

UTILISATION DE NANOMEMBRANES POUR LE DESSALEMENT DE L'EAU ET  
COMPARAISON AVEC L'OSMOSE INVERSE ET LA DISTILLATION

par

Annie Bissonnette

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de  
l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, Janvier 2008

## **IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE**

### **UTILISATION DE NANOMEMBRANES POUR LE DESSALEMENT DE L'EAU ET COMPARAISON AVEC L'OSMOSE INVERSE ET LA DISTILLATION**

Annie Bissonnette

Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Université de Sherbrooke  
Janvier 2008

Mots clés : dessalement, nanotechnologie, nanotube de carbone, nanomembrane, osmose inverse, distillation, impacts environnementaux.

De nouvelles technologies innovatrices sont continuellement à l'étude dans le domaine du traitement de l'eau afin de pourvoir aux besoins grandissant de la population mondiale. Le domaine des nanotechnologies offre de plus en plus d'alternatives et une membrane à base de nanotubes de carbone a démontré lors d'essais en laboratoire des capacités plus intéressantes que les technologies utilisées à l'heure actuelle pour le dessalement de l'eau. La comparaison de celle-ci avec les technologies actuelle permet d'établir des avantages en faveur d'une membrane plus performante. Cependant, des études approfondies seront nécessaires dans les années futures afin de réduire l'incertitude concernant les risques et les impacts de l'utilisation de nanotubes de carbone pour le traitement de l'eau. Avec l'engouement suscité par les nanotechnologies, il y a lieu de se demander si les connaissances actuelles permettent d'évaluer adéquatement les impacts et risques potentiels pour l'humain et l'environnement et le cas échéant si le principe de précaution est appliqué.

## SOMMAIRE

Le dessalement de l'eau est un moyen d'obtenir de l'eau potable qui est de plus en plus utilisée à l'échelle planétaire. Celui-ci permet de répondre au besoin des populations de certaines régions où l'eau douce est rare ou inexistante. Déjà les impacts associés aux procédés répandus que sont l'osmose inverse et la distillation sont bien connus. Il est clair que ces technologies comportent un lot d'impacts environnementaux mais que les bénéfices du dessalement l'emportent sur ceux-ci.

Les recherches dans le domaine des nanotechnologies ont permis de créer une membrane à base de nanotubes de carbone qui faciliterait le dessalement de l'eau. Cette alternative prometteuse permettrait selon ceux qui l'ont mise au point de réduire la consommation d'énergie nécessaire au dessalement et éliminerait en partie les contraintes des membranes conventionnelles. Étant donné le côté innovateur des nanotechnologies et l'inconnu qui entoure celles-ci, il importe de réaliser une analyse minutieuse des impacts associés à tout produit qui en est issu tout en faisant preuve de précaution. Le procédé intégrant la nanomembrane est donc comparé aux technologies actuelles de dessalement pour déterminer s'il constituerait une alternative valable.

La description des technologies disponibles, l'identification et la pondération des critères d'analyse ont permis de déterminer qu'il était encore tôt pour établir si une nanomembrane à base de nanotubes de carbone pouvait révolutionner le monde du dessalement. En effet, les données concernant cette nanotechnologie sont encore insuffisantes. Du point de vue toxicologique, les impacts des nanotubes de carbone sont encore peu connus. De plus, la faisabilité, du procédé, sur une grande échelle n'a pas encore été prouvée.

Il existe cependant d'autres moyens de réduire les impacts du dessalement sur l'environnement qui sont disponibles dès maintenant. L'utilisation d'énergies renouvelables et le recours à la valorisation de la saumure avant son rejet font partie de ceux-ci et ils correspondent mieux au principe de développement durable. C'est donc, vers ceux-ci que l'industrie du dessalement devrait s'orienter en attendant d'avoir les réponses aux questions soulevées concernant les nanomembranes et les nanotubes de carbone.

