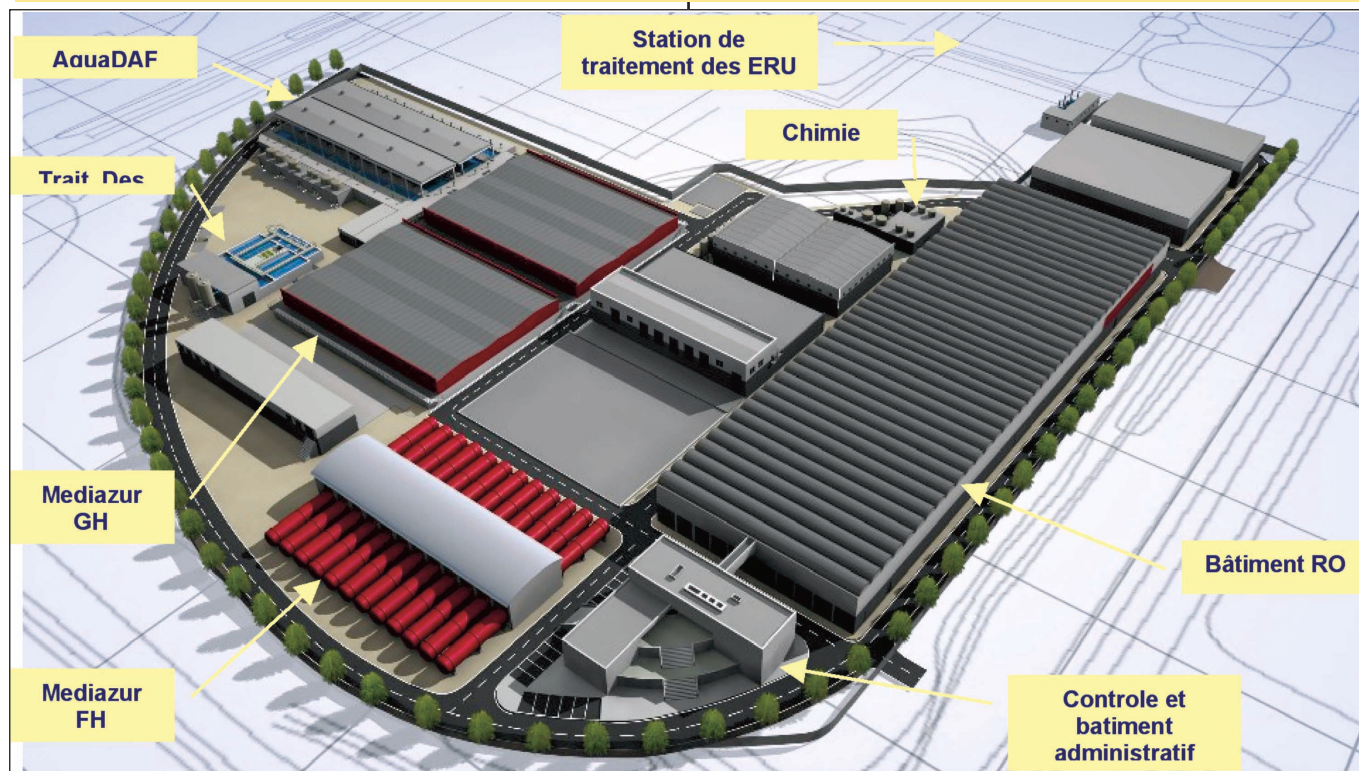


Figure 5 : Barcelone (Espagne) – Région gérée par ATLL



2.2. Le contrat

L'installation a été conçue et construite par une joint venture Degremont, Aigües de Barcelona et Dragados-Drace, contrat de construction associé à 2 ans d'exploitation qui seront assurés par Degremont.

2.3. Description de l'installation

L'installation de dessalement d'eau de mer est située dans la zone industrielle El Prat, à côté de l'aéroport de Barcelone, en bordure de l'installation d'eau résiduaire de la ville. La prise d'eau est sous influence du port de Barcelone et du fleuve Llobregat. Pour cette raison, la prise a été positionnée à 2 km en mer, sous sur fond de 25 m. Une étude avait préalablement comparé cette solution avec des forages directionnels drainant radian de 300 m de long, mais qui avaient donné une qualité d'eau assez dégradée et aléatoire car plus exposée à l'eau du fleuve.

La filière de traitement comprend (Figure 6):

- une flottation sur AquaDAF, la ressource étant sujette à des blooms d'algues périodiques,
- une double filtration sur filtre bicouche Mediazur successivement gravitaire puis sous pression,
- une filtration de sécurité sur cartouches 5 μ m,
- 10 racks d'osmose inverse eau de mer fonctionnant à un taux de conversion de 45%,
- une second passe partielle permet d'atteindre l'objectif de bore de 1 mg/L conformément à la réglementation européenne et espagnole.

3. RESUMES DES POINTS CLES DE LA CONCEPTION D'UNE INSTALLATION DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE

Le procédé de dessalement pas osmose inverse a considérablement amélioré ses performances en matière de consommation d'énergie et pression de fonctionnement, qualité de perméat.

La définition des points d'entrée est une phase importante de l'optimisation du dimensionnement:

- caractéristiques de la ressource : température minimum et maximum, salinité,
- plage de débit, production annuelle,
- qualité de l'eau traitée : salinité, bore.

A partir de ces données, le dimensionnement de l'osmose inverse peut être optimisé: une ou deux passes, taux de conversion et choix des membranes.

Le second point clé, clé du design et d'une exploitation optimisée, est le prétraitement, qui doit être conçu en adéquation avec la qualité de l'eau de mer à traiter :

- turbidité, matières en suspensions, exposition aux vents de sable
- risque de blooms d'algues,
- matières organiques.

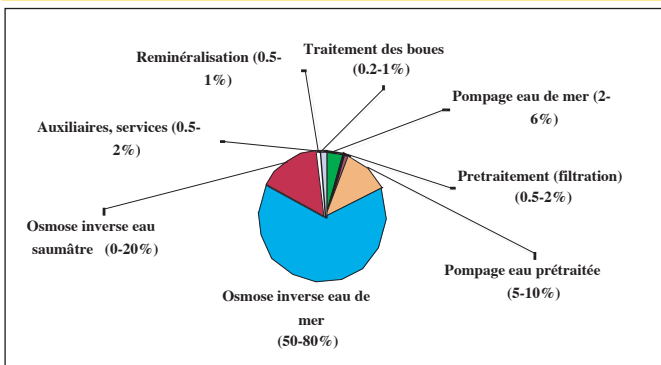
La position et le dimensionnement de la prise d'eau impactent de façon significative la qualité de l'eau arrivant à l'usine de dessalement.

Le prétraitement sélectionné sera plus ou moins complexe, mais devra assurer la production d'une eau compatible avec un fonctionnement stable de l'osmose inverse.

4. ORDRE DE GRANDEUR DE COÛT DE FONCTIONNEMENT

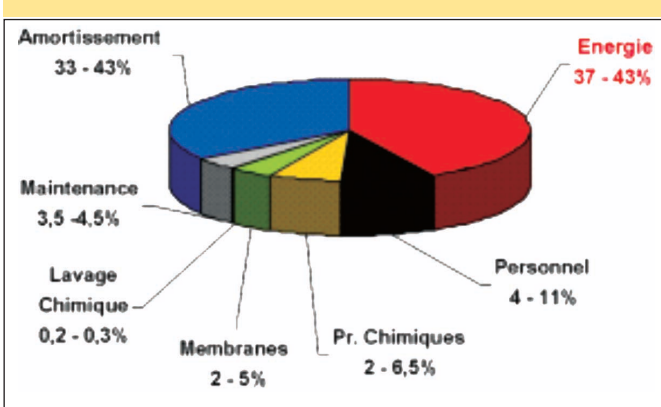
La répartition des coûts de fonctionnement sont principalement dominés par le poste énergie. La figure 8 présente une répartition des principaux postes consommateur d'énergie sur une usine de ce type.

Figure 8 : Principaux postes de consommation d'énergie sur une installation de dessalement



La figure 9 confirme le poids représenté par le poste énergie sur le coût de l'eau.

Figure 9: Coût d'exploitation répartie par poste



Le coût de construction est lui fortement impacté par les postes suivants :

- génie civil, lié à la position de l'installation,
- prise d'eau: suivant le type de côte et la capacité de production de l'installation, prise d'eau par puits côtiers, forage directionnel, micro-tunnel, tunnel ou simple pose d'un tuyaux en polyéthylène sur le fond marin,
- le prétraitement sera plus ou moins complexe, allant d'une simple filtration sur sable de protection à un traitement multi-étagé,

- l'étagé d'osmose inverse eau de mer est le principale poste de dépense, avec des équipements particuliers, pompes haute pression, tuyaux haute pression en métallurgie résistante à la corrosion de l'eau de mer,
- une seconde passe partielle ou totale sera nécessaire pour atteindre les objectifs de traitement,
- enfin de traitement de potabilisation sera dimensionné en fonction des objectifs de reminéralisation (et de la protection associée du réseau de distribution d'eau potable).

CONCLUSION

Les deux exemples présentés permettent d'avoir une vue globale de l'état de la technologie de dessalement utilisés dans les projets de production d'eau potable à partir d'eau de mer.

Simple contrat de construction, associé à des contrats d'exploitation courts terme, à des contrats long terme pouvant dépasser 25 ans, les schémas sont nombreux et doivent être adaptés aux contraintes locales, et optimisés projet par projet.

Références Bibliographiques

1. V. Bonnelye, G. Mercer, L. Daniel, S. Sibma, N. Winsor, G. Crisp, Perth reverse osmosis facility: an environmentally integrated desalination plant, 2nd IWA- ASPIRE Conference & Exhibition, Perth, Oct. 2007.
2. Miguel Angel Sanz, Ignacio del Campo, Gerardo Cremer, Veronique Bonnelye, Francisco Beltrán, Tomás Cazorra, Carlos Miguel, Barcelona: 200,000 m3/day of Potable Water coming from Mediterranean Sea, IDA international congress, Maspalomas, Canaries island, Sept 2007.

LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER PAR OSMOSE INVERSE : UNE SOLUTION POUR L'ALIMENTATION EN EAU DES VILLES CÔTIÈRES D'ALGERIE

D. Zouini¹

Résumé

Le recours au dessalement de l'eau de mer en Algérie constitue une solution urgente pour satisfaire l'alimentation en eau de ces villes côtières surpeuplées. Ces dernières années la consommation en eau toujours croissante, pour pallier à cette demande en ressources hydriques engendrée par la situation de sécheresse répétée qu'a connue le pays pendant les dix dernières années. A cet effet, le choix de réaliser 56 stations de dessalement d'eau de mer pour alimenter les populations des villes côtières en eau potable d'une capacité journalière de 146.000 m³ est une solution judicieuse. Les travaux ont débuté en juin 2002 par différentes entreprises tel que l'entreprise nationale Hydro-traitement, l'entreprise allemande Linde et la Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger.

Plusieurs projets de stations seront réalisés sous forme de "Build Own and operate". Qui signifie que sa conception, sa réalisation et son exploitation sont à la charge de l'investisseur qui en sera le propriétaire durant la période du contrat. L'exemple de la station d'El-Hamma, d'une capacité de 200 000 m³/jour. Le groupe avait proposé le prix du m³ le plus bas à savoir celui de 0,8182 dollar sur la base d'un prix de l'électricité de 0,04 dollar le kwh, ce qui est un peu élevé. En tout état de cause, quel que soit le coût de production du m³ d'eau dessalée, "le citoyen continuera de payer le même tarif appliqué actuellement par l'Algérienne des Eaux (ADE)" assure-t-on (prix soutenu) ?

L'autre exemple de la station de dessalement de Corso, en bordure de la mer, d'une capacité 5000 m³/J. La prise ouverte en pleine mer est utilisée pour alimenter la station. La chaîne de traitement de l'eau de mer faisant appel à la filtration membranaire, comporte plusieurs procédés physico-chimiques. Apparemment après deux années de fonctionnement des problèmes surgissent en matière de qualité de filtration.

Mot clés: Dessalement, Eau de mer, Performance de la station, osmose inverse, coût, Algérie

INTRODUCTION

En l'espace de quarante ans, le dessalement est un mythe devenu réalité. Si les hommes ont toujours pensé dans leur imaginaire collectif pouvoir utiliser l'eau de mer pour épancher leur soif, la technologie a permis ce miracle à un coût devenu aujourd'hui acceptable. Sans entrer dans la technologie dessalement, deux procédés techniques à la base : la distillation et la filtration membranaire.

La distillation utilise l'évaporation, via chauffage thermique, pour séparer l'eau des impuretés de sels. Son inconvénient majeur est la formidable énergie que consomme ce procédé. La filtration membranaire utilise, elle, le procédé d'osmose inverse pour retenir les sels contenus dans l'eau. L'eau salée pénètre ainsi à une extrémité de la membrane sous une pression de 80 bars, et après passage membranaire, l'eau ressort débarrassée de 99 % de son sel. La technologie de l'osmose inverse, qui constituait 20% des unités de production au début des années 1980, s'impose aujourd'hui, devant les procédés de distillation. Le coût de l'osmose inverse est devenu inférieur à celui de la distillation en 1995, avec l'apparition d'une nouvelle génération de membranes.

Au cours de la dernière décennie, les coûts de production du dessalement ont été divisés par deux. Selon les zones d'implantation, la nature de l'eau brute

et le coût de l'énergie, le mètre cube produit coûte de 0,5 à 1,1 USD pour l'osmose inverse et de 0,65 à 1,8 USD pour la distillation.

Bien qu'un peu moins de 1% de l'eau potable consommée dans le monde soit produite à partir du dessalement, les perspectives offertes par cette technologie sont donc grandissantes.

Avec plus de 17 000 unités installées sur la planète, qui représentent aujourd'hui environ 51 millions de m³/jour d'eau produite, il est estimé que la production d'eau dessalée se situera à 109 millions de m³/jour prévue en 2016. En termes de potentialité de marché, la banque d'affaires Goldman Sachs parle de 5 milliards de dollars de chiffre d'affaires annuel, avec une progression attendue de 10 à 15 % par an [1].

Le dessalement va ainsi s'imposer comme une ressource alternative essentielle à la pérennité de grandes zones urbaines du littoral où le besoin se fait sentir. Pour illustrer son importance désormais stratégique, le dessalement est devenu une nécessité vitale pour les grands centres urbains algériens du littoral méditerranéen tels que Oran, Alger, Arzew... .

L'autre stratégie pratiquée dans le grand sud algérien (Sahara, Oasis) pour l'alimentation des centres oasiens, c'est le recours à la déminéralisation des eaux saumâtres (souterraines et superficielles).

1. Maître de Conférences, Expert, Consultant International (CEE, PNUE, FAO). Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
e-mail: zouinid@yahoo.fr

1. MOBILISATION DES RESSOURCES EN EAU NON CONVENTIONNELLES EN ALGERIE

Au vu du développement industriel et de la demande de plus en plus croissante, tous les pays auront à faire face au problème du manque d'eau et sans hésitation à dire l'eau est devenue facteur de développement. La mobilisation des eaux superficielles a été de tous temps, une préoccupation pour l'homme.

L'Algérie est un pays semi- aride, voir même aride (200 mm à 400 mm de pluie par an) et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière, l'apport total des précipitations serait de l'ordre 100 milliards de mètres cubes d'eau par an dont 12,4 milliards de mètres cubes sont mobilisables en tenant compte des sites favorables techniquement (hydrologie, topographie, géologie).

Les ressources superficielles ont subi durant les deux dernières décennies des effets négatifs de la sécheresse, de la pollution et de la mauvaise gestion.

La demande en eau douce, croit chaque année de 2 à 3%, tandis que les ressources naturelles restent invariables. Pour faire face à cette pénurie d'eau surtout dans les grands centres urbains où les ressources conventionnelles ne suffisent plus, les nouvelles techniques de production d'eau potable ont été mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour l'Algérie est dessalement de l'eau de mer pour les villes situées en bordure de côtes.

La mobilisation des ressources en eau non conventionnelles est constituées du :

- Dessalement de l'eau de mer (littoral) ;
- Déminéralisation des eaux saumâtres (Sahara) ;
- Réutilisation des eaux usées épurées.

1.1. Dessalement de l'eau de mer

Le recours au dessalement pour améliorer l'offre en eau des grandes villes côtières algériennes sans accès direct

à des ressources supplémentaires en eau douce sera de plus en plus fréquent.

Actuellement le volume dessalé mobilisé est: 111,45 millions de mètre cube par an dont :

- 105,85 Hm³/an sont produits par les grandes stations de dessalement de l'eau de mer;
- 5,60 Hm³/an sont produits par les stations monoblocs de dessalement de l'eau de mer.

Les stations monoblocs au nombre de 21 de dessalement d'eau de mer pour une capacité globale de 57.500 m³/Jour ont été réalisées au titre du programme d'urgence (sécheresses répétées dans l'ouest et centre du pays). Ce programme d'urgence a été réalisé par deux entreprises (voir tableaux 1 et 2):

Dans le cadre de ce programme de stations monoblocs et suite à la persistance de la sécheresse au niveau de la région ouest du pays, le recours à la délocalisation des stations monoblocs vers d'autres localités où le manque d'eau se fait sentir (priorité à l'alimentation en eau potable) le cas par exemple de la station de Skikda 3 (Est) vers Bousfer (Oran, Ouest), un des avantages de ce type de station.

Les stations à grande capacité sont au nombre de sept, l'une est fonctionnelle (en 2007) celle d'El-Hamma à Alger produit 200 000 m³/jour (plus grande usine de dessalement d'Afrique). Elle permettra de couvrir le tiers des besoins en eau de la capitale Alger. C'est la société américaine IONICS, spécialiste du dessalement dans le monde qui fournira les équipements et assurera l'exploitation et la maintenance de l'usine pendant 25 ans. Il est à savoir en effet que les unités de dessalement inscrites au programme du gouvernement sont soumises à appel d'offre, suivant la formule BOO (acheter, posséder, exploiter), ce qui permet aux investisseurs étrangers qui s'associent à l'AEC jusqu'à hauteur de 70% de réaliser et d'exploiter les usines durant les 25 années que durera la concession accordée par l'Etat.

L'autre grand projet de dessalement en réalisation celui d'Oran (ouest du pays), le projet de Mactaa près de Mers

Tableau 1 : - LINKE-KCA / Allemagne : 08 Stations d'une capacité de 22 500 m³/Jour.

	Situation	Département	Capacité optimale en m ³ /j
1	Ain Benian 1	Alger	2 500
2	Ain Benian 2	Alger	2 500
3	Bou Smail	Tipaza	2 500
4	Pam Beach	Alger	2 500
5	Zeralda 1	Alger	2 500
6	Zeralda 2	Alger	2 500
7	Ghazaouet 1	Tlemcen	2 500
8	Ghazaouet 2	Tlemcen	2 500
	TOTAL		22 500

Tableau 2 : - Hydro Traitement/ Algérie : 13 Stations d'une capacité de 35 000 m³/Jour.

	Situation	Département	Capacité optimale en m ³ /j
1	Bousfer 1	Oran	3 000
2	Bousfer 2	Oran	2 500
3	Skikda 1	Skikda	2 000
4	Skikda 3	Skikda	5 000
5	Tigzirt	Tizi Ouzou	2 500
6	Bateau cassé 1	Alger	2 500
7	Cap Caxine	Alger	2 500
8	Corso	Boumerdes	5 000
9	Les Dunes	Oran	5 000
10	Bateau Cassé 2	Alger	2 500
11	Ain Benian 2	Alger	2 500
	Total		35 000

El Hadjadj, d'une capacité estimée à 500 000 m³ par jour est considéré comme l'un des plus grands projets dans le monde. Installé sur une surface de 18 hectares le projet permettra d'approvisionner la population de la région oranaise grâce à l'interchangeabilité du réseau.

Les autres projets concerneront toujours l'ouest du pays déficitaire en ressources hydriques :

A Tlemcen ce sont deux projets d'une capacité respective de 200.000 m³ par jour qui sont prévus à Malakoff et à Honein, alors que Beni Saf abritera une station de 200.000 m³ et Mostaganem deux projets de dessalement de l'eau de mer de 200 000 m³ chacun.

Evolution de la production en eau du programme/ 2002 de dessalement au cours des 05 Ans (2003/2007).

Au démarrage, la technique de dessalement n'était pas franchement au meilleur de son rendement surtout pour les groupes non leader dans le domaine.

Tableau 3: illustre bien la situation du rendement selon les deux entreprises citées.

Année	LINKE-KCA /Allemagne	Hydro Traitement/ Algérie
	Rendement (%)	Rendement (%)
2003	63	19
2004	63	19
2005	56	35
2006	68	50
2007	49	48
Moyenne	59,80%	34,20%

1.2. Déminéralisation des eaux saumâtres

Pour un équilibre de la source de développement (eau), il a été prévu la déminéralisation des eaux saumâtres des Chotts dans les régions arides du pays et cela au sud et dans la région intermédiaire (les hauts plateaux).

Dans ce cadre plusieurs stations de type monobloc à faible débit de traitement (100 à 200 m³/Jour) ont été réalisées pour traiter des eaux des chotts à 7 gramme/litre et mises à la disposition des collectivités locales destinées uniquement à l'alimentation en eau potable des populations.

A noter aussi que des stations de ce type ont été réalisées par des entreprises pour leur propre utilisation au niveau des bases de vie telles que celles de Sonatrach.

Un autre programme ambitieux pour ces régions du sud et des plateaux, démarrera en 2009 et compte 12 stations de haut débit (5000 à 34 000 m³/j) traitant des eaux de surface (Chotts) et souterraines judicieusement réparti .

1.3. Réutilisation des eaux usées urbaines épurées

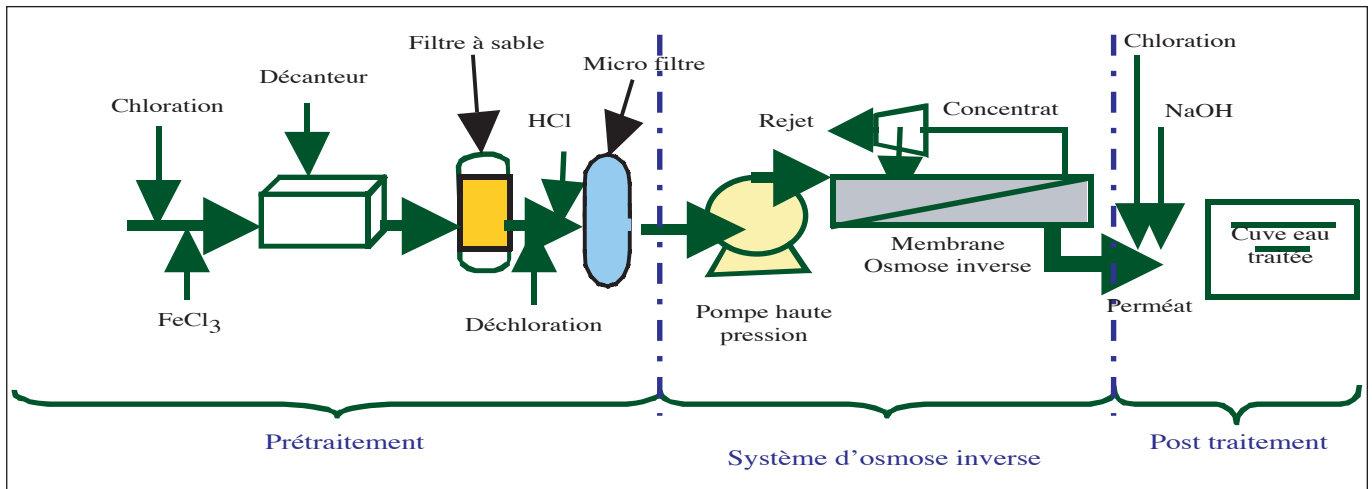
La mobilisation des eaux usées épurées reste très faible voir l'absence totale. La seule station de traitement se trouve dans la zone des plateaux destinée à l'irrigation et produit une capacité de 2 500 m³/jour pour l'irrigation du périmètre du Bordj de 100 hectares.

