

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.

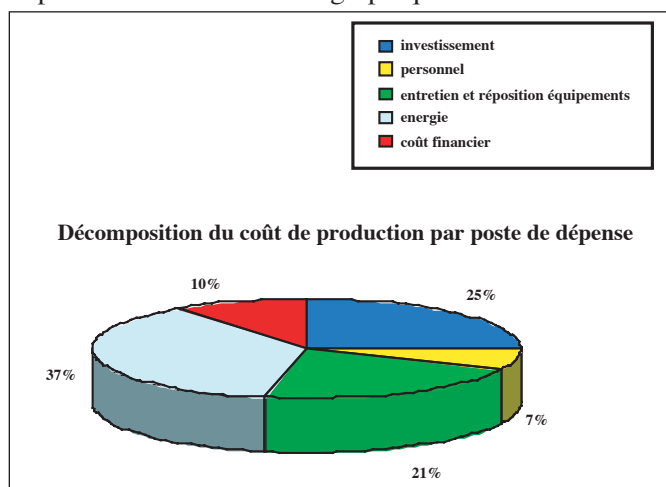
Au cours des dernières années, il y a eu une diminution de la consommation spécifique grâce au remplacement progressif de la distillation par l'osmose inverse, ainsi qu'au système de récupération de l'énergie des saumures.

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.