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier François Roberge qui m'a guidée dans la rédaction. Ses questions pointues sur les impacts potentiels et les données disponibles m'ont permis d'orienter mes recherches vers des aspects importants. Nos discussions ont fait évoluer ma compréhension de la problématique et m'ont amenée à réfléchir sur les limitations du travail.

Un merci spécial à Emmanuel Pirsch pour ses encouragements continuels et son support. Merci également à mes parents pour leur soutien et leur disponibilité.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1 NANOTECHNOLOGIES .....</b>	<b>3</b>
1.1 Applications générales des nanotechnologies.....	3
1.2 Application des nanotechnologies au traitement de l'eau .....	4
1.2.1 Production d'eau potable .....	4
1.2.2 Traitement de l'eau usée .....	5
1.2.3 Dessalement de l'eau .....	6
<b>2 RISQUES ASSOCIÉS AUX NANOTECHNOLOGIES.....</b>	<b>7</b>
2.1 Dégradation dans l'environnement.....	8
2.2 Méthodes de détection et d'analyse .....	9
2.3 Exposition humaine et effets sur la santé .....	10
2.4 Effets sur l'environnement.....	11
2.5 Risques associés aux nanotubes de carbone .....	11
2.5.1 Informations issues de fiches signalétiques .....	12
2.5.2 Informations issues d'études toxicologiques .....	13
<b>3 CRITÈRES D'ÉVALUATION ET DE COMPARAISON DES ALTERNATIVES .....</b>	<b>16</b>
3.1 Aspects économiques .....	16
3.2 Aspects techniques .....	17
3.3 Aspects environnementaux .....	17
3.3.1 Utilisation d'énergie .....	17
3.3.2 Impacts sur l'écosystème marin.....	18
3.3.3 Impacts du bruit .....	18
3.3.4 Utilisation du territoire .....	18
3.3.5 Impacts sur l'eau souterraine.....	19
3.4 Aspect sociaux.....	19
3.5 Méthodologie et comparaison .....	20
<b>4 SURVOL DES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT .....</b>	<b>22</b>
4.1 Procédés conventionnels .....	22
4.1.1 Recherches et applications futures.....	23

<b>5</b>	<b>ÉVALUATION DU PROCÉDÉ DE NANOFILTRATION PAR NANOMEMBRANE</b>	<b>25</b>
5.1	Fabrication, installation et procédé.....	25
5.2	Coût de production, d'utilisation, de disposition.....	26
5.3	Enjeux techniques.....	27
5.4	Vie utile et impact environnemental.....	28
5.5	Considération sociales et éthiques.....	29
5.6	Caractérisation du procédé à base de nanotubes de carbone.....	30
<b>6</b>	<b>ÉVALUATION DU PROCÉDÉ PAR OSMOSE INVERSE</b> .....	<b>31</b>
6.1	Fabrication, installation et procédé.....	31
6.1.1	Coût de production, d'utilisation, de disposition.....	31
6.1.2	Enjeux techniques.....	32
6.1.3	Vie utile et impact environnemental.....	33
6.1.4	Considérations sociales et éthiques, application du principe de précaution.....	33
6.1.5	Caractérisation du procédé d'osmose inverse.....	33
<b>7</b>	<b>ÉVALUATION DU PROCÉDÉ PAR DISTILLATION</b> .....	<b>35</b>
7.1	Distillation à détente étagées.....	35
7.2	Distillation multi-effets.....	35
7.2.1	Coût de production, d'utilisation, de disposition.....	36
7.2.2	Enjeux techniques.....	36
7.2.3	Vie utile et impact environnemental.....	37
7.2.4	Considération sociales et éthiques, application du principe de précaution.....	37
7.2.5	Caractérisation du processus de distillation.....	37
<b>8</b>	<b>COMPARAISON DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES</b> .....	<b>39</b>
8.1	Aspects économiques.....	41
8.2	Aspects techniques.....	41
8.3	Aspects environnementaux.....	41
8.4	Aspects sociaux.....	42
8.5	A propos des résultats finaux.....	42
8.6	Nanomembrane et dessalement.....	43
8.7	Mesures d'atténuations.....	44
8.7.1	Besoins énergétiques.....	44
8.7.2	Rejets de saumure.....	45