Un programme d'avenir de la réutilisation de ces eaux usées après traitement est prévu au niveau des grands centres urbains et traitera en 2012 un volume de 648 820 m³/Jour .

2. EXEMPLE TYPE D'UNE STATION DE DESSALEMENT «CORSO»

La station de dessalement se situe de la région de Corso dans la Willaya de Boumerdes, en bordure de la mer méditerranéenne, d'une capacité 5000 m³/J. La prise

Figure 1 : Principe de la station de dessalement de l'eau de mer



ouverte en pleine mer est utilisée pour alimenter la station. La chaîne de traitement de l'eau de mer faisant appel à la filtration membranaire, comporte plusieurs procédés physico-chimiques tels que illustré par la figure 1.

2.1. Principe de fonctionnement

L'eau de mer aspirée subit tout d'abord un prétraitement par chloration avec de l'hypochlorite de sodium, ensuite une injection de coagulant flocculant est effectuée afin d'agglomérer les particules en suspension sous forme de floccs et permettre leur décantation dans un décanteur lamellaire. L'eau décantée passe dans les filtres à sables pour éliminer les particules en suspension. Le chlore résiduel est éliminé par une déchloration au bisulfite de sodium, ainsi les microfiltres, les pompes à haute pression et les membranes d'osmose inverse (OI) s'en

trouvent protégés. Afin d'éviter la précipitation des sels sur les surfaces des membranes, une injection d'acide chlorhydrique est effectuée. L'eau acidifiée subit une pré-filtration sur microfiltration à cartouche de 5 μm afin de retenir les particules colloïdales.

L'eau prétraitée arrive au système d'osmose inverse pour réduire la salinité de l'eau. L'étape finale dans la chaîne de traitement consiste en une désinfection et une correction du pH.

2.2. Qualité de l'eau

Les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques de l'eau brute (PE1), l'eau prétraitée (PE2) et l'eau osmosée (PE3) pour des échantillons prélevés le 20/04/2006 sont présentées dans le tableau 1

Tableau 3: Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'eau.

Paramètre	PE1	PE2	PE3
Turbidité (NTU)	2,56(instable)	0,19	0,09
pH à 19,7 (°C)	8,62	7,43	7,87
Cond (mS/cm)	57600	57600	19800
[Cl ⁻] (mg/L)	21170,93	21170,93	755,92
[Ca ²⁺] (mg/L)	440	440	152,37
[Mg ²⁺] (mg/L)	1344	1344	462,69
[HCO ₃ ⁺] (mg/L)	142,33	142	41,56
[SO ₄ ²⁻] (mg/L)	2832	2782	544,18
[K ⁺] (mg/L)	331,89	331,89	119,65
[Na ⁺] (mg/L)	10208,8	10208,8	3531,85
[NO ₂ ⁻] (mg/L)	0,0286	<0,002	0,00053
[NO ₃ ⁻] (mg/L)	0,47	0,12	0,08
[NH ₄ ⁺] (mg/L)	0,53	0,13	0,01

Tableau 3: Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'eau.(suite)

TDS (mg/L)	36470,95	36087,982	13830,82
Coliformes fécaux	Absent	Absent	Absent
Coliformes totaux	Absent	Absent	Absent
Spectrocoques fécaux	Absent	Absent	Absent
Salmonelle	Absent	Absent	Absent

Les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques de l'eau brute provenant de la mer méditerranéenne de la région de Corso, montrent une forte salinité de l'eau brute, sa concentration est estimée à 37000 mg/L, due à la présence des sels minéraux et une bonne qualité bactériologique. Par ailleurs, la turbidité de l'eau de mer selon le tableau 1 est faible avec une valeur égale à 2,56 NTU, notons que ce paramètre physique peut changer au cours du temps.

Les résultats des analyses physico-chimiques présentées au tableau 1, ont permis de constater en premier lieu que le prétraitement utilisé au niveau de la station de Corso permet de réduire les ions indésirables, par contre il n'a aucune influence sur la rétention des sels dissous et les membranes d'osmose inverse de la station de Corso ne retiennent pas la totalité des éléments minéraux. En effet, le pourcentage des sels total dissous (TDS) estimé est égal à 84,6%. Ce pourcentage n'est pas conforme à celui prévu initialement par le fournisseur, qui estime la rétention des membranes utilisées à 99,8% [2].

2.1. Mesure de la conductivité

La présence des composés ionique dans l'eau peut être

exprimée en fonction de la conductivité. La courbe de figure 2 montre une stabilité de la conductivité de l'eau brute et l'eau prétraitée.

Les valeurs de la conductivité de l'eau osmosée présentées sur la figure 2, ont été enregistrées après deux ans du démarrage de la station. Durant toute cette période, la conductivité du perméat a toujours été conforme à la norme. Une élévation brusque de la conductivité a été relevée (1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$) et ce le 16-02-2006. Cette augmentation a nécessité une procédure immédiate de nettoyage acide et basique ainsi qu'un lavage à l'eau osmosée. Ces procédures n'ont pas permis de restaurer la conductivité initiale de perméat ce qui a obligé l'exploitant de mettre à l'arrêt cette station. Un cas similaire a été constaté par Roth et al. [3] dans leur étude, une augmentation de la conductivité a été observée après 8 mois de décolmatage des membranes. Ils ont considéré que cette augmentation est due au dysfonctionnement du prétraitement, ce qui rend inévitable le changement des membranes d'osmose inverse.

Figure 2: Variation de la conductivité de l'eau prétraitée en fonction du temps

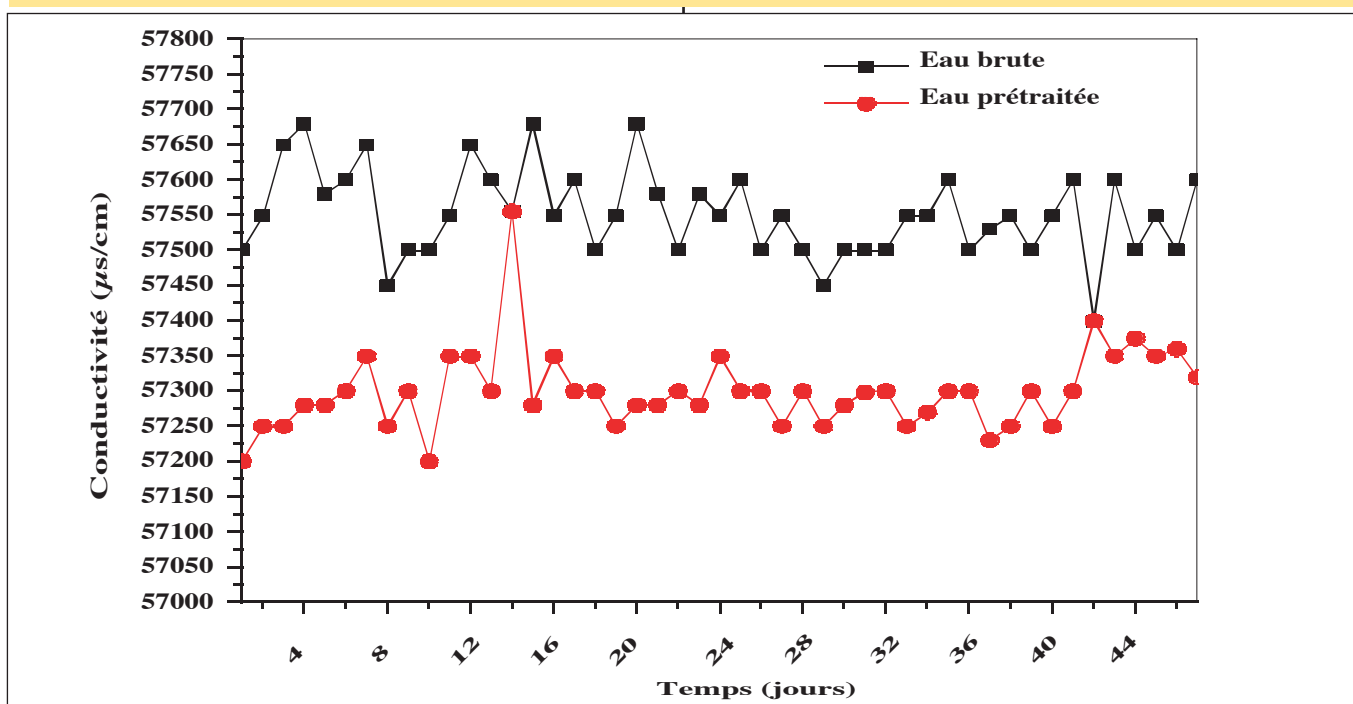


Figure 2: Variation de la conductivité de l'eau prétraitée en fonction du temps

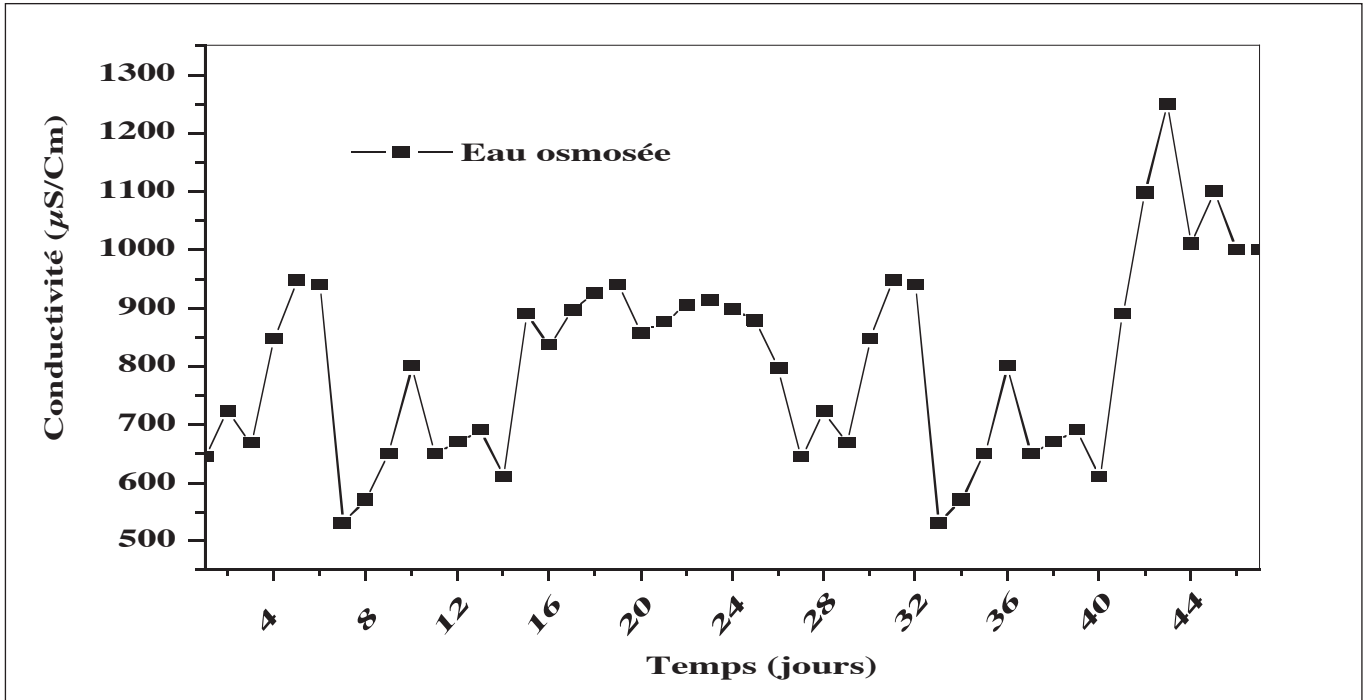
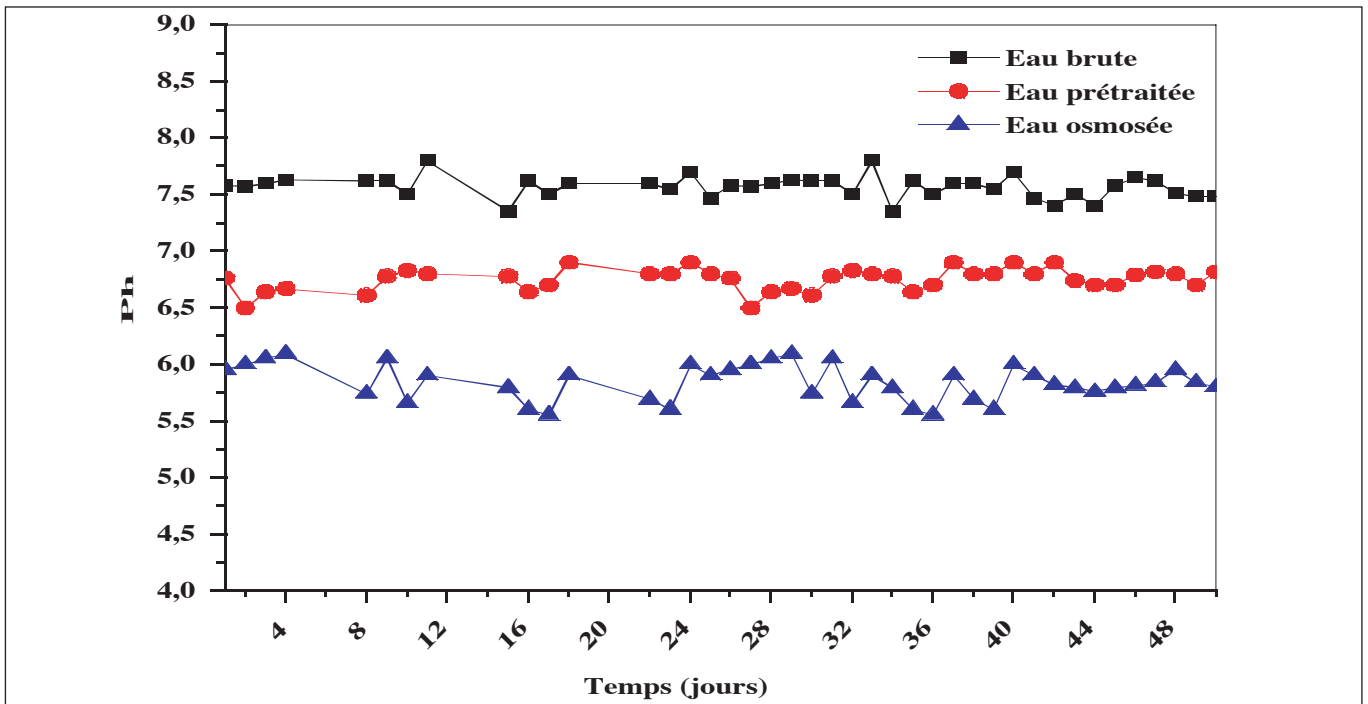


Figure 3: Évolution de pH de l'eau en fonction du temps



2.2. Mesure du pH

La Figure 3 montre que le pH de l'eau brute qui alimente la station est légèrement alcalin c'est le cas de l'eau de mer. Sa valeur est presque constante elle varie entre (7,35-7,8). En comparant le pH de l'eau brute avec le pH

de l'eau prétraitée, on remarque une diminution de ce dernier qui est due à l'injection d'acide chlorhydrique. Cette diminution atteint le pH d'équilibre. Après le passage de l'eau prétraitée les membranes d'osmose inverse, un pH acide de l'eau osmosée allant de 5,55 à 6,0 est constaté.

2.3. Les paramètres de fonctionnement

Les pertes de charges:

Les pertes de charge sont un facteur qui permet de prédire le phénomène de colmatage [4]. Les travaux de Elguera et al. [5] ont montré que le colmatage des membranes par formation d'un biofilm et d'un précipité sur la surface membranaire conduit à l'augmentation de la chute de pression dans le système d'osmose inverse. De ce fait, ils ont conclu que la chute de pression à travers la membrane doit être constante pour maintenir les performances du système. En ce qui concerne notre étude, nous avons remarqué que la variation de la chute de pression est quasi constante, allant de 1,55 bar à 1,78 bar (figure 4). Ceci ne peut constituer une preuve d'absence du colmatage des membranes. En effet, bien que les analyses bactériologiques de l'eau prétraitée démontrent la faible probabilité de formation d'un biofilm (tableau 1), la possibilité de l'existence d'un colmatage par précipitation ne peut être écartée, même au vu de la stabilité des pertes de charge, car

le personnel de la station intervient régulièrement pour maintenir constantes les pertes de charge manuellement. De ce fait, les variations des pertes de charge en fonction du temps qui sont enregistrées au niveau de la station de Corso ne permettent pas de prédire l'existence du phénomène de colmatage des membranes.

Taux de conversion:

La figure 5 qui représente l'évolution du taux de conversion en fonction du temps, montre une stabilité du taux de conversion durant la période allant du 28-12-2005 au 13-01-2006, avec une variation de 38,11% à 40,01%. Ensuite, le taux diminue jusqu'à une valeur de 33,45%.

Le lavage et le nettoyage chimique des membranes effectués au niveau de la station, permettent d'augmenter le taux de conversion à 37,65%. Après une semaine de nettoyage, le taux diminue jusqu'à une valeur de 31%. Par la suite, il est devenu impossible d'augmenter le taux de conversion malgré le nettoyage chimique

Figure 2: Variation de la conductivité de l'eau prétraitée en fonction du temps

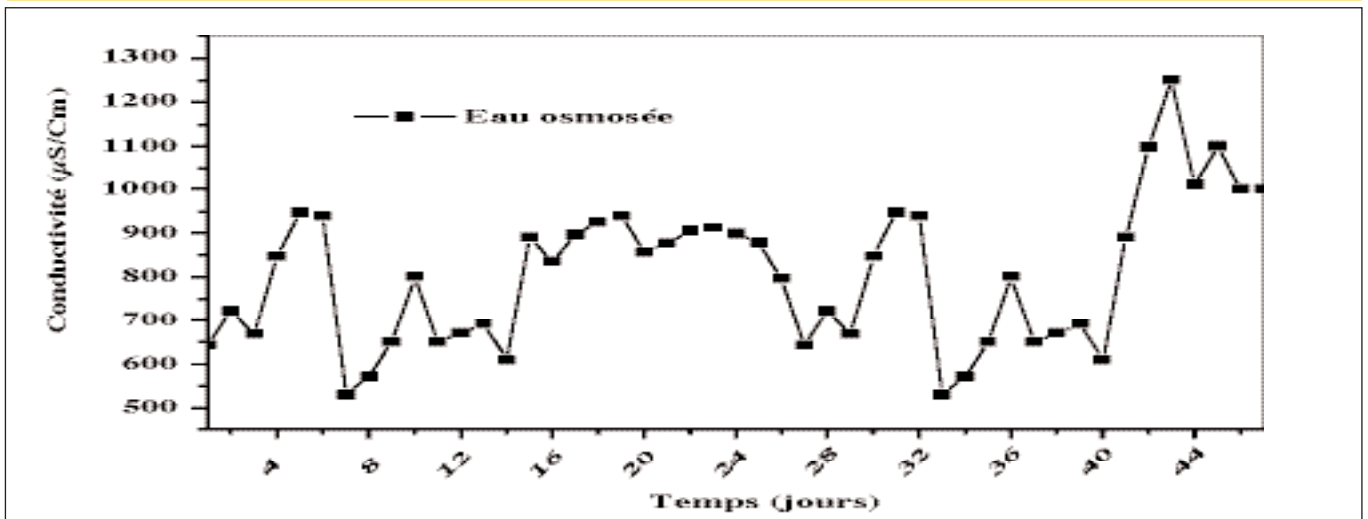


Figure 2: Variation de la conductivité de l'eau prétraitée en fonction du temps

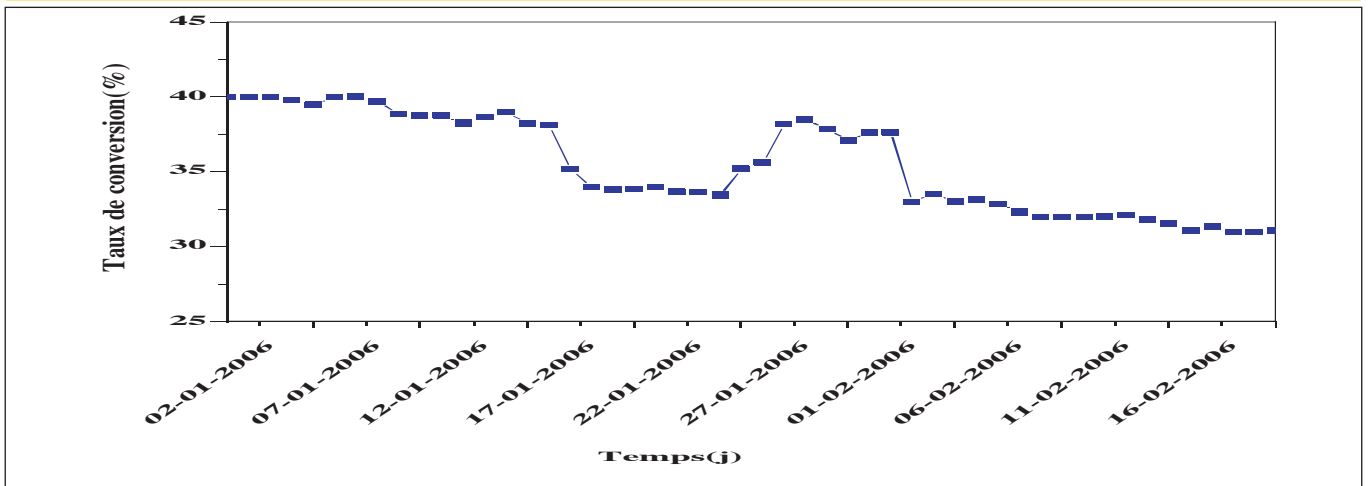
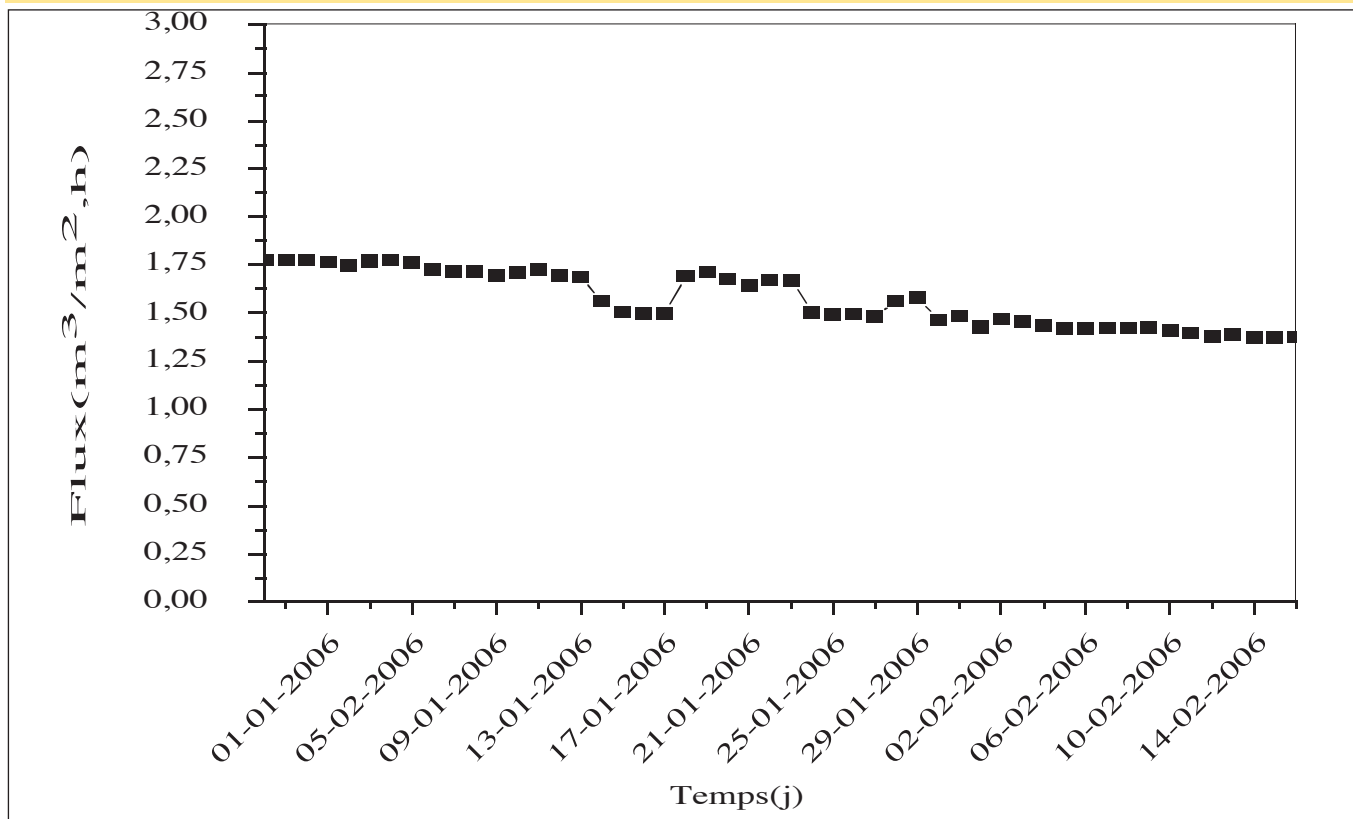


Figure 6: Évolution de flux du perméat en fonction du temps



Flux du perméat :

Les variations du flux du perméat en fonction du temps sont représentées sur la figure 6 pour une période de 3 mois de fonctionnement. En effet, la courbe de cette figure illustre une décroissance du flux du perméat au 26-12-2005 à 13-01-2006, qui correspond au début de l'augmentation de la conductivité, ce qui s'explique par le colmatage des membranes. Après le nettoyage des membranes, le flux du perméat augmente faiblement, puis diminue par la suite jusqu'à l'arrêt de la station. De ce fait on peut conclure que les membranes d'osmose inverse de la station sont colmatées. Le colmatage des membranes est attribué aux substances colmatantes non retenues par les filières de prétraitement utilisé et cela suite aux défaillances détectées à ce niveau.