<b>CONCLUSION .....</b>	<b>46</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES .....</b>	<b>47</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Gabarit de présentation des impacts par technologie .....	20
Tableau 3.2	Échelle de valeur et symboles pour l'évaluation des impacts.....	21
Tableau 4.1	Répartition mondiale des procédés de dessalement.....	22
Tableau 4.2	Répartition mondiale des procédés de dessalement utilisés selon la teneur en sel de l'eau brute. ....	23
Tableau 5.1	Nanotubes de carbone et risque d'exposition en milieu de travail.....	26
Tableau 5.2	Évaluation du procédé par nanomembrane .....	30
Tableau 6.1	Procédé d'osmose inverse .....	34
Tableau 7.1	Procédé de distillation .....	38
Tableau 8.1	Présentation des résultats comparatifs et des totaux.....	40

## INTRODUCTION

En 2000, le magazine américain Fortune publiait un article dans lequel il annonçait que « l'eau promettait d'être au 21<sup>e</sup> siècle ce que le pétrole fut au 20<sup>e</sup> siècle : le précieux bien déterminant la richesse d'une nation » (Tully, 2000). Or, plus d'un million de personnes dans le monde vivent sans accès à l'eau potable (PNUD, 2006) alors que seulement 20 litres d'eau potable par personne sont nécessaires pour assurer les besoins de consommation, d'hygiène et d'usages. L'accès à l'eau contribue à l'amélioration de la santé et de la qualité de vie et une pénurie peut influencer à long terme les perspectives de développement durable (The Worldbank Group, 2001). Cette problématique est d'ailleurs un des enjeux importants de développement. Une des cibles des objectifs du millénaire vise justement à « Réduire de moitié, d'ici à 2015, le pourcentage de la population qui n'a pas accès de façon durable à un approvisionnement en eau potable ». (Nations unies, 2003)

Sachant que les océans contiennent 97 pourcent de l'eau de la planète alors que les autres deux à trois pour cent se retrouvent dans les lacs ou encore prisonniers des glaciers et des calottes glacières, (Smithsonian, 1995) il n'est pas surprenant de constater que les pistes de solutions, à cette problématique, s'orientent vers la filtration améliorée, le recyclage d'eaux usées et le dessalement de l'eau. Or, ces technologies ne sont pas toujours accessibles et peuvent s'avérer coûteuses.

Heureusement, les recherches sur de nouvelles technologies ont permis des avancées importantes dans le domaine de l'épuration et de la filtration de l'eau. Nouvelles venues, les nanotechnologies et leurs applications potentielles dans le domaine du traitement de l'eau amènent toute une série d'alternatives aux solutions existantes.

Puisque l'application des nanotechnologies au dessalement de l'eau s'avère être une des pistes de solution pour régler le problème d'accès à l'eau (Holt, 2006), cet essai traitera essentiellement de nanotechnologies et de dessalement de l'eau. Dans un premier temps, une présentation brève des nanotechnologies fera état de leurs applications actuelles et futures dans le domaine du traitement de l'eau. Comme le mentionnait Bryan Bruns lors d'une conférence en 2004, « ces nouvelles technologies

peuvent contribuer à améliorer la qualité de vie des populations en développement si elles sont développées d'une manière appropriée et accessible ».