Analyse de la membrane d'osmose inverse:

L'augmentation brusque de la conductivité au quelle s'ajoute la dégradation de la qualité du perméat, démontre l'altération des surfaces membranaires. Pour confirmer cette supposition, nous avons caractérisé la surface membranaire. La structure membranaire défectueuse est caractérisée par l'analyse microscopique à balayage électronique (MEB) de la couche active de la surface membranaire. Les résultats ont été confirmés par une analyse complémentaire du dépôt colmatant par la diffraction X. Une première analyse visuelle de la membrane montre l'existence d'un dépôt de couleur

rouge sur la totalité de la surface membranaire, ce qui démontre le colmatage de la surface membranaire.

Le spectre des éléments trouvés, montre que les composés les plus fréquemment rencontrés dans le dépôt colmatant sont de nature minérale constitués essentiellement de carbonate de calcium (calcite), de carbonate de magnésium (gypse), de la silice (SiO_2) et une faible proportion d'oxyde de fer.

Les résultats d'analyse au niveau de la station de Corso donne l'idée réelle de fonctionnement et résultats attendus, en terme d'efficacité de fonctionnement, ces analyses indiquent que le prétraitement n'est pas adéquat pour protéger les membranes.

Les membranes d'osmose inverse sont sujettes de colmatage progressif associé à une altération de la surface active. Ceci est confirmé d'une part, par la médiocre qualité de l'eau osmosée et par la diminution du flux. D'autre part, l'analyse au MEB(microscopie à balayage électronique) montre clairement une dégradation de la membrane et la présence d'un dépôt colmatant dont la nature est principalement colloïdal et inorganique.

3. PERSPECTIVES A L'HORIZON 2025 «EAU DE MER POUR EAU POTABLE»

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ce qui a incité

les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer. Le dessalement de l'eau de mer en Algérie revêt un caractère stratégique, il remplacera les ressources naturelles dans la majorité des villes du nord algérien. Un choix pour lequel ont également opté nombreux pays les pays de la péninsule arabique, la Tunisie, le Maroc et l'Égypte.

Pour pallier le manque d'eau potable dans le pays, l'Algérie a décidé de miser sur des usines de dessalement d'eau de mer. Les autorités comptent monter à 43 stations à l'horizon 2019 pour répondre aux besoins domestiques nationaux. L'Algérie a choisi le dessalement d'eau de mer pour faire face à la demande domestique d'eau potable dans le pays. Au dix usines de productions déjà opérationnelles, le pays souhaite en rajouter 33 autres d'ici 2019 et doubler les capacités journalières actuelles qui s'élèvent à 1,04 million de m³. Et ce via la société d'investissement Algerian Energy Company (filiale de la Sonatrach et de la Sonelgaz) et l'Algérienne des eaux.

CONCLUSION

La solution du dessalement a été mise en œuvre avec succès, depuis quelques années grâce au partenariat étranger, et à de nombreux petits projets financés sur le budget de l'État. Elle est également une option hautement stratégique qui mettra fin, à terme, dans la majorité des villes du nord du pays, selon les prévisions du gouvernement, aux difficultés récurrentes d'approvisionnement en eau, une denrée de plus en plus rare à cause des aléas climatiques et des longues périodes de sécheresse. C'est à l'ouest du pays où la population souffre d'un déficit sévère en eau potable, et où les rationnements peuvent aller jusqu'à un jour sur cinq que seront installées la plupart des stations de dessalement ce qui permettra à la population de profiter d'une eau de même qualité que l'eau conventionnelle. L'eau dessalée dont le prix de revient variera entre 45 et 55 DA (0,5 euro) le mètre cube sera distribuée par l'ADE (Algérienne des Eaux) à des prix étudiés qui devraient rester au même niveau que l'eau conventionnelle.

Références Bibliographiques

- [1] Salim.Kehal. Retrospective et perspectives du dessalement en Algérie, *Desalination*136 (2001)35-42.
- [2] Claude Cardot. Les traitements de l'eau du génie de l'environnement "procédés physico chimiques et biologiques", Edition ellipses 1999, Paris.
- [3] E. Roth, B. Fabre, B. Faller, Study of fouling of reverse osmosis membranes used to produce water for hemodialysis, *Revue des sciences de l'eau*, 3 (1998) 409-427.
- [4] Maurel, A. Dessalement de l'eau de mer *Technique de l'ingénieur J1, J2700*(Tome 1)2007-11-22).
- [5] A.Munoz Elguera. S.O.Pérez Baez, Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake, *Desalination* 184 (2005) 1153-1163
- [6] Site MRE, mre.gov.dz(ministère des ressources en eau) données publiées.
- [7] <http://www.frstrategie.org>

EXPERIENCE DE L'ONEP EN MATIERE DE DESSALEMENT D'EAU

S. Jariri¹

Résumé

Au Maroc, à l'instar des pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties. En fait, le potentiel hydrique au Maroc est de l'ordre de 140 milliards m³ dont une quantité mobilisable de 22 milliards m³ répartie en eaux superficielles de 17 m³ et 4 m³ d'eaux souterraines. La dotation actuelle est de 700 m³/habitant/an et atteindra le seuil de stress hydrique de 500 m³/habitant/an en 2020, d'où la nécessité de dégager de nouvelles ressources en eau.

Le recours au dessalement s'avère donc nécessaire pour l'alimentation en eau potable des régions côtières du pays comme c'est le cas des Provinces du Sud pour des raisons d'aridité du climat, de rareté des ressources en eau conventionnelles particulièrement au sud du Maroc, de pollution des ressources disponibles, de disponibilité de la ressource d'eau de mer et de compétitivité du coût du dessalement par rapport à d'autres moyens d'alimentation en eau potable.

L'ONEP a capitalisé, durant plus de 30 ans, une expérience probante dans la réalisation, l'exploitation et la maintenance des stations de dessalement, spécialement les unités d'osmose inverse. La capacité de production est de l'ordre de 35 000 m³/j en 2009 alors qu'elle était de 75 m³/j en 1976.

L'ONEP a programmé d'autres projets de dessalement d'eau, notamment le projet de dessalement d'eau de mer pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Agadir, pour une capacité de production de 200 000 m³/j, dont la 1ère phase (100 000 m³/j) est en cours de consultation des pour une mise en service prévisionnelle en 2012. A noter que cette station de dessalement, qui sera la plus grande au niveau du Maroc sera acquise dans le cadre d'une gestion déléguée, en s'inspirant des standards internationaux en matière de réalisation de stations de dessalement.

D'autres unités de dessalement sont aussi programmées à court terme, notamment la station de dessalement de Tan Tan pour un débit de 9000 m³/j, et les stations de déminéralisation de Khénifra (30000 m³/j) et Maroc Central (20000 m³/j) à partir des eaux de l'Oued Oum Erbia.

En conclusion, le dessalement au Maroc reste une solution parmi d'autres pour la mobilisation des ressources en eau, dans un contexte de rareté des ressources conventionnelles et les innovations technologiques des dernières années ont permis de réduire de manière substantielle les coûts d'investissement et d'exploitation. Aussi, l'ONEP a capitalisé un savoir-faire indéniable en la matière et intègre la planification des infrastructures de dessalement d'eau dans le panel des solutions techniques à même d'assurer la pérennisation du service de l'eau potable à l'échelle du Royaume.

1. CONTEXTE DU DESSALEMENT D'EAU AU MAROC :

Au Maroc, à l'instar des pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties. En fait, le potentiel hydrique au Maroc est de l'ordre de 140 milliards m³ dont une quantité mobilisable de 22 milliards m³ répartie en eaux superficielles de 17 m³ et 4 m³ d'eaux souterraines. La dotation actuelle est de 700 m³/habitant/an et atteindra le seuil de stress hydrique de 500 m³/habitant/an en 2020, d'où la nécessité de dégager de nouvelles ressources en eau.

Le recours au dessalement s'avère donc nécessaire pour l'alimentation en eau potable des régions côtières du Pays comme c'est le cas des Provinces du Sud pour les raisons suivantes :

- *Aridité du climat,*
- *Rareté des ressources en eau conventionnelles particulièrement au sud du Maroc,*
- *Pollution des ressources disponibles,*
- *Disponibilité de la ressource d'eau de mer,*
- *Coût de dessalement compétitif par rapport à d'autres moyens d'alimentation en eau potable*

Le dessalement d'eau a été, jusqu'à présent, réservé à l'alimentation en eau potable des Provinces du Sud du Maroc. En effet, au lendemain de retour de ces Provinces à la mère patrie en 1975, le secteur de l'eau souffrait d'une :

- Insuffisance des ressources en eau dégagées pour satisfaire les besoins immédiats,
- Insuffisance des infrastructures en installations

¹. Ingénieur, Chef de la Division des Nouvelles Technologies de l'Eau à la Direction Technique et Ingénierie. Office National de l'Eau potable (ONEP). Maroc. E-mail : sjariri@onep.org.ma

d'eau potable (stations de traitement, adductions, réservoirs et réseau de distribution).

Il est indéniable que le dessalement d'eau de mer reste une technologie relativement chère. Toutefois, le coût de dessalement devient de plus en plus compétitif par rapport à d'autres alternatives d'alimentation en eau potable, notamment le transport par les camions citernes, le transfert d'eau via de longues adductions interrégionales, etc...

La technologie que l'ONEP a choisie pour le dessalement de l'eau de mer est l'Osmose Inverse (OI) qui présente les avantages suivants :

- Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5 Kwh/m³) ;
- Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau ;
- Le procédé d'osmose inverse est mieux adapté aux stations de petite taille ou de taille moyenne (cas du Maroc) ;
- Un coût d'investissement relativement bas ;
- Une durée de mise en œuvre réduite ;
- Bonne qualité de l'eau brute (basse salinité d'eau de mer : 35 g/l) ;
- Réduction du coût des membranes de presque la moitié durant les dix dernières années;
- Développement des performances techniques des membranes notamment par l'accroissement du taux de conversion à plus de 50% et par la réduction de la pression d'alimentation à moins de 65 bars pour le dessalement d'eau de mer ;
- Amélioration indéniable du rendement énergétique des machines tournantes (moteurs, pompes, turbines...);
- Progrès substantiels effectués en matière de récupération d'énergie.

2. PRINCIPAUX PROCÉDES DE DESSALEMENT D'EAU :

Le dessalement d'eau est un procédé physique qui permet de ramener le taux de salinité d'eau brute, à des valeurs conformes aux normes de potabilité d'eau. Lorsque l'eau brute provient d'une nappe d'eau saumâtre (**2g/l < TDS < 15g/l**), on parle d'une déminéralisation, sachant que l'eau de mer titre une salinité de l'ordre de 35 g/l.

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases: la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes: l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont

été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

Quel que soit le procédé envisagé de séparation du sel et de l'eau, toutes les installations de dessalement comportent quatre étapes :

- une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- le procédé de dessalement lui-même,
- le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

Dans les procédés de distillation, 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 condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit, en fait, d'accélérer le cycle naturel de l'eau. Les procédés de distillation les plus répandus en raison de leurs performances appréciables sont les suivants :

- La distillation par détentes successives (MSF) : éprouvé pour les grandes capacités (> 30 000 m³/j)
 - La distillation à multiples effets (MED)
 - La distillation par compression de vapeur (MES/VC)
- } Petites et moyennes capacités

Quant au procédé d'osmose inverse, il s'agit d'un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression. Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10-7 mm de taille. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression.

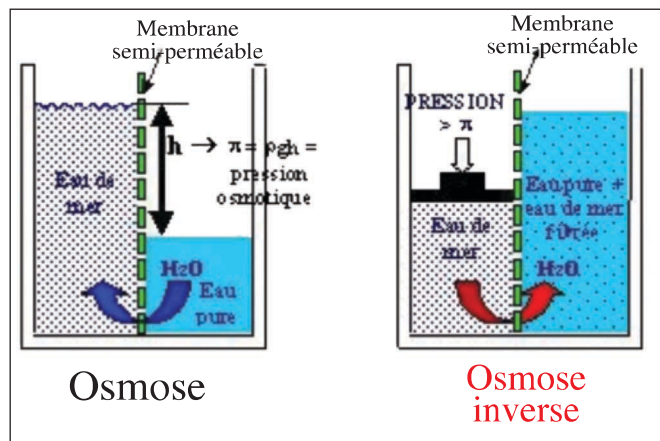
Principe de l'Osmose Inverse :

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par

osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

Les principaux avantages et inconvénients des procédés de dessalement d'eau sont comme suit :



	Avantages	Inconvénients
Distillation	<ul style="list-style-type: none"> - Indépendance à la variation de la qualité d'eau brute ; - Utilisation pour des grandes capacités de production d'eau ; - Exploitation relativement aisée ; - Une eau produite présentant un TDS faible requis particulièrement pour les besoins industriels. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un taux de conversion bas (inférieur à 35%) ; - Une consommation spécifique d'énergie relativement élevée (8 à 25 Kwh/m³ selon le procédé) ; - Une non flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau ; - Un coût d'investissement élevé.
Osmose inverse	<ul style="list-style-type: none"> - Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%) ; - Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5Kwh/m³) ; - Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau ; - Un coût d'investissement relativement bas ; - Une durée de mise en œuvre réduite. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à la variation de la qualité d'eau brute et surtout aux pollutions ; - Nécessité d'un personnel qualifié ; - Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement ; - Un coût de maintenance élevé dû aux frais de renouvellement des membranes d'une durée de vie ne dépassant pas 7 ans à présent.

3. EXPERIENCE DE L'ONEP EN MATIERE DE DESSALEMENT :

L'ONEP a capitalisé, durant plus de 30 ans, une expérience probante dans la réalisation, l'exploitation et la maintenance des stations de dessalement, spécia-

lement les unités d'osmose inverse. La capacité de production est de l'ordre de 35 000 milles m³/j en 2009 alors qu'elle était de 75 m³/j en 1976.

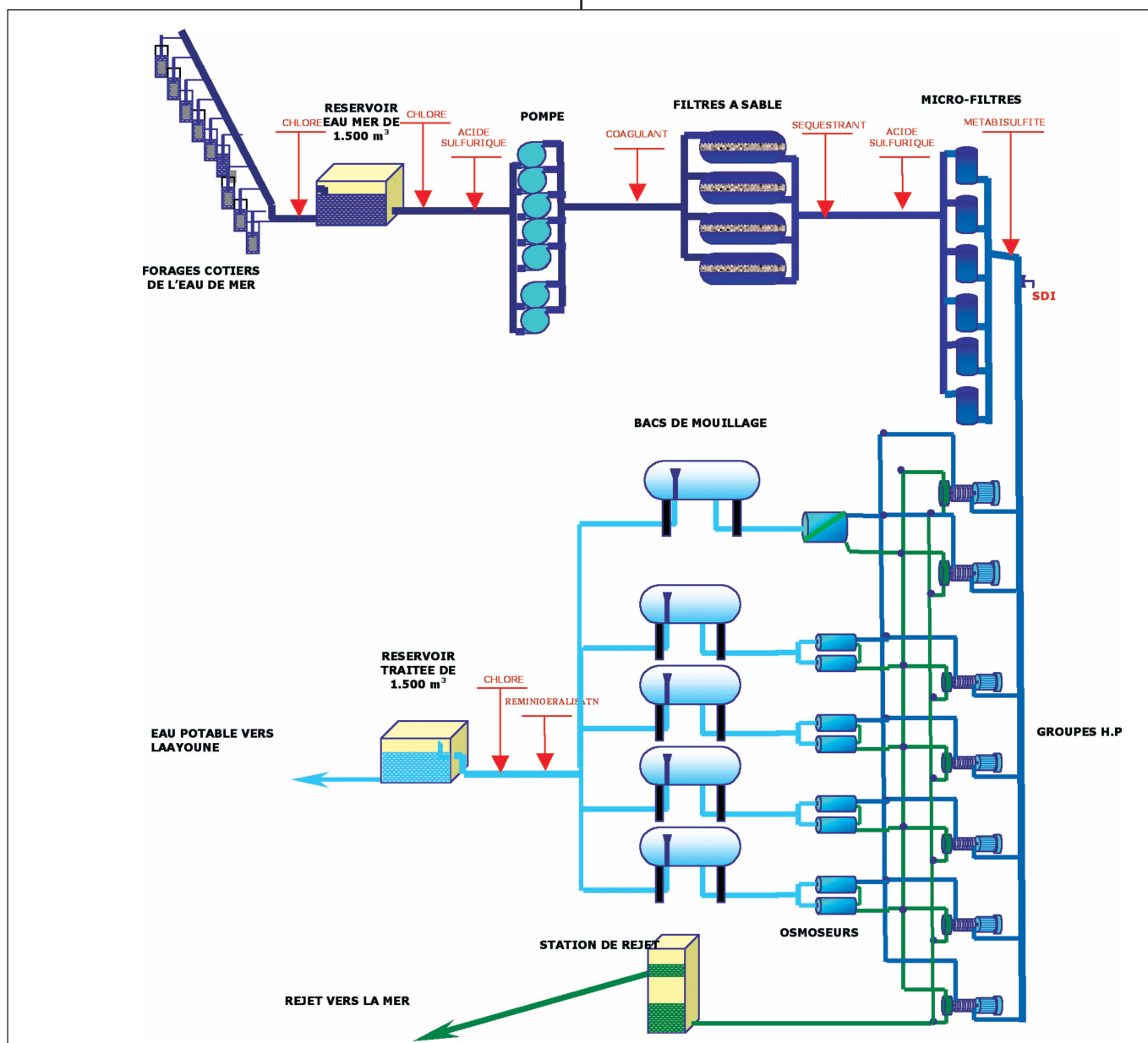
Le tableau, ci-après, résume, les réalisations de l'ONEP en matière de dessalement d'eau de mer et de déminéralisation d'eau saumâtre.

Centre	Eau brute	Procédé	Capacité (m3/j)	Date de MES	Observations
Tarfaya	Eau saumâtre	ED	75	1976	Arrêt en 1984
Boujdour	Eau de mer	MED - MCV	250	1977	arrêt en 1995
Tarfaya	Eau saumâtre	OI	120	1983	Arrêt en 2001
Essemara	Eau saumâtre	OI	330	1986	arrêt en 1994
Laâyoune	Eau de mer	OI	7 000	1995	Phase 1
Boujdour	Eau de mer	OI	800	1995	Phase 1
Tarfaya	Eau saumâtre	OI	800	2001	
Tantan	Eau saumâtre	OI	1 700	2003	
Laâyoune	Eau de mer	OI	6 000	2005	Phase 2

Boujdour	Eau de mer	OI	2 600	2005	Phase 2
Tagounite	Eau saumâtre	OI	320	2008	
Abris de pêche	Eau de mer	OI	120	2009	Travaux en cours
Daoura	Eau saumâtre	OI	240	2010	Travaux en cours
Laâyoune	Eau de mer	OI	13 000	2010	Phase 3 - en cours
Akhfénir	Eau de mer	OI	800	2010	Travaux en cours
Boujdour	Eau de mer	OI	1300	2010	en cours de lancement
Total			35 455	2% environ de la production totale de l'ONEP	

La figure, ci-après, reflète les divers ouvrages de production de la station de dessalement de la ville de Laâyoune.

En termes de membranes, l'ONEP a opté pour les membranes spiralées (HYDRANAUTICS, FILMTEC, TORAY, OSMONICS) car leur prix est en décroissement et leur taux de conversion (50% pour



l'eau de mer) est supérieur à celui des modules à fibres creuses (DUPONT –inexistant au marché- et TOYOBO) (45% pour l'eau de mer) et dont le prix est dix fois plus cher.

En termes de récupération d'énergie, l'ONEP opte, auparavant, pour la turbine Pelton qui présente un taux de récupération d'énergie compris entre 35% et 40%. Actuellement, l'ONEP opte pour les échangeurs de pression (DWEER CALDER et ERI) qui présentent un taux de récupération d'énergie compris entre 45% et 50%.

Perspectives du dessalement :

L'ONEP a programmé d'autres projets de dessalement d'eau, notamment le projet de dessalement d'eau de mer pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Agadir, pour une capacité de production de 200 000 m³/j, dont la 1^{ère} phase (100 000 m³/j) est en cours pour une mise en service prévisionnelle en 2012. A noter que cette station de dessalement, qui sera la plus grande au niveau du Maroc sera acquise dans le cadre d'une gestion déléguée, en s'inspirant des standards internationaux en matière de réalisation de stations de dessalement.

D'autres unités de dessalement sont aussi programmées, notamment la station de dessalement de Tan Tan pour un débit de 9000 m³/j, et la station de déminéralisation de Khénifra pour un débit de 30000 m³/j.

En conclusion, le dessalement au Maroc reste une solution parmi d'autres pour la mobilisation des ressources en eau, dans un contexte de rareté des ressources conventionnelles et les innovations technologiques des dernières années ont permis de réduire de manière substantielle les coûts d'investissement et d'exploitation. Aussi, l'ONEP a capitalisé un savoir-faire indéniable en la matière et intègre la planification des infrastructures de dessalement d'eau dans le panel des solutions techniques à même d'assurer la pérennisation du service de l'eau potable à l'échelle du Royaume.