Le deuxième chapitre sera consacré aux risques associés aux nanotechnologies puisque à l'instar de toute autre nouvelle technologie, seule une analyse exhaustive des impacts et l'application du principe de précaution permet de faire un choix éclairé en gardant en tête la nécessité de le faire dans une perspective de développement durable. L'information limitée sur le sujet, compte tenu de l'arrivée récente de ces technologies sur le marché, obligera, dans certains cas, une extrapolation des enjeux reconnus dans d'autres domaines à celui des nanotechnologies et malgré cela l'incertitude et l'inconnu demeureront une réalité.

Par la suite afin de comparer la nanotechnologie innovatrice faisant l'objet de cette étude avec les technologies de dessalement utilisées à l'heure actuelle, une liste de critères d'évaluation applicables aux technologies de dessalement sera établie en considérant les aspects économiques, environnementaux et sociaux. Cette comparaison du procédé utilisant une nanomembrane avec ceux d'osmose inverse et de distillation mettra l'accent sur les avantages, les inconvénients et les impacts associés à chacune de ces techniques.

La pondération des avantages, inconvénients, risques et impacts présentés amènera à une réflexion visant à déterminer si la nanomembrane à base de nanotubes de carbone présente, à l'extérieur du monde de la recherche, un potentiel d'application intéressant en tenant compte des bénéfices et risques qui lui sont associés.

# 1 NANOTECHNOLOGIES

## 1.1 Applications générales des nanotechnologies

Dans cette section, un aperçu bref et général des nanotechnologies et des nanotubes de carbone est présenté pour aider le lecteur à comprendre cette analyse. Il existe toutefois de nombreux écrits très détaillés sur ce sujet pour quiconque désire en savoir plus.

Les domaines d'études et de recherche et développement qui s'intéressent aux atomes, aux molécules et aux macromolécules en utilisant des unités de mesure de moins de 100 nanomètres sont appelés nanotechnologies. Un nanomètre correspond à un milliardième de mètre ( $10^{-9}$  m) ce qui est environ mille fois plus petit qu'un cheveu humain ou encore cent fois plus petit qu'un globule rouge. Les nanotechnologies utilisent la matière afin de créer par des manipulations chimiques ou physiques, des matériaux aux propriétés et applications spécifiques. Il existe déjà plusieurs nanomatériaux qui sont catégorisés selon quatre grands types.

Le premier regroupe les matériaux à base de carbone que sont les fullerènes et les nanotubes de carbone. Ils ont plusieurs applications potentielles variant du fini de peinture amélioré à des applications en électronique. Les nanomembranes qui font l'objet de ce travail se retrouvent dans ce groupe.

Le deuxième groupe se compose de matériaux métalliques tels que les particules quantiques ou encore les oxydes métalliques comme le dioxyde de titane qui est incorporé dans les écrans solaires. Le troisième groupe a surtout des applications médicales. Il comprend les nanopolymères qui permettent de réaliser certaines fonctions chimiques et qui pourraient être utilisés comme catalyseur ou encore pour administrer des médicaments. Le dernier type inclut tous les matériaux composites obtenus par la combinaison de nanoparticules avec d'autres particules ou matériaux.

Par leurs propriétés uniques, ces différents types de nanomatériaux innoveront en termes de fonctionnalités électriques, catalytiques, mécaniques et thermiques ce qui leur confère un important potentiel d'application dans les secteurs médical, commercial,

militaire et environnemental. Déjà sur le marché nord-américain, plusieurs produits contiennent des nanomatériaux. C'est le cas de certains composants électroniques, de skis, de bâtons de golf, de raquettes de tennis, de peintures, d'huiles, d'écrans solaires, d'oreillers, de coussins, de filtres à air, pour ne mentionner que ceux-ci (EPA, 2007).

Issus du premier type de nanomatériaux, un des premiers produits industriels du domaine des nanotechnologies est le nanotube de carbone. Il s'agit une structure cristalline, de forme tubulaire, creuse et close, composée d'atomes disposés régulièrement en hexagones qui est obtenue à partir d'une forme du carbone. On fait référence à deux types de nanotubes : les nanotubes de carbone monofeuillet (SWNT) dont la structure peut être représentée par un feuillet de graphite enroulé sur lui-même et fermé à ses deux extrémités par une demi-sphère et les nanotubes de carbone multifeuillets (MWNT) qui sont constitués de plusieurs feuillets de graphite enroulés les uns autour des autres (Wikipedia, 2007).

## **1.2 Application des nanotechnologies au traitement de l'eau**

Depuis déjà quelques années, le potentiel des nanotechnologies appliquées au traitement de l'eau est reconnu et exploité par différentes installations. Des procédés de nanofiltration ont été intégrés à certaines usines pour obtenir une eau pure et potable. Les chercheurs ne cessent de leur découvrir de nouvelles applications potentielles pour améliorer l'élimination des substances chimiques et des micro-organismes de l'eau. Les paragraphes qui suivent abordent les applications actuelles et futures des nanotechnologies dans le domaine du traitement de l'eau.

### **1.2.1 Production d'eau potable**

Dans le domaine de la filtration de l'eau, le terme nanofiltration est utilisé pour désigner une nouvelle technique de séparation par membrane permettant l'enlèvement de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre, d'où son nom (Maurel, 2006).

L'usine de traitement de l'eau de Méry-sur-Oise qui dessert la région parisienne soit environ 4 millions d'habitants a opté pour cette technologie de pointe en 1999 afin de réduire la quantité de produits utilisés pour le traitement de l'eau. Leur système

sophistiqué fonctionne à l'aide de nanomembranes et permet d'éliminer toutes les substances colloïdales de l'eau potable.

Le procédé de nanofiltration qui y a été installé était à l'origine utilisé dans le monde médical et a été adapté pour permettre le traitement d'un volume d'eau élevé et par le fait même la production d'eau potable. Il existe d'autres exemples de l'utilisation de la nanofiltration, notamment à Coliban en Australie où l'installation traite jusqu'à 126 millions de litres d'eau par jour depuis 2002 (Veolia, 1999).

### **1.2.2 Traitement de l'eau usée**

En décontamination, des procédés hybrides utilisant des membranes nanofiltrantes sont utilisés dans l'industrie afin de retirer les contaminants organiques présents sous forme de traces dans l'eau à recycler. Cette technologie éprouvée a été appliquée à grande échelle entre autre en Australie et à Singapour (Nghiem *et al.*, 2005). Des recherches ont également prouvé que la filtration avec des nanotubes de carbone est plus efficace que la filtration au charbon activé pour retirer le chloroforme de l'eau (Nasseri *et al.*, 2004).

Des études en cours démontrent une application potentielle des membranes à base de polymères de cyclodextrine et de nanotubes de carbone pour l'élimination des perturbateurs endocriniens comme les nonylphénols éthoxylés et des produits toxiques organochlorés tels que le trichloréthylène. Des recherches sur l'application de ce même type de membranes pour la filtration d'autres polluants organiques tel que les dioxines, les biphényles polychlorés (BPCs) et les liquides denses à phases non-aqueuse (DNAPLs) se poursuivent également. Cependant, ces procédés sont présentement trop coûteux pour être utilisés à cette fin (Salipira *et al.*, 2006).

Notons que les applications des nanofiltres sont nombreuses dans le domaine du traitement de l'eau. C'est le cas notamment pour l'élimination des métaux lourds et des colorants ainsi que pour la déminéralisation, la concentration, la récupération et le recyclage de certaines substances (Audinos, 2000.).

Comme le démontre le nombre d'applications décrites dans les paragraphes précédents, les nanotechnologies sont déjà présentes dans l'industrie du traitement de

l'eau et les recherches en cours laissent entrevoir plusieurs autres applications dans ce domaine.