EXPERIENCE TUNISIENNE DANS LE DOMAINE DE DESSALEMENT DES EAUX

S. Seddik¹

1. INTRODUCTION

Les ressources en eau en Tunisie sont caractérisées par:

- Leur rareté : La dotation par habitant est de 450 m³/an en 2006 et passera à 320 m³/an en 2030.
- La salinité relativement élevée: 46% des ressources en eau ont une salinité qui dépasse 1.5 g/l.
- La répartition des ressources en eau dans l'espace : 86% des ressources en eaux de bonne qualité sont situées dans le Nord du pays.
- En plus de cette rareté, plusieurs menaces pèsent sur la durabilité de ces ressources en eau :
- La surexploitation des ressources en eau souterraines
- La pollution des ressources eau (cours d'eau, nappes,....).
- L'envasement des retenues.
- La fréquence élevée d'années sèches successives.
- Le gaspillage d'eau et les pertes
- Pour pallier à ces difficultés, une nouvelle approche basée sur la gestion de la demande a été instaurée depuis les années 90 et qui vient pour consolider la stratégie nationale de mobilisation des ressources en eau et qui a pour objectifs :
- Le développement et la valorisation des ressources en eau non conventionnelles (Augmentation de la part des ressources en eau non conventionnelles à hauteur de 7 %).
- Le développement d'un programme national d'économie d'eau (Economie d'eau d'environ 30%).
- La protection des ressources en eau
- La gestion intégrée des ressources en eau

2. LE DESSALEMENT DES EAUX (SITUATION ACTUELLE)

La capacité de production totale des eaux dessalées s'élève à 117 mille m³/j répartie comme suit :

- 72000 m³/j sont produits par 5 stations de la Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux (SONEDE) dont la plus ancienne celle de l'Ile de Kerkennah dont la mise en service remonte à 1983. La capacité de production varie de 3300 m³/j (à Kerkennah) à 34000 m³/j (à Gabès).
- 45000 m³/j sont produits par environ 70 stations de dessalement privés (industriels et touristiques) disséminées surtout le long de la région côtière.

Le dessalement des eaux est destiné à concurrence de 60% environ pour l'eau potable, 30% pour l'usage industriel et 10% pour l'usage touristique.

La technologie RO (Reverse Osmose) est utilisée dans 80% des cas, l'Electrodialyse dans 13% des cas et le dessalement par voie Thermique dans 9% des cas.

3. LE DESSALMENT (PERSPECTIVES D'AVENIR)

La capacité de production passera de 117000 m³/j actuellement à 407000 m³/j en 2020 dont 70% par la SONEDE et 30% par le secteur privé.

Année	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Capacité SONEDE mille m ³ /j	3	3	26	59	72	158	248	298
Capacité des autres secteurs mille m ³ /j	30	33	37	40	45	68	103	109
Capacité totale mille m ³ /j	33	36	62	99	117	227	352	407
Production totale million m ³ /j/an.	8	8	14	23	27	52	80	93

1. Directeur Général du Génie Rural et de l'Exploitation des Eaux, Ministère de l'Agriculture et des ressources hydrauliques, Tunisie. E-mail : saadesseddik@yahoo.fr

4. LES PRINCIPAUX PROGRAMMES

- Programme Présidentiel d'amélioration de la qualité de l'eau dans le Sud Tunisien: Il concerne la mise en place de 18 stations de dessalement d'une capacité totale de 76 000 m³/j pour alimenter 740 mille habitants. Ces stations seront mises en service entre 2010 et 2012.
- Projet de dessalement d'eau de mer à Jerba d'une capacité de production de 50000 m³/j selon la technologie d'osmose inverse et d'un cout prévisionnel de 61 millions de dinars. Cette station sera construite sous forme de concession type BTO pour répondre aux besoins en eau de Jerba à l'horizon 2025. L'appel d'offres pour le choix d'un concessionnaire est en cours.
- Projet de dessalement d'eau de mer de Zarat d'une capacité de production de 50000 m³/j selon la technologie d'osmose inverse. Cette station sera construite sous forme de concession type BTO pour répondre aux besoins en eau de Gabès et Médenine à l'horizon 2025. Cette station sera mise en service en 2012.
- Projet de dessalement de Sfax d'une capacité 150000 m³/j en 3 unités de 50000 m³/j chacune. Cette station sera construite sous forme de concession pour répondre aux besoins en eau de la ville de Sfax à l'horizon 2025. La première tranche de cette station sera mise en service en 2015 et les deux autres respectivement en 2020 et 2025.
- Projet d'amélioration de la qualité des eaux dans les zones de parcours du Sud Tunisien : Il concerne la mise en place de 45 stations de dessalement à énergie renouvelables sur puits de surface et forage. Le Cout du projet est de 10 millions de dinars cofinancé par la JICA pour une capacité totale de production de 210 m³/j. La période de réalisation s'étalera de 2009 à 2013.
- La mise en place de 60 unités de dessalement par le secteur privé sur une période de 5 ans et d'une capacité cumulée 40000 m³/j.

FINANCEMENT DES PROJETS DE DESSALEMENT DES EAUX

M. Ouhssain¹ & El M. Arrifi²

Résumé

Avec la raréfaction des ressources en eau douce dans plusieurs régions du monde, conséquence inévitable des changements climatiques, le dessalement des eaux, notamment des eaux marines, prend de plus en plus d'importance et devient progressivement une solution prometteuse pour l'avenir, notamment avec le développement impressionnant des techniques et des technologies de dessalement.

Les projets de dessalement, malgré les développements enregistrés, restent relativement coûteux nécessitant des investissements élevés et des charges d'exploitation et de gestion importantes (énergie, produits, équipements et autres), ce sont aussi des projets qui exigent un haut niveau de technicité et de gestion. C'est pourquoi, leur réalisation et leur mise en œuvre nécessitent un choix judicieux du cadre institutionnel et financier pour garantir leur réussite et surtout leur durabilité.

Si les montages institutionnels et financiers sont multiples et peuvent être classés en trois grandes catégories : montage public, montage privé et montage de type partenariat public-privé (PPP), ce dernier reste le plus adéquat pour la réalisation des projets de dessalement puisqu'ils permettent d'améliorer les conditions d'investissement, d'exploitation et de maintenance des équipements, ainsi que la compétitivité et la qualité du service rendu aux usagers.

Le PPP lui-même comprend plusieurs types, notamment les concessions, la gestion déléguée de service urbain, les contrats de service et de gérance, l'affermage et les BOT. Le choix du type approprié du PPP dépend du contexte politique, économique, social et culturel de chaque pays, région et zone du projet.

La réussite de PPP dépend de plusieurs conditions dont notamment l'établissement d'un contrat définissant le cadre d'accueil et les obligations des parties, un partage équitable des risques, un encadrement juridique stable et cohérent et une structure adéquate de financement.

INTRODUCTION

Face à la raréfaction des ressources en eau et à la croissance démographique que connaît le monde, la seule ressource encore disponible et en quantités inépuisables, est constituée par les eaux de mer. L'exploitation de cette ressource n'est possible que par l'utilisation des techniques de dessalement.

Les pays d'Afrique du Nord et du Moyen Orient, dont les ressources en eau disponibles ne couvrent que très partiellement les besoins réels des populations, sont actuellement les plus concernés, et le seront de plus en plus si on croit les prévisions des changements climatiques, par la nécessité de recourir aux ressources non conventionnelles, notamment le dessalement.

Les pays du Moyen Orient étaient les premiers à avoir fait recours au dessalement des eaux pour satisfaire la demande grandissante en eau potable et industrielle. Ces pays possèdent actuellement à eux seuls près de la moitié de l'ensemble de stations de dessalement à travers le monde.

Aujourd'hui, il existe dans le monde près de 12.500

unités de dessalement dans 120 pays qui produisent près de 30 millions de m³ par jours, dont 54 % issus de l'eau de mer et 46 % issues des eaux saumâtres. Sur ces 30 millions, 75% sont destinés à l'approvisionnement en eau potable de près de 155 millions d'habitants et 25% à l'usage agricole.

Le coût de l'énergie était toujours la contrainte principale au dessalement des eaux, les scientifiques se sont forcés de développer de nouvelles techniques autres que celles utilisées dans les premières stations de dessalement installées dans les pays du Golf principalement.

La technique la plus répandue actuellement se base sur le principe d'osmose inverse. Cette technique a rendu le dessalement faisable et beaucoup de pays ont investi dans ce domaine pour contrecarrer la raréfaction des ressources suite aux changements climatiques et répondre à la demande qui ne cesse d'accroître.

Si le développement des techniques et des technologies du dessalement des eaux permettent d'envisager cette solution avec un avenir prometteur, son financement nécessite d'importants investissements pour la réalisation des stations de dessalement et leur gestion.

1. Ingénieur Principal du Génie Rural, Chef du Service du Financement à l'Administration du Génie Rural. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime. Rabat, Maroc. E-mail : marehal@gmail.com

2. Ingénieur Principal du Génie Rural, Chef du Service du Suivi-Evaluation à l'Administration du Génie Rural. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime. Rabat, Maroc. E-mail : arrifi.mahdi@gmail.com

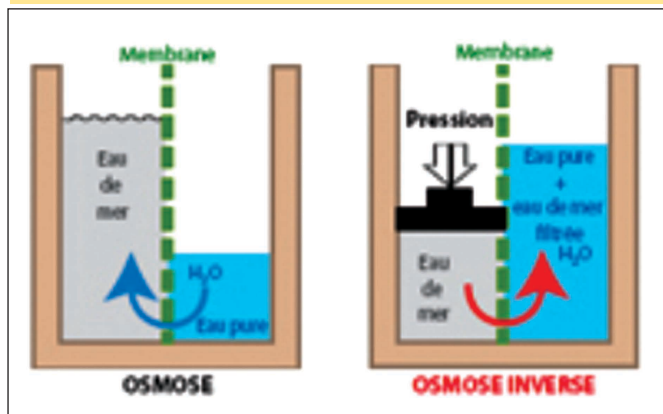
Cette communication se propose de présenter les différents montages institutionnels et financiers pour la réalisation de ce genre de projets. Les solutions les plus importantes concernent le partenariat entre les pouvoirs publics, les opérateurs privés et les usagers des eaux.

1. LE DESSALEMENT, C'EST QUOI ?

Le dessalement est défini comme un processus d'élimination du sel, en particulier l'élimination du chlorure de sodium (NaCl), pour la rendre douce utilisable soit pour l'alimentation des populations en eau potable ou en irrigation. Plusieurs techniques sont utilisées pour le dessalement des eaux saumâtres ou de mer. Dans la littérature on trouve les techniques suivantes :

Osmose inverse, dite aussi technique membranaire: cette technique se base sur un principe simple (voir figure 1). L'eau de mer est filtrée sous pression à travers une membrane, les sels et les micro-organismes sont retenus par cette dernière. Ce procédé nécessite toutefois un traitement de l'eau en amont. Actuellement cette technique est en plein essor et a montré, depuis plusieurs années, sa fiabilité. La consommation en énergie pour la production d'un m³ d'eau est de l'ordre de 4 à 5 kWh/m³.

Figure 1: Processus d'osmose et d'osmose inverse



(source : veoliaeau.com)

Distillation ou dessalement thermique : Cette technique nécessite beaucoup d'énergie. Elle permet de produire une eau très pure. En effet, l'eau de mer est chauffée jusqu'à évaporation. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels et les autres substances. La vapeur d'eau est condensée pour obtenir de l'eau douce. Le coût d'énergie pour produire 1 m³ d'eau pure est estimé à 15 kWh. En appliquant les prix d'énergie marocaine, le coût serait alors de 15 DH/m³ environ.

Flash multi-étages, ou système flash. Ce système est le plus répandu dans les pays du Moyen Orient. Le taux de

sel résiduel est non négligeable, le coût énergétique est important ($\approx 10 \text{ kWh/m}^3$).

Compression de vapeur : $\approx 5 \text{ kWh/m}^3$.

Distillation par dépression: la température d'évaporation dépend de la pression. C'est un système très économique avec une eau très pure ($\approx 2 \text{ à } 3 \text{ kWh/m}^3$). Ce Système est utilisé généralement pour de petites unités de production.

Électrolyse: le principe de ce système consiste en l'application d'un courant électrique qui fait migrer les ions vers les électrodes. Il est très rentable pour les faibles concentrations, l'énergie à mettre en jeu dépend de la concentration en sel.

Aujourd'hui les deux premières techniques se partagent le marché mondial. Entre 1990 et 2001, le procédé d'osmose inverse est passé de 40 à 53% de part de marché. Les recherches sont orientées vers l'osmose inverse dont les prévisions de part de marché sont de 70% (contre 20% pour le thermique et 10% pour les autres méthodes) d'ici l'horizon 2020.

Dans tous les cas définis ci-dessus, le dessalement produit une saumure caractérisée par un taux de salinité élevée dont il faut se débarrasser. En fait, pour produire un mètre cube d'eau dessalée par la technique d'osmose inverse, il est nécessaire de pomper 2 mètres cubes d'eau à injecter dans le système. L'eau refoulée contient un taux élevé de salinité. Les saumures produites sont rejetées dans la mer directement pour les stations de dessalement situées sur les côtes, cependant pour les stations situées à l'intérieur des terres, les saumures sont rejetées directement dans le milieu ambiant ce qui constitue un risque considérable pour l'environnement et pour la nappe phréatique. Dans les deux cas, ces saumures constituent un des principaux inconvénients du dessalement en plus des coûts d'investissement assez élevés.

2. LES MONTAGES INSTITUTIONNELS ET FINANCIERS

D'après les expériences existantes de par le monde, le montage institutionnel et financier pour la construction des infrastructures de dessalement des eaux, leur gestion et leur exploitation et maintenance peut être de trois grands types: public (100%), privé (100%) ou partenariat public-privé qui peut prendre plusieurs formes.

L'importance grandissante qu'a pris l'implication des opérateurs privés dans la construction et la gestion des infrastructures stratégiques et des services dans plusieurs pays, notamment ceux développés et certains en voie de développement, a permis un développement soutenu du partenariat public-privé qui est devenu une solution privilégiée et très convoitée grâce à ses nombreux avantages, notamment le soulagement des budgets publics, plus d'efficacité et de compétitivité, l'amélioration substantielle de la qualité des services

rendus aux usagers, et la promotion des investissements et de la croissance économique. Dans ce contexte, les projets de dessalement des eaux, de par leur importance pour les régions où les ressources en eau sont limitées et le degré élevé de technicité qu'ils exigent en termes de gestion et de maintenance, ainsi que les investissements importants qu'ils nécessitent, affichent une tendance de plus en plus accélérée vers des montages institutionnels et financiers public-privé pour leur réalisation et leur gestion.

2.1. Le financement et la gestion publics

C'est pratiquement l'unique mode de financement utilisé dans le passé, les pouvoirs publics assurent le financement, la construction et la gestion des infrastructures publiques. Tous les risques financiers et techniques sont supportés par les pouvoirs publics et par conséquent par les collectivités à travers le paiement des impôts soit directement ou indirectement.

Pour les projets de dessalement, ce mode de financement était pratiqué du temps des premiers projets, notamment dans les pays du Golf et autres pays. Actuellement, ce mode exclusif devient de plus en plus abandonné au profit du partenariat public-privé. En Espagne par exemple, seulement 16% des projets de dessalement existants ont été réalisés et sont gérés par les Services publics.

2.2. Le financement et la gestion privés

Dans ce genre de montage, le secteur privé apporte les fonds nécessaires pour réaliser le projet, il se charge ensuite de la gestion et l'exploitation et la maintenance des équipements. Ce type de montage dans les projets de dessalement est très peu rencontré, il est pratiqué dans certains cas précis comme la production de l'eau dessalée pour usage industriel notamment.

En Espagne par exemple, seule une usine de dessalement sur 57 a été construite et gérée exclusivement par un opérateur privé.

2.3. Le partenariat public-privé (PPP)

a) Pourquoi un partenariat public-privé ?

Le constat de l'impuissance de l'Etat à assumer seul le coût d'infrastructures lourdes est aujourd'hui universel. Les contraintes budgétaires et techniques imposent la recherche de financements ailleurs que dans les caisses de l'Etat et le recours à des spécialistes de plus en plus pointus hors de l'Administration.

Mais parallèlement, il paraît non raisonnable de remettre entièrement la tâche de construire et de gérer des infrastructures et des services publics au seul secteur privé. La gestion des services publics doit continuer à relever, ne serait-ce qu'en partie, de l'autorité publique qui est le seul garant de l'intérêt public et de la stabilité sociale et économique du pays.

Le partenariat public-privé apparaît donc comme la voie médiane entre une gestion d'Etat, difficile et dépassée,

et une privatisation pure et simple, risquée et porteuse d'émission des responsabilités.

b) Types de partenariat public-privé

Le partenariat public-privé englobe différentes modalités d'association entre l'autorité publique et les entreprises privées, notamment les concessions, la gestion déléguée de services, les contrats de service et de gérance, l'affermage et les BOT.

Le partenariat public-privé fonctionne sur des principes simples: deux partenaires, des règles préétablies, un rythme d'avancement, un contrat à respecter, un équilibre mutuel et en conclusion, la satisfaction des deux parties.

Les projets de dessalement des eaux, vue leur importance sur les plans technologique, technique, d'investissement et de gestion, comptent parmi les projets qui s'adaptent le mieux au partenariat public-privé. Les formes de PPP adoptées dans ce cadre diffèrent d'un pays à l'autre. En Espagne, l'affermage est le montage qui a été adopté pour 28 projets (près de 50% des projets de dessalement). Pour l'Algérie, Israël et l'Australie par exemples, ce sont plutôt des options de BOT qui ont été retenues. Dans les pays de Golf, ce type de PPP prend aussi de l'importance.

La tendance actuelle tend fortement vers des formes de PPP de type BOT pour les projets de dessalement pratiquement partout dans le monde. C'est la voie la plus efficace en termes d'investissement, d'efficacité de gestion, de qualité de service et de partage des risques.

c) Les avantages du recours au partenariat public-privé

Le partenariat public-privé permet d'assurer des services publics de qualité à un moindre coût pour la société et répondre, ainsi, à la demande de la population d'un maillage étroit du territoire en services modernes et adaptés. L'autorité publique peut ainsi favoriser la création et la modernisation d'infrastructures et de services publics sans augmenter la fiscalité ou la dette publique.

Mais le partenariat public-privé n'est pas une simple question de financement. Il est aussi un moyen d'utilisation optimale des compétences propres aux entreprises privées et englobe la notion de prestation de service. L'appel à des sociétés privées permet de bénéficier de technologies modernes respectueuses de l'environnement.

Le partenariat public-privé permet aussi un partage optimal des risques entre l'autorité publique et les prestataires privés. Il favorise une évaluation réaliste des coûts et le respect des délais agréés par les partenaires en début de contrat.

Enfin, il préserve le rôle de décideur, de force d'impulsion et de contrôle de l'autorité publique, qui ne perd pas l'ensemble de ses prérogatives. A l'inverse, le partenariat protège les opérations de construction et d'aménagement des aléas politiques liés aux

changements de majorité ou aux effets d'annonce électoraux.

d) Conditions de réussite du partenariat public-privé

- Un contrat définissant le cadre d'accueil et les obligations des parties : Le partenariat public-privé doit reposer sur des montages appropriés à chaque projet, et non sur des modèles rigides et préétablis. Le contexte juridique et institutionnel doit être pris en compte dans la définition des rôles de chacun des partenaires. Ceux-ci doivent s'assurer préalablement de l'acceptation politique et sociale du projet.

Le contrat doit permettre d'intégrer les événements imprévus survenant en cours de réalisation. La régulation peut reposer sur un organisme tiers indépendant.

- Un partage équitable des risques : La concession et en général toutes les activités économiques et financières comprennent une prise de risque. Les projets font toujours intervenir plusieurs acteurs et des risques de différentes origines. Le principe est de ne pas faire reposer tous les risques sur le même acteur, mais au contraire de les répartir en fonction des compétences de chacun d'eux.

Les risques sont de plusieurs natures en fonction de leur origine :

- le risque politique, lié à l'attitude du gouvernement à l'égard du secteur privé notamment dans le contrôle de la tarification, problème particulièrement aigu dans le cas des services publics donnant lieu à la facturation aux usagers-électeurs ;
- le risque monétaire, car les recettes sont parfois perçues en monnaie locale, d'où une sensibilité importante surtout sur la durée de vie d'une concession ;
- le risque économique et commercial, lié à la croissance économique et au développement urbain, dont les variations par rapport aux prévisions engendrent des incertitudes sur l'utilisation du service et les revenus du concessionnaire ;
- le risque financier, lié à l'incertitude sur les taux d'intérêt qui évoluent entre le premier financement et les phases de refinancement qui interviennent ultérieurement ;
- les risques techniques, quand des surcoûts de construction ou d'exploitation apparaissent, soit à cause d'ouvrages mal adaptés, soit à cause de mauvaises estimations économiques.

Chaque intervenant doit donc mesurer les paramètres techniques ou socio-économiques qui décrivent les risques qu'il prend pour fournir une réponse adaptée et s'engager en toute connaissance de cause. Ensuite,

débuté une phase de négociation juridico-financière sur les termes et clauses du contrat qui, " sur la base d'une étude reconnue par le concédant et le concessionnaire pressenti ", détermine notamment la fréquentation par les usagers, les modalités de financement, les éventuels problèmes juridiques ou fiscaux, la sensibilité de la rentabilité financière aux aléas (surcoûts, fréquentation réelle, taux d'intérêt réels). C'est dans la détermination de ces clauses qu'apparaissent les différences de financement entre les projets. Elle requiert le soin le plus important.

Un partenariat public-privé réussi repose sur la confiance réciproque des partenaires, ainsi que sur le respect du contrat dans la durée, tant sur les dépenses initialement prévues que sur les obligations incombant à chacun des acteurs.

La rémunération du concessionnaire doit prendre en compte les risques qu'il assume, tant dans les phases de conception que de réalisation et d'exploitation du projet. La puissance publique doit alors veiller lors de la rédaction des clauses du contrat à identifier ces risques, évaluer leur impact, et pallier les effets négatifs en intégrant leur possible survenue. Le contrat doit être un outil évolutif pour répondre à des circonstances nouvelles prévisibles.

- Un encadrement juridique stable et cohérent : L'autorité publique doit préparer le cadre institutionnel et légal nécessaire au développement d'un partenariat public-privé. Ce cadre ne peut répondre à des modèles préétablis. Il doit correspondre au contexte politique et social du pays. Une loi ad-hoc peut cependant être utile pour fixer les grands principes juridiques nécessaires à la présence de partenaires privés. Cette loi doit notamment favoriser l'investissement par des règles claires et transparentes, associées à un contrôle juridictionnel indépendant et des garanties de non-spoliation.
- Une structure adéquate de financement : Les financements classiques d'opérations d'investissements paraissent souvent inadaptés aux niveaux des risques, des montants à investir et de la durée de rentabilisation espérée pour la création de nouvelles infrastructures lourdes ou nombreuses à l'échelle d'un territoire. L'intervention de l'autorité publique est toutefois indispensable, justifiée à la fois par l'intérêt socio-économique des projets et par la nécessaire impulsion à donner aux partenaires privés.

Une structuration ad-hoc peut utilement rassembler les apporteurs de fonds. Les outils financiers s'avérant de plus en plus complexes, une typologie devait être dressée de façon assez large pour couvrir les caractéristiques propres aux différentes méthodes de financements de projets.

4. LE PPP AU MAROC

Le PPP au Maroc a connu un essor très important depuis la dernière décennie, notamment dans les domaines de concession des services publics d'eau potable, d'assainissement liquide et d'électricité, de gestion des déchets solides et de la propreté, des transports urbains, etc..

Hormis ces services publics, même le domaine de l'irrigation a fait l'objet d'une expérience récente de gestion déléguée avec la mise en œuvre d'un projet PPP type BOT pour la sauvegarde de la zone agrumicole d'El Guerdane sur 10.000 ha dans la région de Souss-Massa, qui souffre d'une pénurie d'eau alarmante. Cette zone qui connaît une surexploitation de la nappe phréatique bénéficie grâce à ce projet d'un complément d'irrigation à partir des eaux superficielles régularisées par les barrages Aoulouz-Mokhtar Soussi. En fait, ce projet est une première mondiale dans le domaine de gestion déléguée du service de l'eau d'irrigation d'un périmètre où les réseaux d'adduction et de distribution de l'eau sont collectifs.

Dans le même sens, plusieurs études de structuration de projets PPP ont été lancées pour concéder la gestion du service de l'eau d'irrigation dans les grands périmètres irrigués. Les études relatives aux périmètres du Loukkos, du Tadla, des Doukkala et du Gharb sont lancées.

L'expérience du projet d'El Guerdane a montré que la réussite de la gestion déléguée du service de l'eau d'irrigation reste subordonnée à une contribution publique consistante à l'investissement initial, qui peut atteindre jusqu'à 50% de l'investissement, condition sine qua none pour assurer un tarif d'eau d'irrigation viable pour les agriculteurs et économiquement compétitif.

Plus encore, l'Etat compte lancer un projet d'irrigation à partir de dessalement des eaux de l'océan atlantique pour l'irrigation de la zone de production des primeurs sur 10.000 ha dans la plaine des Chtouka dans la région de Souss-Massa, dont l'aquifère qui servait à l'irrigation connaît un rabattement sans précédent de son niveau piézométrique et même une intrusion inquiétante des eaux marines, et où les eaux de surface sont rares.

Ce projet, dont le volume à dessaler se situerait entre 55 et 80 millions de m³/an, sera réalisé par le biais d'un partenariat public-privé BOT, bien évidemment avec une contribution financière importante de l'Etat à la construction des infrastructures de dessalement et de distribution de l'eau d'irrigation en vue de garantir un prix de l'eau valorisable par la production agricole dont une grande partie est destinée à l'export.

CONCLUSION

Aujourd'hui, les avantages du dessalement de l'eau de mer pour la production d'eau douce pour les différents usages ne sont plus à démontrer. Cette technique constitue l'unique solution pour beaucoup de pays et de régions qui souffrent de manque d'eau, et pourra même s'ériger dans l'avenir, avec la tendance inquiétante des changements climatiques, en solution salubre dans plusieurs endroits du monde.

Certes, à l'image des autres types des grands projets d'infrastructures, les projets de dessalement peuvent être réalisés moyennant divers montages institutionnels et financiers, mais tenant compte de l'importance des investissements qu'ils nécessitent, du haut niveau de technicité auquel font appel et de l'importance des charges d'exploitation et de maintenance qu'ils exigent, ces projets ont beaucoup plus de chance de réussite lorsqu'ils sont réalisés et gérés dans le cadre de partenariat public-privé. En effet, l'implication du secteur privé permet une amélioration de l'efficacité opérationnelle par la maîtrise des coûts d'exploitation et de la productivité, l'amélioration de la qualité du service et l'amélioration de la planification et l'efficacité des investissements.

Malgré l'importance de la forme BOT, le choix du type de partenariat public-privé pour la réalisation des projets de dessalement reste tributaire des conditions spécifiques à chaque pays, chaque région et chaque localité en termes de contraintes politiques, sociales, économiques et même culturelles. C'est cela d'ailleurs qui explique la multitude impressionnante des formes de PPP qu'on peut trouver à travers le monde.

Références Bibliographiques

- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime. Etude de préféabilité d'un projet d'irrigation de la plaine des Chtouka à partir du dessalement des eaux de mer, Administration du Génie Rural, 2009.
- Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes. Rapport des options stratégiques du projet El Guerdane, Administration du Génie Rural, 2002.
- Mohamed OUHSSAIN. Projet El Guerdane : quel type de partenariat pour l'aménagement et la gestion des infrastructures d'irrigation?, 2001.
- Site Web de la Société Financière Internationale : <http://www.ifc.org>
- Site Web de Véolia Eau : <http://www.veoliaeau.com>
- Site Web de Wikipedia: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Dessalement>
- Site Web de la Banque Mondiale: <http://www.worldbank.org>

ASPECTS JURIDIQUES ET INSTITUTIONNELS DE L'EAU DESSALÉE

M. Bahnini¹

INTRODUCTION

Le dessalement d'eau de mer est un enjeu stratégique pour un grand nombre de pays en état de stress hydrique chronique. Il représente une ressource alternative qui apporte des réponses aux besoins en eau à court et à long terme.

Les techniques de dessalement d'eau de mer connaissent depuis le début des années 2000 un regain d'intérêt et des applications multiples à l'échelle de la planète. En 1962 la production totale d'eau douce provenant d'installations de dessalement était de 75.000 m³/jour. Il y a aujourd'hui dans le monde plus de 7.500 unités de production d'eau potable et d'irrigation à partir de l'eau de mer. Les capacités moyennes d'unités modernes sont de 200.000 à 300.000 m³/jour. Cette exploitation exponentielle de l'eau de mer a des implications juridiques, environnementales, sociales et stratégiques qui ne sont pas abordées par les réglementations nationales

Plus la population augmente et plus les besoins en produits agricoles s'accroissent. L'agriculture représente aujourd'hui 70% de la consommation d'eau dans le monde, devant l'industrie (20%) et les besoins domestiques (10%).

Si le dessalement de l'eau de mer permet à certains pays de faire face aux besoins en eau potable de leur population, en revanche, le dessalement de l'eau pour l'agriculture n'est pas encore rentable, et de loin : le prix de l'eau utilisée excède de beaucoup la valeur des productions agricoles qu'elle rendrait possible. Par exemple la production d'une tonne de blé, valant environ 100 €, nécessite environ 1 000 m² de terrain arrosés par environ 500 mm de pluie, soit 500 m³ d'eau, dont le coût n'est pas moins de 250 \$ dans le meilleur des cas.

Au Maroc, le dessalement de l'eau de mer en est encore à des balbutiements et il n'existe aucune réglementation spécifique à ce secteur.

1. REGIME JURIDIQUE DE L'EAU DESSALÉE

1.1. Le Domaine public hydraulique

La loi n° 10-95 du 20 septembre 1995 pose en principe dans son article 1 : « L'eau est un bien public et ne peut faire l'objet d'appropriation privée sous réserve des dispositions du chapitre II ci-après »

Historiquement au Maroc, les Dahirs du 1er juillet 1914

sur le domaine public complété par ceux de 1919 et 1925 intègre toutes les eaux quelle que soit leur forme au domaine public hydraulique.

La loi nouvelle vient refondre l'ensemble de ces textes épars et les compléter.

La définition législative actuelle limite cette définition puisqu'elle l'a restreint à :

- toutes les nappes d'eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines ; les cours d'eau de toutes sortes et les sources de toutes natures ;
- lacs, étangs et sebkhas ainsi que les lagunes, marais salants et marais de toute espèce ne communiquant pas directement avec la mer.
- puits artésiens, les puits et abreuvoirs à usage public réalisés par l'État ou pour son compte ainsi que leurs zones de protection délimitées par voie réglementaire.
- canaux de navigation, d'irrigation ou d'assainissement affectés à un usage public ainsi que les terrains qui sont compris dans leurs francs-bords et dont la largeur ne doit pas excéder 25 mètres pour chaque franc-bord ;
- digues, barrages, aqueducs, canalisations, conduites d'eau et séguis affectés à un usage public en vue de la défense des terres contre les eaux, de l'irrigation, de l'alimentation en eau des centres urbains et agglomérations rurales ou de l'utilisation des forces hydrauliques ;
- lit des cours d'eau permanents et non permanents ainsi que leurs sources, celui des torrents dans lesquels l'écoulement des eaux laisse des traces apparentes ;
- berges jusqu'au niveau atteint par les eaux de crues dont la fréquence est fixée par voie réglementaire pour chaque cours d'eau ou section de cours d'eau
- francs-bords à partir des limites des berges.

L'eau de mer n'appartient naturellement pas au domaine public hydraulique.

1.2. Le domaine public maritime

L'eau de mer n'appartient pas plus au domaine public maritime.

Celui-ci est défini par la loi du 1er juillet 1914 article 1 comme étant :

- Le rivage de la mer jusqu'à la limite des plus hautes marées ainsi qu'une zone de 6 m mesurée à partir de cette limite.

1. Docteur en droit. Conseiller juridique. E-mail : maria.bahnini@mtds.com

- Les rades ports havres et leurs dépendances
- Les phares, fanaux, balises et plus généralement tous les ouvrages destinés à l'éclairage et au balisage des côtes

Il n'existe donc pas de régime juridique spécifique pour l'eau de mer.

2. REGIME JURIDIQUE DE LA PRODUCTION DE L'EAU DESSALEE

La matière première nécessaire à la production d'eau dessalée est l'eau de mer.

2.1. La prise d'eau sur la mer

Elle n'est réglementée par aucun texte. En conséquence, peuvent effectuer des prises sur l'eau de mer :

- Toutes les personnes physiques ou morales de droit privé (sociétés, associations d'usagers, d'agriculteurs)
- Toutes les personnes publiques qui en ont la compétence juridique.

Il existe au Maroc plusieurs personnes morales de droit public impliquées dans la gestion de l'eau. Mais seules deux d'entre elles ont compétences pour la production de l'eau dessalée.

2.2. Les personnes publiques compétentes pour produire de l'eau dessalée

2.2.1. Les établissements publics chargés de la gestion de l'eau sans compétence pour la produire

Les établissements publics sont soumis au principe de spécialité et ne peuvent donc pas opérer de missions dont ils n'ont pas été spécifiquement chargés.

a) Les agences de bassin

Pour renforcer le cadre institutionnel existant en matière de gestion de l'eau, la loi du 16 août 1995 sur l'eau a créé les agences de bassin, espaces géographiques adaptés, qui ont pour mission, dans leur secteur territorial, d'élaborer le plan directeur d'aménagement intégré de ressources en eau relevant de leur zone d'action, de veiller à son application, de planifier et de gérer les ressources en eau de façon décentralisée.

Leur compétence est confrontée à une double limite : la territorialité d'une part et par leur objet d'autre part qui est de notamment:

- délivrer les autorisations et concessions d'utilisation du domaine public hydraulique prévu dans le plan directeur d'aménagement intégré de ressources en eau relevant de sa zone d'action,
- fournir toute aide financière et toute prestation de service, notamment d'assistance technique aux personnes publiques et privées qui en font la demande, soit pour prévenir la pollution des ressources en eau, soit en vue d'un aménagement ou d'une utilisation du domaine public hydraulique,
- réaliser toutes les mesures piezométriques et de

jaugeage, hydrologiques, hydrogéologiques de planification et de gestion de l'eau au plan qualitatif et quantitatif,

- réaliser toutes les mesures de qualité et d'appliquer les dispositions de la présente loi et des autres lois relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité, en collaboration avec l'autorité gouvernementale chargée de l'environnement,
- proposer et de prendre les mesures adéquates, d'ordre réglementaire notamment, pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie ou pour prévenir les risques d'inondation,
- gérer et contrôler les ressources en eau mobilisées,
- réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations,
- tenir un registre des droits d'eau reconnus, des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.
- gérer la pénurie d'eau lorsque celle-ci est déclarée.

Leur loi de création n'en fait pas des producteurs potentiels d'eau dessalée. (art 20 de la loi du 16 août 1996)

b) Les offices régionaux de mise en valeur agricole (ORMVA)

Dans sa zone d'action et dans le cadre de sa mission générale de mise en valeur agricole l'Office est essentiellement chargé de :

- exploiter les ressources en eau à usage agricole qui lui sont attribuées. Les articles 4 des décrets royaux portant création des différents offices régionaux de mise en valeur agricole précisent que " Les ressources en eau destinées à usage agricole dans les limites de sa zone d'action sont affectées globalement à l'office régional par décret pris sur proposition conjointe des ministres de l'agriculture et des travaux publics.
- exécuter les infrastructures d'irrigation
- exploiter les ouvrages publics d'irrigation situés dans sa zone d'action.
- gérer le domaine public hydraulique qui lui est affecté sur délégation de pouvoir du ministre de l'Équipement. " L'office régional peut disposer par délégation du ministre des travaux publics des pouvoirs reconnus à ce dernier par le dahir du 11 moharrem 1934 (1 août 1925) sur le régime des eaux. (Art 4 précité). Là aussi, les ORMVA

Là aussi, force est de constater que les ORMVA n'ont pas compétence pour produire de l'eau dessalée.

2.1.2. Les personnes morales de droit public ayant compétence pour produire de l'eau dessalée

Parmi les personnes publiques qui peuvent procéder au dessalement de l'eau de mer, il y a le Secrétariat d'État chargé de l'eau et bien entendu l'office national de l'eau potable (ONEP).

a) Le Secrétariat d'État chargé de l'eau

Le Secrétariat d'Etat chargé de l'eau a des compétences très larges. Toutefois, ses missions principales sont :

- la recherche et l'évaluation des ressources en eau ;
- la veille météorologique et l'information sur l'évolution du climat ;
- la planification du développement des ressources en eau ;
- la mobilisation et le transfert d'eau
- la gestion des ressources en eau ;
- la sauvegarde du patrimoine hydraulique (ressources en eau et infrastructure) ;
- la recherche-développement dans les domaines du climat et de l'eau;

Le Secrétariat d'État chargé de l'eau a donc pour mission de satisfaire les besoins en eau de plus en plus croissants des secteurs usagers à travers la mobilisation des eaux de surface, la recherche d'eau souterraine et l'exploitation des ressources en eau non conventionnelles. A ce titre, il peut donc effectuer des opérations de dessalement d'eau de mer.

Il doit également assurer l'accès équilibré au service de l'eau au profit de l'ensemble des régions du pays notamment à travers la réalisation d'importants ouvrages de transfert d'eau.

b) L'ONEP

L'office national de l'eau potable doit assurer :

- La planification de l'approvisionnement en eau potable (AEP) à l'échelle nationale
- La production de l'eau potable
- La distribution de l'eau potable pour le compte des collectivités locales ,
- Le contrôle de la qualité des eaux.

À ce titre, il peut effectivement produire de l'eau dessalée pour l'alimentation en eau potable des populations rurales et urbaines.

L'ONEP a d'ailleurs déjà lancé un appel d'offres pour la réalisation d'une étude de faisabilité du dessalement d'eau de mer pour le renforcement de l'alimentation en eau potable des villes de Tiznit et Sidi Ifni et des centres et douars avoisinants.

2.3. Les conditions de production de l'eau dessalée

2.3.1. Le respect de la législation relative à l'occupation du domaine public

Si la prise d'eau sur la mer n'est pas réglementée, en revanche, l'occupation du domaine public maritime pour l'installation des unités de productions de l'eau dessalée, est elle réglementée par le dahir du 30 novembre 1918 relatif aux occupations temporaires du domaine public. Elle nécessite, quel se soit le producteur:

- Une autorisation d'occupation du domaine public à demander auprès du ministère de l'équipement
- Le paiement d'une redevance annuelle à l'Etat

- Le contrôle et la surveillance de l'occupation.

Tous les producteurs d'eau dessalée doivent donc demander une autorisation qui peut être accordée pour une durée limitée et qui fixe la nature, les dimensions et les dispositions des ouvrages à établir et les conditions à observer dans leur fonctionnement et leur exploitation. L'autorisation fixe également les délais dans lesquels les ouvrages devront être entrepris et achevés. L'occupant ne pouvant les modifier sans autorisation préalable de l'Administration.

Par ailleurs, l'Administration a un droit permanent de surveillance et de contrôle sur la parcelle occupée.

3.3.2. Le respect de la législation relative à la protection de l'environnement

L'eau très salée rejetée en mer lors du processus de dessalement de l'eau de mer menace les écosystèmes marins.

La production d'eau dessalée entraîne également un rejet des saumures concentrées (et chaudes dans le cas de la distillation) en mer ou injectées dans le sol, nécessite l'emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes et laisse des traces de métaux lourds échappés des installations. Cette activité n'est donc pas sans conséquence sur l'environnement et implique, avant tout commencement d'exécution une étude d'impact environnemental et , dans le cadre de la loi n° 11-03 du 9 juin 2003 relative à la protection et la mise en valeur de l'environnement, l'obligation de gérer les résidus (concentrat) pour améliorer le bilan environnemental.

a) La loi n° 12-03 du 12 mai 2003 relative aux études d'impact environnemental.

Aux termes de cette loi, tous projets d'activités, de travaux, d'aménagement et d'ouvrages, entrepris par toutes personne physique ou morale, privée ou publique, qui en raison de leur nature, de leur dimension et de leur lieu d'implantation dans des zones sensibles ou protégées, doivent faire l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement. L'étude d'impact a pour objet d'évaluer de manière préalable les répercussions éventuelles et les effets directs et indirects du projet sur l'environnement, la faune, la flore, le sol le milieu naturel et les équilibres biologiques.

Sans que l'activité de dessalement d'eau de mer ne soit expressément mentionnée dans la liste des activités soumises à étude d'impact environnemental par la loi précitée, il n'en demeure pas moins que, l'eau très salée rejetée en mer lors du processus de dessalement de l'eau de mer menace les écosystèmes marins et justifie l'obligation d'une étude d'impact environnemental qui définit les mesures prises pour supprimer, réduire ou compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement.

Chaque projet donne lieu à une enquête publique et l'autorisation de tout projet soumis à étude d'impact environnemental est soumise à une décision d'acceptabilité environnementale délivrée par le comité national ou les comités régionaux d'études d'impact sur l'environnement. L'administration prend toutes les

dispositions pour que les informations et les conclusions relatives à l'étude d'impact sur l'environnement soient accessibles au public pendant toute la durée de l'enquête publique à l'exception de celles jugées confidentielles. En cas d'infraction aux dispositions de la loi les sanctions peuvent aller jusqu'à l'arrêt des travaux, la destruction des constructions et des installations, et l'interdiction des activités contraires à la loi.

b) *La loi 11-03 du 9 juin 2003 relative à la protection et la mise en valeur de l'environnement*

Le dessalement de l'eau de mer, par les rejets lors du processus de production d'eau douce menace, nous l'avons vu les écosystèmes marins. Le dessalement est donc polluant.

La loi a pour objectif de protéger l'environnement contre toutes formes de pollution et de dégradation quelle qu'en soit l'origine et de mettre en place un régime spécifique de responsabilité garantissant la réparation des dommages et l'indemnisation des victimes.

Cette loi définit la pollution marine comme étant notamment: « tout déversement ou toute introduction en mer, directement ou indirectement d'un produit susceptible d'endommager les êtres vivants et les végétaux marins... »

Elle interdit tout rejet liquide ou gazeux d'origine quelconque dans le milieu naturel, susceptible de nuire à la santé de l'homme ou à la qualité de l'environnement en général et qui dépasse les normes et standards en vigueur.

La loi prévoit que les conditions d'exploitation, de mise en valeur et de développement des ressources du littoral dont fait partie le dessalement de l'eau de mer seront fixées par voie réglementaire. Elles ne le sont toujours pas.

La loi impose à tout auteur d'une infraction, ayant eu pour conséquence une dégradation de l'environnement, de remettre en l'état l'environnement lorsque cette remise en l'état est possible, le tout sans préjudice de l'application des sanctions pénales prévues par la législation en matière de réparation civile.

L'administration fixe dans chaque cas les objectifs de remise en l'état de l'environnement à atteindre et les dates d'exécution des opérations de mise en valeur de l'environnement. A l'issue des travaux, elle procède à un examen des lieux et prend une décision donnant quitus lorsque les travaux accomplis sont conformes à ses prescriptions.

En revanche, aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau issue de ces traitements n'existe.

Tous ces textes restent des textes généraux applicables à toute forme de pollution. Ils ne sont pas particulièrement ajustés à la pollution entraînée par le dessalement de l'eau de mer.

3. LA GESTION DE L'EAU DESSALEE

La production pour compte propre implique la gestion pour compte propre. Toute personne physique ou morale privée

qui procède au dessalement de l'eau de mer pour son compte propre, eau industrielle ou eau agricole, gère cette eau comme elle l'entend. Elle peut l'utiliser pour ses besoins propres comme elle peut en céder tout ou partie. Aucune législation et aucune réglementation autres que celles mentionnées ci-dessus ne leur est applicable.

Le cas est jusqu'à aujourd'hui un cas d'école.

Lorsque l'eau dessalée doit alimenter les populations citadines ou rurales, sa gestion et le contrôle de sa qualité relève exclusivement de l'ONEP quel qu'en soit le producteur.

La gestion et la distribution des eaux dessalées d'irrigation relève en principe de la compétence des ORMVA ou des concessionnaires ou délégataires de gestion auxquels ils auraient confié la gestion des eaux d'irrigation. L'eau dessalée doit être mise à la disposition de l'ORMVA qui se charge de la distribution auprès des agriculteurs.

CONCLUSION

En conclusion, il n'existe dans le corpus législatif et réglementaire marocain aucun texte spécifique à la production ou à l'utilisation de l'eau dessalée. Les textes applicables à la production ou à la gestion de l'eau dessalée sont les textes généraux relatifs à l'occupation du domaine public, à la protection de l'environnement et aux textes de création des personnes publiques impliquées, à un titre quelconque, dans la gestion de l'eau.

Il est donc nécessaire de mettre en place une réglementation spécifique portant notamment sur :

- L'étude de la légitimité des projets eu égard en terme de besoin d'eau douce et des usages qui en seraient faits Ces usages devront être compatibles avec les critères du développement durable urbain, périurbain et agricole ainsi qu'avec les objectifs nationaux d'économie et de répartition équitable des ressources aquatiques.
- Les implantations d'entreprises exerçant des activités de dessalement d'eau de mer
- L'étude d'impact des prises d'eau de mer sur l'environnement marin en particulier sur les œufs, larves, alevins, et tous les organismes planctoniques constituant la base des chaînes alimentaires marines.
- La gestion des déchets liquides et solides induits par les usines de dessalement et les sources d'énergie et les procédés techniques qu'elles utilisent.

Les modalités de surveillance et de protection vis-à-vis des pollutions involontaires ou volontaires de la ressource en eau exploitée par l'usine de dessalement.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU DESALEMENT: CONTRAINTES ET AVANCEES

E. Fievez¹, V. Bonnelye²

Résumé

Le développement durable est à la confluence de trois préoccupations, dites "les trois piliers du développement durable".

Le Développement Durable répond à de multiples enjeux, enjeux globaux définis par les accords de Kyoto, déclinés dans le sixième programme européen et dans la réglementation,... et plus localement région par région, bassin versant par bassin versant. La complexité réside en l'intégration de tous ces enjeux. C'est ainsi que d'ici 2020, l'Europe s'est engagée à suivre la règle de 3 x 20 :

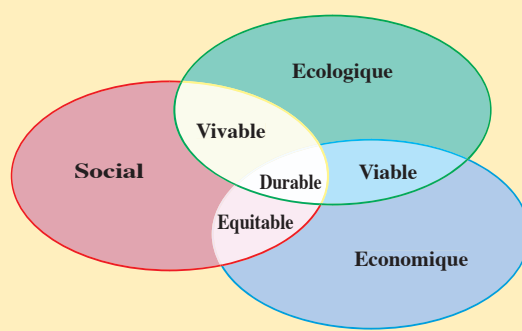
- 20% de réduction de l'émission de gaz à effet de serre,
- 20% d'augmentation de l'efficacité énergétique,
- 20% d'utilisation d'énergie renouvelable.

SUEZ Environnement s'est pour sa part engagé sur 4 axes [1] :

- protéger les ressources et favoriser l'économie circulaire,
- innover pour répondre aux défis environnementaux,
- être acteur du développement durable,
- construire le développement avec l'ensemble des parties prenantes.

Dans ce contexte, le dessalement, utilisé comme "ressource alternative" d'eau douce doit être évalué objectivement en termes d'impacts environnementaux. Le présent article a pour but de faire un point sur les dernières avancées dans ce domaine : réduction de la consommation énergétique, utilisation d'énergie renouvelable, gestion des sous-produits, maîtrise des rejets dans le milieu naturel.