### **1.2.3 Dessalement de l'eau**

Dans un autre ordre d'idée, les nanomembranes sont utilisées pour le dessalement de l'eau dans l'industrie des biotechnologies et celle de l'agroalimentaire. Elles sont aussi utilisées comme pré-traitement pour le procédé de dessalement par osmose inverse afin d'augmenter la qualité de l'eau à traiter et d'éviter le colmatage des membranes d'osmose conventionnelles (Audinos, 2000).

## **2 RISQUES ASSOCIÉS AUX NANOTECHNOLOGIES**

Plusieurs études et rapports récents établissent les bases de ce que devrait aborder la gestion de risques des produits issus du domaine des nanotechnologies. Par contre, comme ce fut mentionné, dans le chapitre précédent, de nombreuses nanotechnologies sont déjà disponibles sur le marché, dans leur forme pure ou transformée. Une question se pose à savoir si celles-ci ont fait l'objet d'analyses de risques et d'impacts avant leur introduction comme produits de consommation.

Dans le cadre de ce travail, la liste des risques associés aux nanotechnologies est issue du « White paper on nanotechnology risk governance » du International Risk Governance Council (IRGC) publié en juin 2006 ainsi que du « Nanotechnology White paper » publié par l'Agence de protection de l'environnement (EPA) aux États-Unis en février 2007. Ces deux références ont été sélectionnées parce qu'elles résument bien ce qui a été décrit à ce sujet dans plusieurs autres publications.

Loin d'amener des réponses à toutes les questions qu'ils soulèvent, ces travaux informent toutefois bien le lecteur sur les différents aspects du risque qu'il est essentiel de considérer lorsqu'il est question de nanotechnologies. Ces deux rapports font état du manque de données traitant de l'exposition à des nanomatériaux et de l'incertitude entourant leurs effets sur la santé et l'environnement. Ils suscitent également des questions pertinentes à propos des risques d'expositions possibles.

Selon l'EPA, l'analyse de risque d'une nanotechnologie peut se faire à partir du protocole standard qui vise à identifier les dangers puis les risques de contamination par l'exposition et les doses de toxicité afin de faire une caractérisation du risque. Cette évaluation devrait se faire en considérant l'ensemble du cycle de vie du produit. Des auteurs ont proposé des stratégies en vue de l'évaluation des nanomatériaux de même qu'un guide de caractérisation des risques associés au produit issus de cette nouvelle branche scientifique. De plus certains gouvernements ont déjà initié des efforts afin d'identifier les besoins en terme d'analyse de risque associées aux nanotechnologies.

Afin d'être en mesure d'identifier les risques associés à une nanoparticule, il faut dans un premier temps en connaître la structure et faire la caractérisation de ses propriétés

chimiques et physiques puis étudier ses mécanismes de dégradation dans l'environnement, les méthodes de détection et d'analyse, son niveau d'exposition humaine et ses effets sur la santé et sur l'environnement.

La diversité et la complexité des nanomatériaux rendent la caractérisation chimique non seulement plus importante mais plus difficile que pour d'autres substances. Les propriétés chimiques suivantes sont une liste de données utiles : composition, structure, poids moléculaire, point de fusion, point de vapeur, pression de vapeur, coefficient de partition octanol-eau, solubilité dans l'eau, activité et stabilité. De plus, l'information sur la fabrication et la formulation sont importantes pour comprendre la pureté, la variabilité, la performance et les usages.

En ce qui a trait aux propriétés physiques, la taille des particules, la distribution, le ratio surface/volume, la forme, les propriétés électroniques, les caractéristiques de la surface, l'état de dispersion/agglomération et la conductivité pourront être importantes afin d'identifier quand et comment les nanoparticules pourront entrer en contact avec l'humain et l'écosystème.

## **2.1 Dégradation dans l'environnement**

L'évolution accélérée de la production de nanomatériaux fait en sorte que les points de dispersion potentiels tout au long du procédé de fabrication et de transformation sont plus nombreux, ce qui entraîne plus de risques d'exposition à ces substances. Il y a à l'heure actuelle peu d'étude sur la dégradation et la dispersion des nanomatériaux dans l'environnement et sur les propriétés fondamentales qui influencent celles-ci.