Figure 1: les trois piliers du développement durable



INTRODUCTION

Nous sommes aujourd'hui 6 milliards sur Terre et en 2050, c'est-à-dire demain, nous serons 9 milliards, concentrés à 70 % dans les villes. La pression sur les ressources planétaires en sera d'autant plus importante alors que nous observons déjà des signes de pénurie avec des tensions fortes sur les marchés des matières premières.

L'intense activité humaine de ces 100 dernières années s'est appuyée sur l'énergie fossile, entraînant un changement climatique qui menace directement notre mode de vie, certains écosystèmes et pire encore certaines populations. Cette même activité humaine menace gravement les sols qui sont frappés par l'érosion, la diminution de la teneur en matière organique ou encore la salinisation.

La double croissance économique et démographique de notre planète a pour conséquence une pression

importante sur l'ensemble des ressources naturelles. Jamais les tensions sur les matières premières n'ont été aussi fortes. La planète connaît également des situations localisées de stress hydrique : la demande en eau dépasse la quantité disponible localement, ou bien les pollutions rendent la ressource inutilisable. [1]

Dans ce contexte difficile, et afin de faire face à des situations locales d'urgence, la production d'eau potable à partir d'eau de mer présente une solution mise en œuvre depuis plus près de 40 ans. Utilisé hier pour répondre à des problématiques ponctuelles de zones pratiquement dépourvues de ressources d'eau douce (îles ou zones désertiques), le dessalement est aujourd'hui mis en œuvre pour l'alimentation de zones urbaines dans des régions dont les ressources naturelles s'épuisent car soumises à une pression humaine et/ou à un stress hydrique marqué (réduction des précipitations, augmentation de l'évaporation, impact négatif de l'activité humaine sur le cycle naturel de l'eau dans un bassin versant).

1. Expert technique Energie, Direction Technique Groupe, Degremont, France. E-mail : eric.fievez@degremont.com

2. Expert technique spécialisé dans le traitement d'eau potable, le dessalement et la réutilisation des eaux au sein de la Direction Technologie et Innovation de la Société Degremont, France. E-mail : veronique.bonnelye@degremont.com

Avec plus de 2.4 milliards de personnes vivant près d'une mer, le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une alternative, qui alimente déjà plus de 200 millions d'habitants. Plus de 1% de la production d'eau potable mondiale est produite par dessalement.

Fortement consommatrice d'énergie, générant des rejets liquides, du bruit ou des rejets chauds, le dessalement n'est pas neutre en termes d'impacts environnementaux. Les procédés se sont toutefois améliorés ces 20 dernières années pour limiter ces impacts et trouver des solutions durables.

1. DESSALEMENT ET ENERGIE

1.1. Les procédés de dessalement : origine de la consommation d'énergie

Des solutions de traitement d'eau saumâtre ou d'eau de mer sont de plus en plus souvent mises en œuvre pour faire face à la demande en eau croissante dans certaines parties du monde, régions soumises au stress hydrique et dont les ressources en eau sont limitées en qualité et/ou en quantité. Les procédés de dessalement évoluent, évolutions poussées par des contraintes de coûts et de disponibilité des ressources énergétiques. Leur développement s'est accompagné ces dernières années d'une évolution des procédés et des équipements afin de réduire de façon drastique la consommation électrique : évolution des performances des membranes d'osmose inverse, pompage et mise en œuvre de systèmes de récupération d'énergie.

Il existe principalement deux procédés de dessalement utilisés à l'échelle industrielle pour produire de l'eau douce à partir d'eau de mer : les procédés thermiques et les procédés membranaires.

Les procédés de distillation consomment une énergie importante (de 8 à 25 kWh/m³ équivalent électrique), qui se décompose en énergie thermique nécessaire à la distillation proprement dite, et en énergie électrique afin

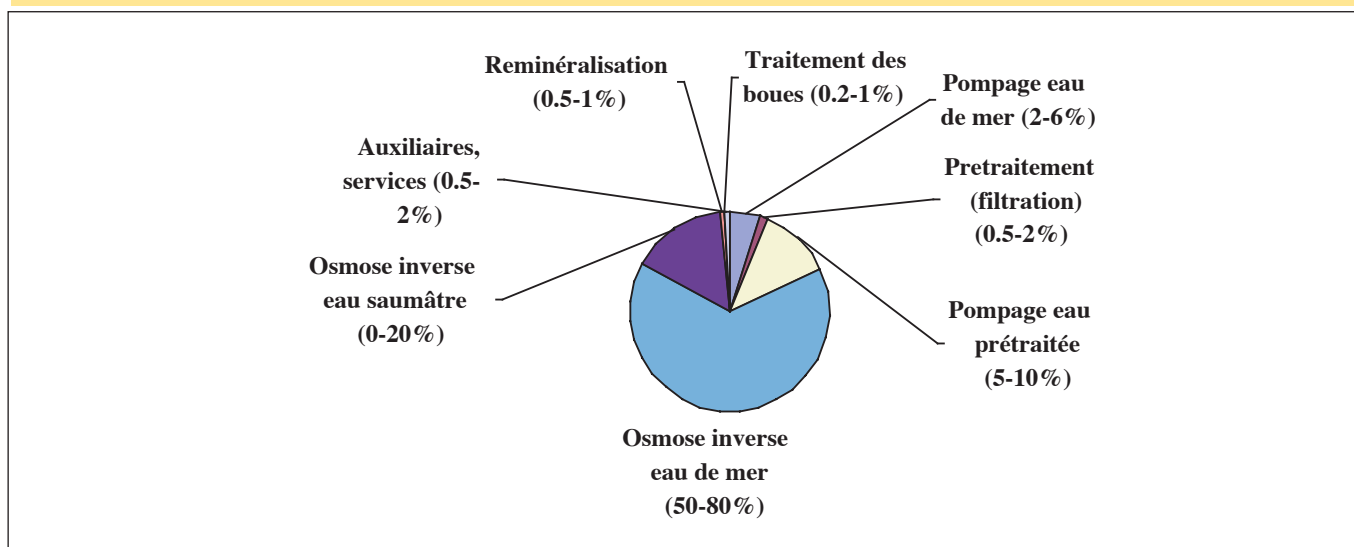
d'assurer la fonction de transport (pompage d'eau brute, de concentrat, d'eau de refroidissement, de distillat). Le développement de ces procédés était généralement rendu possible par leur couplage avec d'autres applications productrices de chaleur, tel que la production d'électricité à partir d'énergie fossile (gaz, pétrole). Ce couplage nécessite une localisation physique à proximité des installations produisant vapeur ou eau chaude, traditionnellement alimentées à partir d'énergie fossile (gaz ou fioul). Le coût de l'énergie doit alors intégrer le coût de l'électricité, généralement faible de part la proximité des installations de production, et le coût de l'énergie thermique calculé en fonction de la non production de l'énergie électrique qu'elle représente.

L'énergie nécessaire au procédé d'osmose inverse peut quant à elle se décomposer suivant 4 fonctions :

- vaincre la pression osmotique au niveau de la membrane, cette pression osmotique étant liée à la concentration et à la nature des sels présents dans l'eau à traiter, mais aussi au taux de conversion appliqué au système, et à l'hydraulique (limitation de la couche de polarisation au voisinage de la membrane),
- vaincre la résistance de la membrane à l'écoulement de l'eau, définie par la perméabilité de la membrane d'osmose inverse, et dépendante de la température de l'eau,
- prétraitement, opérations unitaires de clarification et/ou de précipitation,
- transport, pompages d'eau brute, d'eau traitée.

En dehors du refoulement de l'eau traitée sur le réseau de distribution, qui peut représenter une part non négligeable de l'énergie, les principaux postes de consommation d'énergie d'une installation se concentrent essentiellement dans la partie haute pression de l'usine (Figure 2).

Figure 2 : Répartition de la consommation d'énergie sur une installation de dessalement par osmose inverse



1.3. Focus sur le dessalement par osmose inverse : amélioration des performances

Ces dernières années ont vu l'amélioration du procédé d'osmose inverse :

- amélioration des caractéristiques des membranes, augmentation du rejet de sels, augmentation de la perméabilité (par une meilleure maîtrise de la fabrication de la membrane),
- augmentation du taux de conversion des systèmes (de 30-35% à 45-55%), réduisant par là l'ensemble pompage-prétraitement d'eau de mer,
- amélioration des technologies de récupération de l'énergie du concentrat (Tableau 1).

Fin des années 70, les premiers systèmes utilisés étaient basés sur des technologies de pompes inversées ou de turbines Pelton, systèmes permettant des rendements de récupération d'énergie de l'ordre de 80-85%. Les premiers systèmes d'échangeur de pression sont apparus dans les années 80, mais n'ont réellement été appliqués sur des installations de grande capacité de production qu'au début des années 2000. Machines à déplacement positif ou rotative, elles ont des rendements de récupération plus élevés, de 94 à 97%, permettant de réduire la consommation d'énergie de 0.4 à 0.7 kWh/m³ d'eau dessalée par rapport au système à turbine.

Essentiellement d'origine électrique, l'énergie consommée par le procédé d'osmose inverse permet un couplage avec une gamme plus large de source d'énergie (énergie éolienne, énergie photovoltaïque,...). Alimentées à partir du réseau électrique, les usines de dessalement peuvent ainsi être localisées à proximité des ressources en eau brute et des consommateurs d'eau potable.

En parallèle aux travaux de réduction de la consommation énergétique des installations de dessalement, des études se sont déroulées afin de mieux maîtriser les paramètres liés à l'énergie électrique.

1.4. Maîtrise de l'énergie sur l'installation de dessalement

Un ensemble de mesures est mis en œuvre afin de mieux maîtriser les gros consommateurs d'énergie d'une installation de dessalement par osmose inverse :

- La diminution de la consommation d'énergie réactive est possible grâce à l'installation de capacités sur le réseau de distribution de l'usine.
- L'emploi des variateurs de vitesse pour les pompes dont le débit et/ou la pression sont variables permet d'actionner les trois leviers en :
 - Diminuant la consommation d'énergie grâce à une adaptation optimale de la vitesse au régime de fonctionnement de la pompe,
 - Réduisant la consommation de puissance réactive en faisant passer le facteur de puissance de moins de 0,9 à plus de 0,95,
 - Diminuant les pointes de consommation au démarrage des moteurs grâce à la montée en vitesse progressive de la pompe.
- Pour les moteurs à fonctionnement fréquent (>4000 heures/an) le rendement minimum des moteurs électriques utilisés est systématiquement spécifié au fournisseur de l'ensemble électromécanique, en utilisant par exemple la prescription pour les moteurs à haut rendement EFF1 pour les moteurs basse tension jusqu'à 90 kW. L'utilisation de moteurs à haut rendement en moyenne et basse tension permet de réduire de 2 à 5% la consommation électrique des moteurs.
- Enfin, une attention particulière est portée à la maîtrise de la distorsion harmonique à l'intérieur du réseau électrique de l'usine. Ces courants et tensions harmoniques principalement générés par les variateurs de vitesse doivent voir leur niveau limité par l'emploi de filtres série sur les variateurs de vitesse ou de filtre passif shunt sur les tableaux électriques. L'utilisation de ces filtres limitant la pollution harmonique réduira les pertes Joule supplémentaires et augmentera le rendement des

Tableau 1 : Evolution des systèmes de récupération d'énergie appliqués à l'osmose inverse

Période	Capacité de production des installations	Technologies de récupération d'énergie	Rendement attendus	Consommation d'énergie ramenée au m ³ d'eau dessalée*
Années 70	<500 m ³ /h	Installation sans système de récupération d'énergie	-	> 7 kWh/m ³
Années 80-90	< 100 000 m ³ /h	Pompe réversible Turbines Pelton Turbochargeur	70-80%	3-6 kWh/m ³
Années 2000	500 000 m ³ /h	Echangeur de pression	94-97%	< 3 kWh/m ³

* Etape de dessalement (hors pompage eau de mer, hors prétraitement, hors seconde passe d'osmose inverse, hors distribution) – Eau de mer à 38 g/L de salinité, 20°C.

Tableau 2: Etude des différentes énergies renouvelables applicable à une installation de dessalement par osmose inverse

Catégorie	Type	Description générale	Production de chaleur	Production d'électricité	Application à l'Osmose inverse	Maturité (1-Basse/3, Elevée)	Impact (1-Basse/3, Elevée)	Energie Produite exprimée en % de la consommation électrique de l'usine
Hydraulique	Turbines Hydraulique	Une turbine transforme l'énergie hydraulique en énergie électrique. Les deux facteurs essentiels de la récupération d'énergie sont la hauteur de chute et de débit d'eau. La puissance P est estimée selon la formule suivante : $P (kW) = 7 \times Q (m^3/s) \times H (m)$ Avec Q, le débit, H la hauteur de chute nette	Non	Oui	En cas de différence de hauteur importante entre la sortie de l'usine et le point de rejet du concentrat, il est envisageable d'installer une turbine hydraulique près du point de rejet.	3	1	Entre 0,5% et 2%
Solaire	Photovoltaïque	Les cellules en silicium transforment l'énergie solaire rayonnée en énergie électrique sous la forme d'un courant et d'une tension continus aux bornes de chaque cellule. Ce courant continu est transformé en courant alternatif grâce à un onduleur et est injecté dans le réseau électrique. L'intensité du courant produit dépend directement de l'énergie rayonnée sur les panneaux.	Non	Oui	Des panneaux solaires photovoltaïques peuvent être installés sur le toit des bâtiments principaux. L'orientation idéale est plein sud, avec une inclinaison de 35°. Les surfaces planes peuvent être équipées à la rigueur, les parties du toit orientées au nord ne le seront pas.	3	1	Mois de 0,5%
Solaire	Panneaux solaires thermiques	Un capteur solaire thermique reçoit le rayonnement solaire et chauffe le fluide du circuit primaire circulant à l'intérieur. Ce circuit contient de l'eau additionnée d'antigel qui s'échauffe en passant dans les tubes du capteur et se transporte la chaleur vers un ballon de stockage ; L'échangeur thermique situé à l'intérieur du ballon restitue les calories solaires à l'eau sanitaire. Le liquide primaire, refroidi, repart vers le capteur, où il est chauffé à nouveau tant que l'ensoleillement le permet.	Oui	Non	Des panneaux solaires thermiques peuvent être utilisés pour produire une partie de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage des bâtiments administratifs. A noter que la production d'eau chaude sanitaire est beaucoup plus simple à mettre en œuvre et plus efficace que celle de chauffage. En effet, les besoins en chauffage (forts en hiver) sont opposés aux périodes de rayonnement solaires (forts en été). La technologie de diffusion de la chaleur dans les locaux la plus répandue est le plancher solaire direct.	3	1	Mois de 0,5%
Eolien	Turbines	Une éolienne est une machine permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les critères principaux sont la distribution annuelle des vitesses de vent, la vitesse de décollage de l'éolienne et son rendement en fonction de la vitesse du vent	Non	Yes	Parallèlement à la construction d'une usine d'osmose inverse, la construction d'une ferme éolienne permet de produire l'équivalent voire plus de l'énergie électrique consommées dans l'usine. L'association des deux techniques est d'autant plus pertinente que les régions côtières où sont installées les usines d'osmose sont généralement des régions ventées.	3	3	Jusqu'à 100%

moteurs. Au-delà des gains énergétiques, l'installation de ces filtres augmentera la durée de vie de l'installation.

Grâce aux dispositifs de mesure et comptage d'énergie disposés dans l'usine, la consommation et la puissance des pompes haute pression et des autres consommateurs est transmise et enregistrée grâce au logiciel AQUACALC® développé par Degremont. Le logiciel permet d'éditer automatiquement et à distance grâce à une interface de type internet explorer® les principales données énergétiques de l'usine. Le logiciel établit des ratios d'intensité énergétique (kWh/m³) et permet d'éditer automatiquement des bilans énergétiques d'exploitation.

1.5. Energie verte

Degremont a réalisé une étude exhaustive des différentes énergies renouvelables pour en vérifier l'applicabilité dans le cadre d'une usine d'osmose inverse et le potentiel de couverture du bilan énergétique de l'usine pour chacune d'entre elles. Les conclusions sont listées dans le tableau 2.

Des outils d'aide à la décision ont été réalisés pour l'utilisation de l'énergie hydraulique du concentrât, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. Par exemple, en fonction de la topographie du site et grâce à cet outil, la possibilité d'installer une turbine hydraulique pour valoriser l'énergie électrique lors de la restitution du concentrât au milieu naturel sera étudiée.

La consommation électrique d'une usine de production d'eau potable de 140 000 m³/j (cas de l'installation de Perth en Australie) est de l'ordre de 560 MWh/j soit 210 GWh/an. Il faudrait, pour produire l'énergie correspondante une surface de plusieurs dizaines d'hectares de panneaux solaires photovoltaïques. L'alimentation globale d'une station de ce type par panneaux solaires photovoltaïques se heurte donc aujourd'hui à des obstacles techniques et financiers.

L'usine de dessalement si elle est associée à une ferme éolienne n'augmente ni les émissions de gaz à effet de serre ni la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles ou fissiles. Dans le cadre de l'installation de dessalement de Perth, le projet de construction de l'usine a été associé à la construction d'un parc de 48 éoliennes représentant une puissance installée de 80MW, plus de 3 fois la demande d'énergie de l'installation de dessalement (figure 3).

La consommation d'énergie de l'installation de dessalement de Perth représente légèrement plus de 30% de la production d'énergie du parc éolien d'Emu Downs. Il est donc possible de compenser la consommation d'énergie d'une usine de dessalement par l'installation parallèle d'une centrale éolienne de grande puissance produisant une énergie renouvelable.

Des études sont également menées en partenariat avec les filiales spécialisées en Energies Renouvelables du groupe GDF SUEZ pour valoriser et exploiter l'énergie

Figure 3: Perth, Australie - Champ d'éoliennes d'Emu Downs.



de la mer (énergie houlomotrice, énergie des mers) ou du soleil (héliothermodynamique).

2. LES REJETS

Les rejets d'une installation de dessalement sont de trois types :

- le sel, paramètre commun à tous les procédés de dessalement,
- les boues de prétraitement, plus spécifiques des traitements par osmose inverse,
- la température, spécifique des traitements de distillation.

2.1. Quantité de saumure produite par les installations de dessalement d'eau de mer

Les deux procédés de dessalement d'eau de mer, distillation et séparation par membrane, génèrent tous les deux des saumures, concentrés des sels présents dans la mer. A titre d'exemple, pour produire par dessalement d'eau de mer les 2 L de consommation journalière d'eau de d'alimentation, il faut dessaler environ 4 L d'eau de mer, ce qui conduit au rejet de 160 g de sels, environ 20 fois le besoin journalier d'une personne.

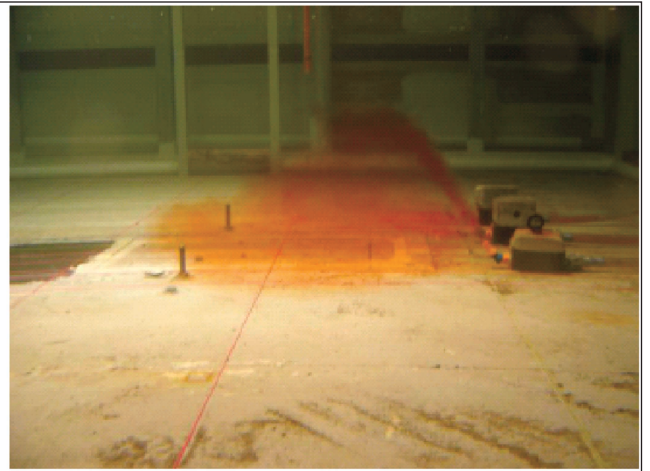
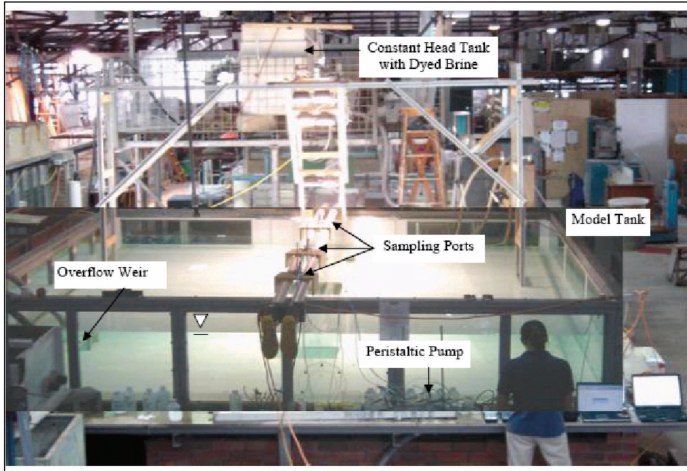
Ces sels sont le plus souvent rejetés dans le milieu naturel, et ceci pour plusieurs raisons :

- l'évaporation totale des saumures génèrerait une surconsommation d'énergie,
- la production de sels dépasserait la capacité d'utilisation humaine, entraînant le stockage à haut risque de lixiviation de millions de tonnes de sels (une installation de 50 000 m³/j d'eau dessalée produit environ 400 t de sels par jour),
- le cout des installations d'évaporation rendrait le dessalement inaccessible économiquement.

2.2. Gestion des rejets salés

Afin de limiter l'impact environnemental du rejet de ces saumures, des études ont été et sont encore menées sur différents sites. La solution adoptée aujourd'hui est la mise en place de systèmes de diffuseurs afin de maîtriser

Figure 4 : Maquette au 1:15 des systèmes de diffusion de concentrat de l'installation de Perth.
(Université de l'Australie de l'ouest).



la dilution de la saumure avec l'eau de mer, limitant spatialement la zone impactée.

C'est la solution qui a été adoptée sur l'installation de dessalement de Perth. L'installation dispose d'une licence d'exploitation assujettie à une obligation de performance liée à la gestion de ses rejets en mer. Le système de dilution doit permettre d'atteindre un taux de dilution de 45 à 50 m autour du point de rejet. Le système de diffusion a été dimensionné avec l'aide d'une modélisation assistée par ordinateur (CFD). Les résultats ont été validés par une maquette réalisée à l'échelle 1:15 (figure 4).

Après mise en route de l'installation, la performance des diffuseurs a été par la suite validée par l'Université d'Australie de l'ouest [4], en utilisant des mesures de salinité autour du point de rejet, ainsi qu'un test de diffusion à la rhodamine (Figure 5). Le taux de dilution mesuré a été de 50 à 120 en fonction du sens du courant.

2.3. Etude de la toxicité des rejets salée sur la faune et al flore aquatique

Différents tests de toxicité ont été réalisés sur les

Figure 5: Test de validation du modèle de diffusion par traçage hydraulique à la rhodamine des concentrats de l'installation de Perth [4]



principales espèces caractéristiques du point de rejet en mer [6], durant la période de mise en route de l'installation et après 12 mois de fonctionnement. Le principal objectif était de déterminer le taux de dilution minimum nécessaire avant d'observer un impact environnemental.

Les tests ont été réalisés sur différentes espèces, tests de germination de macro-algues, développement de larves de moule, développement d'algues unicellulaires, reproduction de copépodes et développement d'alvins.

Ces tests ont abouti à un taux de dilution minimum de 15, avec une protection des espèces de 99% (intervalle de confiance de 50%), taux de dilution bien en deçà de l'objectif de 45 fixé pour le dimensionnement du système de rejet en mer.

Différents paramètres, turbidité, pH, température, oxygène dissous et potentiel redox sont analysés en continue dans le concentrat de l'installation avant rejet en mer.

Le site de rejet est aussi soumis à une contrôle en continue de différents paramètres tel que la conductivité. Enfin, l'inspection périodique du site (Figure 6) montre que les systèmes de diffuseur eux même ont été

Figure 6: Vie marine autour des systèmes de diffusion du concentrat (Perth, Australie)



colonisés par la vie marine, et sont aujourd'hui entourés d'une population active de poissons.

2.4. Autres rejets d'une installation de dessalement

Les systèmes de prétraitement de l'eau de mer avant dessalement ont pour but d'éliminer les matières en suspension et le plancton qui sont susceptibles de colmater les installations de dessalement. Les prétraitements mis en œuvre sont des techniques de clarification proches de celles employées de façon conventionnelle pour la potabilisation des eaux douces (coagulation, décantation ou flottation, filtration). Autrefois rejetés en mer, les résidus de ces prétraitements ont impacté la flore et la faune au point de rejet, impact essentiellement lié à la turbidité des effluents rejetés qui perturbaient la photosynthèse et donc la production primaire.

Aujourd'hui, les installations sont équipées de traitement des boues de ces prétraitements: épaissement et déshydratation par centrifugation, comme c'est le cas à Perth (Voir Figure 7).

La température représente un impact spécifique des traitements de distillation. Autrefois ignoré, cet impact a été à l'origine de dégradation de la faune et de la flore au point de rejet des concentrats de ces installations. Aujourd'hui, la température au point de rejet est généralement réglementée, avec une limite d'augmentation de 2 à 7°C suivant les législations. La dissipation thermique est là aussi réalisée par dilution avant rejet dans le milieu naturel. Des études hydrauliques sont réalisées afin d'évaluer la dissipation des calories en mer à partir du point de rejet, en utilisant là aussi des outils de modélisation assistés par ordinateur.

3. AUTRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

D'autres impacts environnementaux existent. Le bruit, généré principalement par les pompes haute pression et certains systèmes de récupération d'énergie tels que les turbines. Plusieurs modes de gestion existent tel que le confinement dans une salle dédiée ou par capotage des équipements.

4. RECAPITULATIF DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les procédés de dessalement ont un impact environnemental significatif, récapitulé dans le tableau 3. Il est à noter que des efforts importants ont permis de réduire de façon très importante les principaux paramètres :

- la consommation énergétique du dessalement par osmose inverse a été divisée par un facteur 3-4 ces 15 dernières années,
- le couplage à des sources d'énergie renouvelable, comme c'est le cas à Perth, permet de diminuer fortement la production de gaz à effet de serre associée à ces procédés,
- les études d'impact sur le milieu ont permis de développer et d'appliquer des systèmes de dilution, limitant fortement l'effet sur la faune et la flore du milieu naturel au environ du rejet, dilution qui a d'ores et déjà démontré son efficacité.

Tableau 3: Récapitulatif des impacts environnementaux

Paramètres	Osmose inverse	Distillation
Bruit	3	2
Rejets Température	0	3
Salinité	1	1
Réactifs	1	3
Traitement des boues	1	1
Gaz à effet de serre	2	3

Figure 7: Perth – filière de traitement des eaux de lavage des filtres du prétraitement (clarification épaissement sur Densadeg, déshydratation par centrifugation)



CONCLUSIONS

Le développement du marché du dessalement, tiré par la demande en eau de plus en plus grande de zones de développement soumises au stress hydrique ainsi que l'augmentation du coût de l'énergie nécessitent une optimisation de plus en plus fine de la consommation énergétique des procédés de dessalement. Le développement de nouvelles technologies de récupération d'énergie, associés à une amélioration continue des caractéristiques des membranes et des équipements annexes (pompe, inox) ont fait du dessalement par osmose inverse un procédé de choix en matière de dessalement d'eau de mer.

L'eau de mer demeure une ressource alternative fortement consommatrice d'énergie, qui devra être explorée comme alternative aux autres ressources, eaux continentales de surface ou souterraines, réutilisation des eaux résiduaires ou dans un souci de diversification et de sécurisation de l'approvisionnement en eau d'une communauté.

L'évaluation de l'impact environnemental passe par une meilleure gestion des rejets, action sur la faune et la flore des saumures, diffusion, suivi des populations dans leur environnement, contrôle drastique des rejets, traitement des rejets de prétraitement.

La maîtrise de la consommation d'énergie, l'emploi de source d'énergies alternatives et le suivi en continue de l'impact des rejets de concentrat sur l'environnement sont aujourd'hui au cœur des préoccupations des acteurs du monde de l'eau. L'exemple de Perth en Australie illustre parfaitement ce point, l'approvisionnement énergétique étant assuré sur ce site par un champ d'éoliennes, des outils modernes de management de l'énergie ayant été développés pour assurer une maîtrise de la consommation d'électricité sur le site de production, et un suivi rigoureux des rejets et de leur impact sur le milieu étant réalisé.

Références Bibliographiques

- Charte Suez Environnement, 4 priorités, 12 engagements pour une contribution active au développement durable, sept. 2008.
- M.A. Sanz, Technologies de dessalement : l'énergie comme moteur du développement, Séminaire international sur le dessalement des eaux, Tunis, 30 juin 2008,
- M.A. Sanz, N. Winsor, G. Crisp, V. Bonnélye, Perth Reverse osmosis Project: Potable Water from Sea to Wind, conférence IDA, Las Palomas, Septembre 2007.
- P. Okely, J.P. Antenucci, J. Imberger, C.L. Marti, "Field investigations into the impact of the Perth Seawater Desalination Plant discharge on Cockburn Sound", Centre for Water Research, University of Western Australia, June 2007, WP2150PO
- D. Luketina, S. Christie, Marine Impact – Proving the models, AWA De-salting – Seawater and Brackish Water Conference, Perth, Sept. 2008.
- J Woodworth, "Marine Toxicity Tests – Report prepared for the Water Corporation" Geotechnical Services, December 2007

LE DESSALEMENT DES EAUX : UNE ALTERNATIVE DURABLE, OU BIEN UNE APPROCHE PRAGMATIQUE POUR RESOUDRE CERTAINS PROBLEMES DE PENURIE D'EAU?

A. S. El Gueddari¹

Résumé

Dans certaines situations critiques, l'eau n'aura plus de prix ou sera au coût du développement durable.

L'eau n'aura plus de prix surtout quand il s'agit des besoins vitaux des personnes. Et, si l'accès à l'eau potable est un droit fondamental en relation directe avec la dignité de la personne, on ne lésinera sur aucun moyen pour assurer ce droit aux citoyens.

Par ailleurs, quoi de plus fondamental que le droit d'accès à la nourriture. Eradiquer la faim et la malnutrition ne s'est-il pas posé comme le plus grand défi de la société internationale? Et comment réaliser cet objectif sans sécuriser et intensifier les productions agricoles? Dans les faits, une question appelle une autre, et donc comment sécuriser et intensifier la production agricole, sous certaines latitudes, sans recourir à l'irrigation?

Dans un contexte de raréfaction constante des ressources en eau, sous l'effet des sécheresses récurrentes, voire des prémices d'un changement climatique de plus en plus probable et en tout cas de plus en plus promu par les plus grands spécialistes, et quand ce même contexte est également marqué par une croissance effrénée d'une demande en eau soutenue par la croissance démographique, par le développement agricole, urbain, touristique et industriel et si encore on y ajoute une demande galopante des besoins alimentaires qui appelle plus de production agricole, plus de qualité, une diversité plus grande de produits, (les habitudes alimentaires évoluent très rapidement avec le niveau de vie des populations), et si enfin on considère les dégradations multiples que subissent les ressources en eau sous l'effet de la pollution par les effluents solides et liquides jetés sans précaution dans le milieu naturel, on peut aisément imaginer l'ampleur des pressions qui s'exercent sur les ressources en eau conventionnelles où l'évolution de certaines situations qui, si elles ne sont pas bien prises en main, conduirait à la porte fermée, voire à la catastrophe.

En tout état de cause, les autorités publiques, les sociétés ou les groupements humains acculés à soutenir le développement économique et social n'ont d'autres alternatives, en l'absence de ressources conventionnelles « faciles », que de recourir à des solutions compatibles avec les exigences d'un développement durable.

Malheureusement, les alternatives ne sont pas nombreuses et elles s'imposent dès que la durabilité des ressources conventionnelles est menacée.

Pour l'instant, on ne connaît pas d'autres solutions en dehors des recyclages des eaux usées et du dessalement d'eau de mer. Les eaux de mer dessalées de part leur qualité minérale et bactériologique sont d'un usage plus courant en tant que ressources pour l'eau potable et industrielle que pour l'irrigation.

Le progrès technologiques accomplis dans le domaine du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse notamment, a permis de réduire considérablement et le coût et les besoins en énergie pour la production d'eau douce à partir de la mer au point que dans des situations particulières, il est devenu moins coûteux de dessaler les eaux de mer que de mobiliser une ressource en eau conventionnelle.

Les ressources en eau de mer dessalées et massivement utilisées dans certaines situations d'extrême aridité du climat (Moyen Orient), dans des situations insulaires (Canaries, Chypres,...) où dans des zones côtières où l'exploitation des ressources souterraines au delà des possibilités renouvelables a conduit à leur dégradation par intrusion de biseaux salés, sont considérées en tant que composante structurelle de leurs bilans hydriques.

Devant une telle évolution du contexte climatique et de l'usage des ressources en eau de mer, est-il encore possible de se poser des questions sur la durabilité de l'alternative du dessalement?

La présente communication tentera d'éclaircir cette question à la lumière de certaines expériences internationales et de l'évolution du contexte hydrologique marocain.

Mots clés : Ressources en Eau, Dessalement, Irrigation, Changements Climatiques, Energie,...

1. Directeur de l'Administration du Génie Rural, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Rabat, Maroc. E-mail: seddik.elgueddari@gmail.com

Le dessalement des eaux : une alternative durable ou bien une approche pragmatique pour certains problèmes de pénurie ? Est-il possible de trouver une réponse définitive et absolue à une telle question, les avis des grands spécialistes étant tellement divisés à cet égard ?

S'engager dans un tel exercice peut a priori s'apparenter à une réelle aventure. Mais, ne faut-il pas tenter au risque d'attiser les passions et de provoquer l'ire tant des partisans que des opposants du dessalement des eaux ?

Devant l'évolution du contexte climatique, devant la croissance constante de la demande et eu égard à la saturation des ressources superficielles mobilisables et à l'exploitation, sans ménagement, des ressources souterraines conduisant à leur épuisement, la durabilité des solutions alternatives ne doit-elle pas se mesurer à l'effet qu'elles engendrent par rapport à la conservation des ressources naturelles conventionnelles.

Avant de s'attendre sur la solution du dessalement, il ne serait pas superflu de rappeler ici les freins psychologiques à l'utilisation des eaux usées recyclées. En effet, malgré l'important potentiel que les eaux usées recyclées représentent, leur utilisation demeure difficilement acceptable dans certains contextes culturels même pour l'irrigation.

L'EAU DE MER UN POTENTIEL ILLIMITÉ

L'eau de mer constitue la ressource d'eau planétaire la plus importante 97,5%. Il s'agit d'un potentiel quasiment inépuisable.

UNE LITTORALISATION DE PLUS EN PLUS GRANDE DE LA POPULATION MONDIALE

Il convient de noter que 40% de la population mondiale vit à moins de 70 kms d'une côte maritime, zone considérée en tant qu'aire de développement raisonnable du dessalement d'eau de mer. Si en plus on ajoute à cette concentration humaine et celle donc de toutes sortes de demandes (eau potable, eau industrielle, eau agricole), le fait qu'il s'agit là d'une zone très vulnérable où l'on rencontre les cas les plus fréquents de surexploitation des eaux souterraines et des menaces d'intrusion des eaux marines et de contamination des nappes, on est en droit de se demander si le recours au dessalement n'est pas une solution durable pour parer aux situations irréversibles de contamination des nappes par les eaux marines. Une telle aire n'est-elle pas l'espace du développement raisonnable du dessalement d'eau de mer pour satisfaire une demande croissante tout en préservant les ressources conventionnelles en imposant une exploitation à hauteur de leur potentiel renouvelable dans une perspective de préservation de l'équilibre naturel de ces zones.

Le Maroc n'échappe pas à cette évolution, puisque depuis le début du siècle dernier et sous l'effet d'un exode massif, l'axe Kénitra-Casablanca-Safi a vu sa population s'accroître de façon démesurée. L'axe Tanger-Ceuta dont la population est en pleine croissance, drainera avec les attraits des activités industrielles et de services liées au Port Tanger Méditerranée, une population très importante. Les zones littorales du pays concentrent plus de 60% de la population urbaine, plus de 90% des unités industrielles et près de 70% des capacités hôtelières homologuées. C'est également dans ces zones littorales où se concentre l'essentiel de la demande en eau potable et industrielle du pays.

Une analyse récente de l'évolution de la demande en eau potable et industrielle de la zone littorale Kenitra-Casablanca- Safi a abouti à la saturation totale des ressources mobilisées toutes origines confondues (superficielles et souterraines) à l'horizon 2025 peut être même plus tôt (2023), horizon auquel la solution dite «classique» de transfert d'eau nord-sud, si les ressources conventionnelles sont disponibles seront

UNE ÉVOLUTION INTERESSANTE DES TECHNOLOGIES ET DU COUT DU DESSALEMENT D'EAU DE MER

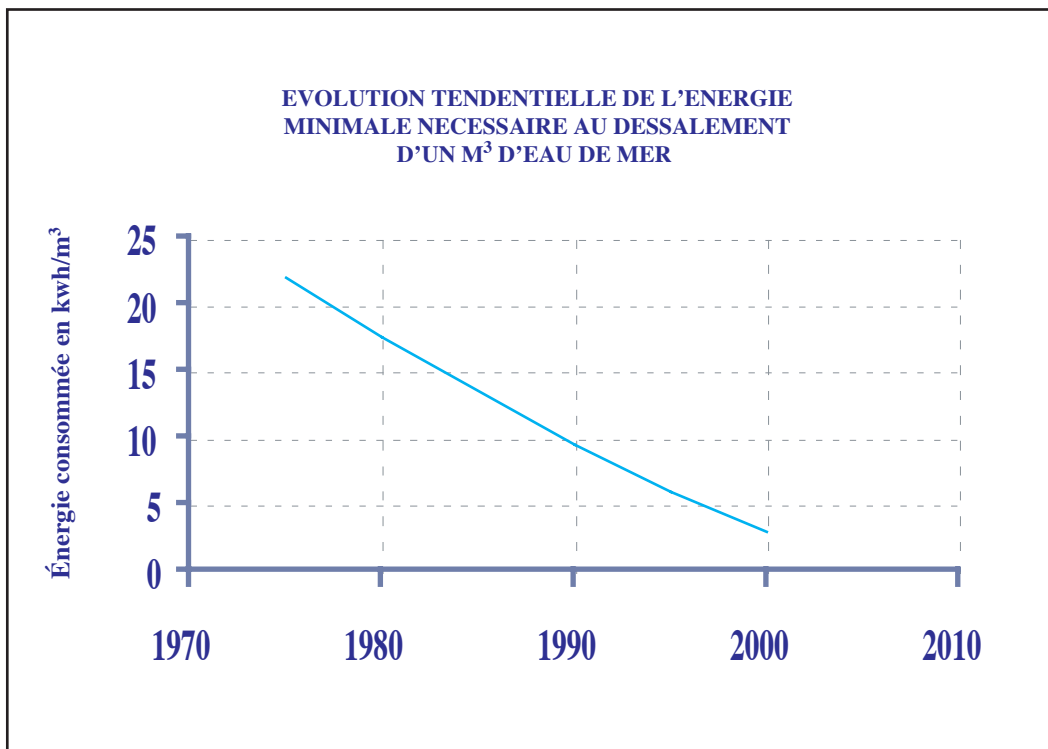
disponibles - sera certainement mise en compétition avec le dessalement d'eau de mer.

Sans s'attarder sur les différents processus de dessalement d'eau de mer, je ne crois pas que l'on puisse recourir aux techniques dites thermiques à l'avenir, sauf situation extrêmement particulière; l'osmose inverse grâce à l'évolution des technologies des membranes, semble aujourd'hui le plus compétitif tant vis-à-vis des autres techniques du dessalement que vis-à-vis de certaines solutions classiques de mobilisation de ressources en eau et notamment vis-à-vis du transfert interbassins. Il y a des situations où la mobilisation des ressources en eau superficielle au moyen des barrages de retenues peut s'avérer moins compétitive que la mobilisation de l'eau par dessalement d'eau de mer. C'est le cas de certains barrages proposés dans le bassin du Souss tels que les barrages Aguera-Oukil sur l'oued Tamrhart (5,2 DH/m³) Lamdad Aval (6,5 DH/m³) Tamri (6 DH/m³)²

L'évolution tendancielle de l'énergie minimale nécessaire au dessalement d'un mètre cube d'eau de mer est marquée par une baisse substantielle puisque elle est passée en 1975 d'environ 23 kWh/m³ à 3 kWh/m³ en l'an 2000, les estimations les plus optimistes pour une installation industrielle serait autour de 2,72 Kwh/m³. En Espagne, pour les installations prévues dans le sud du pays, les besoins en énergies sont arrêtés à 3-4 Kwh/m³.³

2. Coût actualisé du m³ d'eau au pied du barrage. Extrait du rapport du CSEC 2001 à Agadir

3. Besoins et procédés pour le dessalement de l'eau de mer. Frédéric Livet ; 15 novembre 2007.



Pour l'osmose inverse, on estime les pressions nécessaires à la séparation de l'eau douce de la saumure à 50 bars environ pour des investissements en équipement de 14 DH/m³. Ces chiffres sont à comparer, dans le cas où les possibilités hydriques de transfert d'eau interbassins sont possibles, aux investissements nécessaires à la réalisation des ouvrages de transfert d'eau et aux besoins en énergie pour le refoulement de l'eau.

L'évolution des technologies de l'osmose inverse et celle des besoins en énergie pour le dessalement par ce moyen sont plus qu'encourageantes pour faire du dessalement un moyen de mobilisation de ressources supplémentaires suffisamment compétitif pour faire face à l'évolution de la demande en eau.

L'EVOLUTION RAPIDE DE LA PRODUCTION D'EAU DESSALEE DANS LE MONDE

Le développement de la technologie de l'osmose inverse a largement contribué, grâce aux coûts très compétitifs des eaux dessalées par ce procédé, à l'expansion de la production de l'eau douce par dessalement de l'eau de mer.

L'évolution en baisse du coût du dessalement par osmose inverse résulte de deux phénomènes : i) l'amélioration des technologies et du coût de fabrication des membranes qui a diminué de près de 50% par rapport au coût des premières générations de membranes, et ii) grâce au développement des systèmes de récupération qui permettent d'utiliser la haute

pression de la saumure restant après le procédé de l'osmose inverse qui a une conséquence directe sur la forte diminution de l'énergie utilisée.

Les progrès accomplis dans les techniques de dessalement d'eau de mer se sont traduits dans beaucoup de situations par une compétitivité avérée par rapport aux sources conventionnelles d'obtention d'eau douce.

En fait, dans certaines situations où le renouvellement des ressources est en deçà des volumes exploitées et où le potentiel est menacé par les intrusions des eaux salées, la complémentation de l'offre hydrique par dessalement d'eau de mer peut s'avérer d'un coût dérisoire par rapport à la perte définitive d'une ressource conventionnelle menacée.

L'absence ou l'insuffisance d'une ressource conventionnelle ou le coût très élevé de la mobilisation d'une ressource conventionnelle renouvelable peuvent imposer le dessalement en tant que solution incontournable.

En tout état de cause, force est de constater que la production d'eau douce par dessalement d'eau de mer connaît un développement de plus en plus large et de plus en plus rapide. L'usage du dessalement d'eau de mer qui était exclusivement réservé aux besoins domestiques, industriels et touristiques, ne cesse de s'étendre à l'irrigation quand les productions agricoles justifient une valorisation suffisante.

Le cas de l'Espagne est très éloquent à cet égard où la production d'eau douce par dessalement a pratiquement

doublée entre 2000 et 2004. Le gouvernement espagnol prévoit que cette production doublera, encore, au cours de la période 2005 - 2010⁴.

Au Moyen Orient, dans certaines îles de Polynésie et de Caraïbe, comme dans certains pays méditerranéens, en Californie et en Australie, il y a des situations où la vie n'est plus envisageable sans le dessalement de l'eau de mer. 70% des ressources en eau de l'Arabie Saoudite proviennent de la mer. Les Etats Unies d'Amérique, la Chine et l'Inde s'approprient à entreprendre de grands projets de dessalement d'eau de mer.

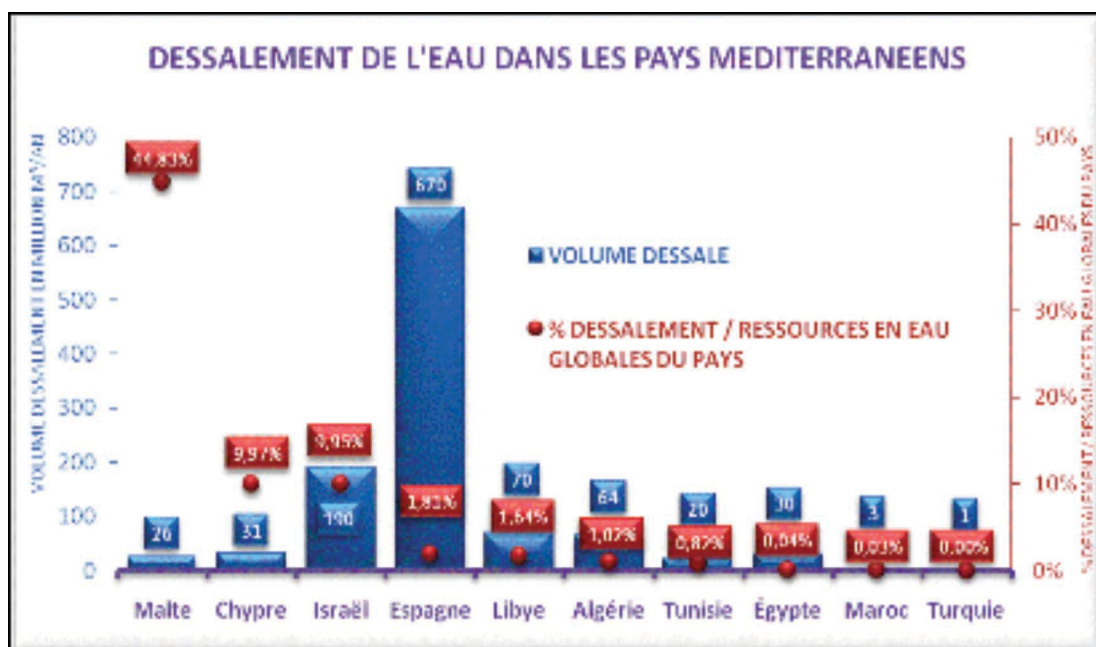
Beaucoup de pays, qui ont toujours privilégiés les voies classiques de mobilisation de ressources en eau en dépit de leur limitation et leurs coûts prohibitifs, sont contraints de recourir au dessalement d'eau de mer qui s'impose comme seule alternative pour palier des situations de déficit auquel ils se trouvent confrontés. C'est le cas de beaucoup de pays du pourtour méditerranéen tel que l'Espagne, misent sur le dessalement pour faire face à la hausse de la demande en eau et à la limitation de leur ressources. Au Maroc, le développement de l'offre future 2,7 Milliards de m³ par an à l'horizon 2030 intègre les ressources non conventionnelles, dessalement (400 Mm³/an) et réutilisation des eaux usées recyclées (300 Mm³/an) en tant que ressources structurelles pour 26%, en supposant que les nouveaux barrages mobiliseront 1,7 milliard de m³ par an.

DESSALEMENT DE L'EAU DE MER : SOLUTION PRAGMATIQUE POUR FAIRE FACE A LA SITUATION DE PENURIE

Dans les zones littorales ou insulaires, où la limitation des ressources conventionnelles ne permet pas de répondre à une demande existante ou prévisionnelle et où toute autre alternative du genre classique peut s'avérer onéreuse et nécessitent la mise en œuvre d'infrastructures très lourdes dont la réalisation requiert des délais longs et incompressibles, l'alternative du dessalement d'eau de mer qui se pose comme solution hautement compétitive relève, dans de tels cas, d'une décision pragmatique.