Dans l'air, plusieurs facteurs déterminent la destinée des particules aéroportées, outre leur dimension initiale et leur caractérisation chimique, celles-ci sont sensibles au temps passé en suspension dans l'air, à la nature des interactions avec d'autres particules et molécules ainsi qu'à la distance parcourue avant leur déposition. Les processus qui sont utiles pour comprendre le potentiel de contamination dans l'air sont la diffusion, l'agglomération, la déposition et la gravité. Ceux-ci pourraient être extrapolés à partir des données bien connues pour les particules ultrafines afin de prédire la dispersion associée aux nanomatériaux. En raison de leurs caractéristiques particulières, les processus de photo-dégradation et d'adsorption des nanomatériaux devront également

faire l'objet d'études pour évaluer leurs interactions avec les autres substances chimiques et l'influence que pourrait avoir celles-ci.

Dans le sol, la dispersion des particules est influencée à la fois par les caractéristiques du sol et les caractéristiques chimiques et physiques des nanoparticules à l'étude. Il se peut également qu'une réaction de transformation se produise à la surface du sol

Dans l'eau, la dispersion des particules est influencée par leur solubilité et la dégradation des particules ainsi que par les processus aérobie et anaérobie de dégradation. Les nanoparticules solubles ont tendance à sédimenter plus lentement que les nanoparticules qui se lient à d'autres composés présents dans l'eau et qui sont alors plus faciles à extraire suite à la sédimentation.

Quoique les mécanismes de dispersion et de dégradation dans l'environnement ne soient pas encore bien connus pour les différents nanomatériaux, une idée globale des risques potentiels peut être donnée en prenant en considération les principes de base énoncés. Déjà des hypothèses sont avancées quand à la biodégradation, la biodisponibilité et la bioaccumulation des nanoparticules dans les cellules vivantes. Les chercheurs évaluent aussi leur potentiel de transformation en produits toxiques et leurs interactions avec les autres contaminants organiques ou inorganiques.

## **2.2 Méthodes de détection et d'analyse**

La détection des nanoparticules représente un défi non seulement en raison de leur taille mais aussi du fait de leur structure physique et de leurs caractéristiques physico-chimiques. Il est aussi important de distinguer les nanoparticules qui sont à l'étude des autres particules ultra fines et des nanoparticules présentes dans l'environnement. A l'heure actuelle, l'information disponible est limitée en raison des facteurs énoncés et les coûts des analyses varient grandement selon les paramètres qui doivent être mesurés. Malgré les défis qui doivent être relevés, des méthodes d'analyse et des technologies démontrent tout de même que la détection des nanoparticules peut être accomplie avec succès.

### **2.3 Exposition humaine et effets sur la santé**

Avec l'utilisation croissante de nanomatériaux, leur présence dans l'environnement augmente et il est justifié de dire que par le fait même l'exposition de l'humain et de l'environnement à ces particules augmente également. La connaissance des sources et des routes d'exposition permet d'identifier les moyens de minimiser l'exposition ou de mitiger les risques. Les populations exposées sont identifiables en fonction des sources de contamination. Comme pour les autres contaminants, les trois routes d'exposition de l'humain aux nanocontaminants dans l'environnement sont, l'inhalation, l'ingestion et la voie cutanée.