LA DURABILITE DE L'ALTERNATIVE DU DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

Est-il encore besoin de supputations au sujet de la durabilité de l'alternative du dessalement de l'eau de mer en tant que moyen de mobilisation de ressources en eau douce pour faire face à la demande en eau dans le futur? Le caractère structurel, même à faible échelle, des ressources en eau douce obtenues sur la mer dont le bilan hydrique de plusieurs pays du monde peut constituer à lui seul une preuve de durabilité. Le développement à grande échelle de la production d'eau douce par dessalement ne laisse aucun doute sur la durabilité de l'alternative, solution ultime, mais



4. Le dessalement en Espagne: www.technologyreview.com/spain/water

totallement idoine à des situations certes spécifiques mais de plus en plus fréquentes, solution tantôt de complémentation tantôt essentielle, voire unique. Elle est dans plusieurs cas salvatrice d'une menace pesante sur une ressource conventionnelle ou d'un déficit irréductible par les moyens classiques.

En contre poids, à tous les arguments énumérés tout au long de cette communication en faveur du dessalement des arguments à charge du dessalement sur le plan écologique se réfèrent: i) à la contribution des process du dessalement à la production de gaz à effet de serre (CO₂) par le recours à des énergies fossiles pour la production de l'énergie électrique. En effet, si les besoins descendent en dessous de 4 Kwh/m³, il faut avec les centrales électriques récentes: 8 Kwh de charbon (1Kg, soient 3 Kg de CO₂, 0,13\$), 7 Kwh de Gaz naturel (0,7 m³, soient 1,6 Kg de Co₂, 0,26\$) 8Kwh de pétrole (0,8 litres, soient 2 Kg CO₂, 0,36\$), 10 Kwh Nucléaire (4 Kwh, soient 0 Kg de Co₂, 0,18\$), et ii) à la contribution à la pollution marine par les rejets en mer de la saumure et des résidus d'adjuvants chimiques nécessaires au traitement des eaux de mer.

Le nucléaire constitue la meilleure source d'énergie pour le dessalement de l'eau de mer tant pour son coût que par ses effets nuls en terme de production de gaz à effet de serre. L'association du nucléaire au dessalement de l'eau de mer évoque en moi le souvenir de l'idée de projet énoncée par Feu Sa Majesté Hassan II, de développer l'irrigation à base du dessalement de l'eau de mer sur une bande côtière de quelque dizaines de Km, tout au long de la côte atlantique marocaine. On en conclut que celui qui fut l'instigateur, le maître à penser de la politique des barrages au Maroc n'avait pas omis de considérer qu'à terme, le recours au dessalement de l'eau de mer est une alternative incontournable, mais pas seulement, puisque dans l'expression de son idée transparissait une connotation de durabilité en rapport avec la dimension du projet.

LE DESSALEMENT D'EAU DE MER AU CŒUR DE LA STRATEGIE DU DEVELOPPEMENT DU GROUPE OFFICE CHERIFIEN DES PHOSPHATES (OCP)

A. Segten¹ & H. Frej²

Résumé

Le Groupe OCP, leader mondial dans le secteur du phosphate, a entrepris un vaste programme de développement de ses capacités minières et industrielles qui vont porter à terme cette capacité de 23 à 50 Millions de tonnes de phosphate par an.

L'effort d'accroissement de la capacité de production s'accompagne naturellement par l'augmentation des besoins en eau qui vont passer de 66 Millions de m³/an actuellement à plus de 158 Millions à terme.

Cette demande en eau est prise en compte de manière responsable dans la stratégie de développement du Groupe OCP. Pour la sauvegarde des ressources souterraines stratégiques, la croissance de l'industrie du phosphate se fera à prélèvement constant en eaux douces, en menant les actions suivantes :

- *La réallocation géographique de prélèvements vers l'amont du bassin oum rabii*
- *Le dessalement de l'eau de mer et le traitement des eaux usées pour combler le nouveau besoin*

La politique de dessalement est ancienne à l'OCP. Dès le début des années 70, le besoin en eau des installations de Laâyoune a été satisfait par le procédé de distillation pour dessaler l'eau de mer. A partir de 2005, c'est le procédé membranaire (osmose inverse) qui a été mis en place car moins énergivore. La station produit actuellement près de 1,5 million de m³ par an.

De nouveaux projets de dessalement sont prévus pour produire annuellement 100 millions de m³ d'eau de mer dessalée.

- *Un projet de dessalement à Jorf Lasfar qui va produire dans la première phase 45 million de m³/an et à terme 75 Mm³/an*
- *Un projet à Safi qui va produire 25 Mm³/an,*

Le choix de ces deux sites pour le dessalement d'eau de mer est dicté par :

- *La proximité des usines de l'océan,*
- *La disponibilité des infrastructures,*
- *La mise à profit de l'énergie bon marché produite par ses installations chimiques.*

Cette stratégie renforce l'engagement du Groupe en faveur du programme national de protection des eaux des nappes phréatiques et des barrages. Ainsi, sera libéré à terme :

- *25 Mm³/an, en provenance du barrage Daurat, consommés par la plate forme de Jorf Lasfar.*
- *22 Mm³/an, en provenance de la retenue de Safi, consommée par la plate forme de Safi*
- *10 Mm³ de la nappe de Fquih Bensaleh*
- *9 Mm³ de la nappe de la Bahira*

1. PRESENTATION DU GROUPE OCP

Le Groupe Office Chérifien des Phosphates (OCP) est spécialisé dans l'extraction, la valorisation et la commercialisation de phosphate et de produits dérivés. Chaque année, plus de 23 millions de tonnes de minerais sont extraites du sous-sol marocain qui recèle les trois-quarts des réserves mondiales.

Principalement utilisé dans la fabrication des engrais, le

phosphate provient des sites de Khouribga, Benguérir, Youssoufia et Boucraâ-Laâyoune. Selon les cas, le minerai subit une ou plusieurs opérations de traitement (criblage, séchage, calcination, flottation, enrichissement à sec...). Une fois traité, il est exporté tel quel ou bien livré aux industries chimiques du Groupe, à Jorf Lasfar ou à Safi, pour être transformé en produits dérivés commercialisables : acide phosphorique de base, acide phosphorique purifié, engrais solides.

Moteur de l'économie nationale, le Groupe OCP joue

1. Directeur des Infrastructures au Groupe OCP, en charge notamment des projets eau, énergie et transport. E-mail : A.SEGTEN@ocpgroup.ma

2. Chargé des Projets de Dessalement et de la Politique des Utilités à la Direction Infrastructures du Groupe OCP. Casablanca, Maroc. E-mail : hicham.frej@gmail.com

pleinement son rôle d'entreprise citoyenne. Cette volonté se traduit par la promotion de nombreuses initiatives, notamment en faveur du développement régional et de la création d'entreprise.

2. PLAN DE CROISSANCE DU GROUPE OCP

Le Groupe OCP, leader mondial dans le secteur du phosphate, a entrepris un vaste programme de développement de ses capacités minières et industrielles qui vont porter à terme cette capacité de 23 à 50 Millions de tonnes de phosphate.

	2008	Horizon 2020
Extraction de phosphate MT/an	25	50
Production d'acide phosphorique MT/an	4	10
Production d'engrais MT/an	3	14
Partenaires sur le site de Jorf	4	16 ²

- 1 Investisseurs Directs Etrangers
- 2 4 Joint Ventures + 12 IDE

3- PERSPECTIVES SUR LA CROISSANCE OCP ET IMPLICATION SUR LES BESOINS EN EAU

L'accès à l'eau est une question vitale pour la réalisation de la stratégie industrielle du groupe OCP. L'effort d'accroissement de la capacité de production s'accompagne naturellement par l'augmentation des besoins en eau qui vont passer de 66 Millions de m³/an actuellement à plus de 158 Millions à terme.

3.1. Situation actuelle et ressource en eau du groupe OCP

	Consommation annuelle (Mm)	Ressources
Khouribga	10	Bassin Fquih Bensaleh
Jorf Lasfar	25	Oum Rabii (Barrage Daourat)
Gantour	9	Eau souterraine Gantour
Safi	22	Oum Rabii (Retenue Safi)
Total	66	

3.2. Utilisation de l'eau dans les opérations de l'OCP

L'eau est utilisée dans les différents sites comme suit :

	Utilisation de l'eau dans les opérations de l'OCP	Cons. Spéc. m ³ /T de phosphate
Mine	• Arrosage des terrains et pistes pour le trafic des engins	0.12
Bénéficiaire ¹	• Lavage/ flottation à l'eau pour enrichir le minerai	~1
Transport	• Transport du phosphate par "slurry pipeline" (conduite aqueuse) • Deux slurry pipelines (axes Khouribga-Jorf et Benguéir-Safi)	0.45
Chimie	• Eau nécessaire à la production d'acide phosphorique	6-7 ²

¹ Enrichissement des qualités pauvres de roche phosphatée

² 10-13 m³ d'eau par tonne d'acide phosphorique

3.3. Besoins futures en eau du groupe OCP

Les nouveaux besoins annuels en eau pour accompagner le développement du groupe OCP s'élèvent à 158 Mm³

	Axe Khouribga - Jorf (Millions de m ³)	Axe Gantour - Safi (Millions de m ³)
Extraction Bénéficiaire et Social	31	16
Transport	19	7
Chimie	60	25
Total	110	48

Les besoins en eau industrielle vont tripler à terme pour permettre la stratégie de croissance.

4. INVESTISSEMENT IMPORTANT DU GROUPE OCP POUR REpondre A SES BESOINS EN EAU

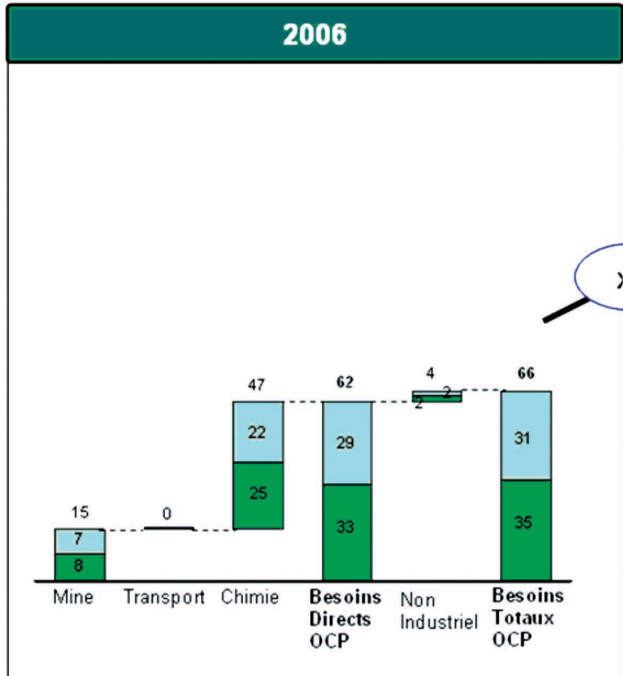
L'eau, ressource clé pour l'industrie du phosphate, est prise en compte de manière responsable dans la stratégie de développement du Groupe OCP.

Afin de ne pas augmenter les prélèvements en eaux douces, le Groupe OCP va conduire sa stratégie de croissance à besoins constants en eaux douces, néanmoins nécessitant une réallocation géographique de ses quotas. Les investissements de l'OCP permettent de maintenir un bilan neutre de prélèvements sur le bassin OUM ER RBIA.

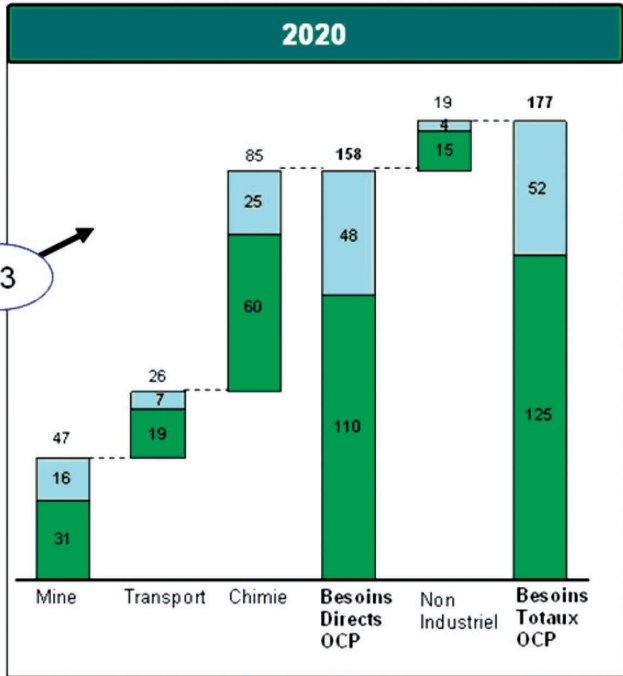
Trois types de projets vont être réalisés par l'OCP pour répondre d'une part à ces besoins en eau et d'autre part pour diminuer la pression sur les ressources hydriques naturelles et notamment, les ressources en eau souterraine.

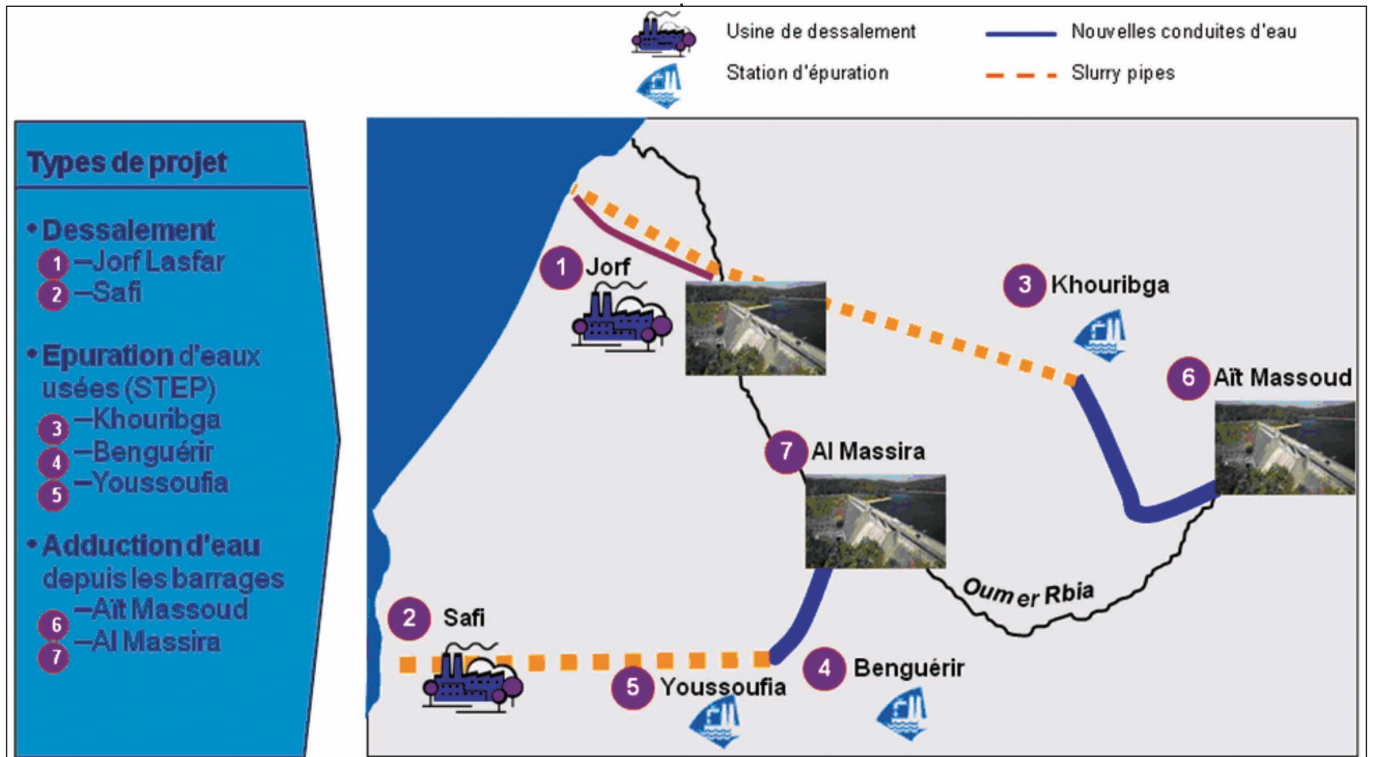
Besoins en eau du groupe OCP
Millions de m³ d'eau par an

□ Axe Gantour-Safi
■ Axe Khouribga-Jorf



x3





	Capacité (Mm ³ /an)	Objectif & Impacte
Adduction d'eau	Ait Massoud vers Khouribga ■ 45	<ul style="list-style-type: none"> Satisfaire le besoin de la mine. Lavage + Pipeline Libération des prélèvements faites actuellement au niveau des nappes phréatiques de Fquih Ben saleh et Bahira
	El Massira vers Bengrir ■ 18	
Epuración d'eau Usées	Khouribga ■ 5	<ul style="list-style-type: none"> Lavage du Phosphate+ Arrosage de espèces verts Réduire la consommation des ressources d'eau naturelles
	Youssoufia & Bengrir ■ 3 + 2	
Dessalement d'eau de mer	Jorf Lasfar ■ 60 (pour l'industrie) ■ 15 (por la collectivité)	<ul style="list-style-type: none"> Satisfaire le besoin de la chimie: Production d'acide sulfurique, engrais et électricité Contribuer au besoin d'el jadida en eau douce Réduire la consommation des ressources d'eau naturelles
	Safi ■ 25	

5. POLITIQUE DE DESSALEMENT EAU DE MER

La politique de dessalement est ancienne à l'OCP. Dès le début des années 70, les besoins en eau des installations de Laâyoune ont été obtenus par le procédé de distillation pour dessaler l'eau de mer. A partir de 2005, c'est le procédé membranaire (osmose inverse) qui a été mis en place car moins énergivore. La station produit actuellement près de 1,5 million de m³/an.

5.1. Historique de dessalement eau de mer A L'OCP

A partir des années 70, les besoins en eau des installations de Laâyoune ont été obtenus par des installations de dessalement eau de mer. Depuis, les différentes technologies de dessalement ont été testées et mises en service par l'OCP.

- De 1973 à 1988 : Production d'eau dessalée par le procédé Distillation par détentés

successives Multi-Stage-Flash (MSF)

- De 1989 à 2004 : Production d'eau dessalée par le procédé Distillation par Thermo-Compression (TC)
- A partir de 2005 : Production d'eau dessalée par Osmose Inverse (OI)

L'évolution dans le choix de la technologie est dictée par:

- La flambée du prix du fuel: De 1500 à 3280 DH/t ;
- Le développement des techniques membranaires ;
- La faible demande en énergie des procédés membranaires par rapport aux procédés de distillation;

5.1.1. Procédé : Distillation par détentés successives Multi-Stage-Flash (MSF)

1973-1988 : Station de dessalement MSF à Laâyoune-plage



- ✓ Nombre d'unités : 2
- ✓ Principe : MSF
- ✓ Date d'acquisition : 1973
- ✓ Capacité : 2 x 3500 m³/j
- ✓ Salinité de l'eau douce : < 10 ppm

5.1.2. Procédé : Distillation par ThermoCompression (TC)

5.1.3 : Procédé Osmose Inverse (OI)

A partir de 2005 : Unités de dessalement par OI à Laâyoune-plage



- ✓ Nombre d'unités : 2
- ✓ Principe : OI
- ✓ Prétraitement : Pré-chl. coag. floc.
- ✓ Dessalement : OI à 02 passes
- ✓ 1^{ère} passe : De 35 g/l à 340 ppm
- ✓ 2^{ème} passe : De 340 à < 10 ppm
- ✓ Date d'acquisition : 2005
- ✓ Capacité : 2 x 2000 m³/j
- ✓ Cs en énergie : 5 KW/m³

5.2. Nouveaux projets de dessalement d'eau de mer

De nouveaux projets de dessalement sont prévus pour produire annuellement 100 millions de m³ d'eau de mer dessalée.

- Un projet de dessalement à Jorf Lasfar qui va produire dans la première phase 45 million de m³/an et à terme 75 Mm³/an
- Un projet à Safi qui va produire 25 Mm³/an,

Le choix de ces deux sites pour le dessalement d'eau de mer est dicté par :

- La proximité des usines de l'océan,
- La disponibilité des infrastructures,

- La mise à profit de l'énergie bon marché produite par ses installations chimiques.

Cette stratégie renforce l'engagement du Groupe en faveur du programme national de protection des eaux brutes des nappes phréatiques et des barrages. Ainsi, sera libéré à terme :

- 25 Mm³/an, en provenance du barrage Daurat, consommés par la plate forme de Jorf Lasfar.
- 22 Mm³/an, en provenance de la retenue de Safi, consommée par la plate forme de Safi
- 10 Mm³ de la nappe de Fquih Bensaleh
- 9 Mm³ de la nappe de la Bahira

	Technologie	Capacité (Mm ³ /jour)	Année prévu de mise en service
<div style="background-color: #cccccc; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">JORF LASFAR</div> <div style="font-size: 2em; color: #008000; margin: 0 5px;">➤</div>	RO	■ 150 000	■ 2012
	RO	■ 250 000	■ 2020
<div style="background-color: #cccccc; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">SAFI</div> <div style="font-size: 2em; color: #008000; margin: 0 5px;">➤</div>	RO	■ 75 000	■ 2014

5.3. Projet de Jorf Lasfar

Le projet de dessalement eau de mer de Jorf Lasfar permettra de couvrir les besoins actuels de la plateforme en eau douce, 30 millions de m³, et éventuellement ceux de la ville d'El Jadida estimés à 15 millions de m³. A l'horizon 2020 la station de dessalement d'eau de mer produira 75 millions de m³ pour satisfaire les besoins des nouvelles unités intégrées de production d'acide phosphorique et des engrais, réservées aux investisseurs directs étrangers.

L'implantation de la station de dessalement de Jorf Lasfar a été étudiée de manière à tirer profit des installations et infrastructures existantes de la plateforme à savoir :

- Coût du pompage eau de mer réduit, (uniquement le coût de la quantité produite) ;
- Tarification énergie électrique bon marché (utilisation de l'excédent énergie électrique de la plate forme) ;
- Coût d'investissement des infrastructures (poste électrique, routes d'accès, canal de rejets, réservoir de stockage d'eau douce, etc.) ;

5.3.1. Trois technologies ont été comparées pour le site de Jorf Lasfar

Lors de l'étude de faisabilité du projet, les trois technologies de dessalements eau de mer ont été étudiées.



	Capex	Energie Eletrique	Thermique	Taux de récupération	Disponibilité	Interface avec Installation Existante
Reverse Osmosis	■ 1000 \$/m3/j	■ 4,5 kwh/m3	---	45%	95%	Minime
MED - TVC	■ 1200 \$/m3/j	■ 2 kwh/m3	(-720 MJ/s) - 9 kwh/m3 Energie électrique équivalente	15%	93%	Haute
MSF	■ 1300 \$/m3/j	■ 4 kwh/m3	(-720 MJ/s) - 9 kwh/m3 Energie électrique équivalente	15%	93%	Haute

L'analyse des différents aspects liés à ces technologies montre que le procédé recommandé est l'osmose inverse vu ce qui suit :

- Coût plus bas d'investissement
- Coût plus bas de cycle de vie
- Consommation minimale d'énergie
- Demande réduite en eau brute
- Interfaces minimisées avec les installations existantes donc plus d'indépendance
- Pas d'impact sur les installations existantes

5.3.2. Interfaces de la station de dessalement en osmose inverse avec l'infrastructure existante

6. CONCLUSION

La politique de dessalement eau de mer renforce l'engagement du Groupe en faveur du programme national de protection des ressources en eau souterraines et superficielles; son programme de développement étant conçu à prélèvement constant et valorisation des ressources non conventionnelles.

Schéma de principe de l'unité de dessalement eau de mer