L'exposition en milieu de travail est la première source d'exposition. Les personnes appelées à manipuler les nanomatériaux durant les procédés de fabrication et de synthèse des nanomatériaux ainsi que lors de leur utilisation dans divers procédés ou encore lors de leur rejet ou recyclage sont les premiers touchés. Cette source expose l'humain à de grandes quantités de produit, et ce fréquemment; elle demande une attention particulière afin d'évaluer les possibilités de contact avec les gaz, la vapeur, ou les particules en suspension que ce soit par inhalation, voie cutanée ou ingestion. Les principaux moyens de réduire l'exposition aux nanoparticules en milieu de travail sont les mécanismes de contrôle et les équipements de protection personnelle. Les procédés de fabrication des nanomatériaux sont effectués en milieu contrôlés dans une atmosphère filtrée, c'est donc lors des opérations, de transfert, d'emballage et d'expédition que les plus grands risques sont rencontrés.

La population générale peut elle aussi être exposée aux nanoparticules en raison des rejets des processus de fabrication ou lors de l'utilisation de produits contenant des nanomatériaux.

Peu de données sont disponibles permettant d'étudier ou de prédire les effets sur la santé des nanomatériaux de synthèse. Des études approfondies des modèles et données existantes concernant les particules ultrafines et une compréhension approfondie des propriétés physico-chimiques des nanomatériaux permettront de mieux comprendre leur toxicité et leurs similitudes avec ces particules mieux connues.

## **2.4 Effets sur l'environnement**

Comme c'est le cas pour les effets sur la santé, les effets sur l'environnement et les écosystèmes demeurent hypothétiques, puisque très peu de recherche ont été effectuées sur l'écotoxicité et la toxicité potentielle des nanomatériaux. Selon l'Agence de protection de l'environnement américaine, on peut supposer que les nanoparticules, pourraient être bio accumulées en raison de leurs propriétés physico-chimiques et être transmises à travers la chaîne alimentaire. Des études futures sur l'impact des nanoparticules en milieu aquatique, en milieu terrestre et sur leur dispersion à travers la chaîne alimentaires sont nécessaires afin d'en savoir plus sur le sujet.

Il existe d'autres risques secondaires associés à la fabrication et à la consommation de nouveaux produits, par exemple, la peur et le rejet que peut engendrer la nouveauté chez une population et qui peuvent s'avérer néfastes d'un point de vue social. Il est donc essentiel de communiquer l'information disponible, autant sur les risques que sur les bénéfiques et d'être pleinement conscient des impacts potentiels. Avant même qu'une technologie ne soit disponible sur le marché, l'application du principe de précaution veut qu'une réflexion soit amorcée à propos des risques et préoccupations du public qui seront associées à celle-ci. Comme ce fut le cas dans le passé, il semble que la mise en marché l'emporte sur les risques en ce qui a trait à certaines nanotechnologies. Appliquer de facto le principe de précaution et des mesures de mitigation avant d'en connaître d'avantage permettrait possiblement d'éviter une réaction tardive devant un fait accompli.

La section suivante abordera les risques associés aux nanotubes de carbone et illustrera l'écart entre les hypothèses et les données connues. Ce nanomatériau est à la base de nanomembranes qui présentent un grand potentiel en ce qui a trait à la filtration de l'eau et qui sera analysé plus en détail dans les chapitres suivants.

## **2.5 Risques associés aux nanotubes de carbone**

Malgré la portée de cet essai qui traite de l'utilisation spécifique de membranes à base de nanotubes de carbone pour le dessalement de l'eau et en raison du peu d'information spécifique à cette nanotechnologie disponible, cette section abordera les nanotubes de carbone dans une perspective générale. Compte tenu de l'avancement des recherches,

il apparaît important de traiter des risques abordés dans la littérature afin d'orienter l'évaluation comparative qui sera effectuée dans les chapitres suivants. Certains des risques devront être analysés par la suite pour voir s'ils pourraient être rencontrés lors d'une application au dessalement.

Les nanotubes de carbone étant encore au stade de la recherche, plusieurs éléments de risques potentiels sont toujours à l'étude et peu de mesures de risques concrètes existent. L'information présentée dans cette section sera faite au mieux des connaissances disponibles et portera principalement sur les données issues des fiches signalétiques du produit connu sous le nom de graphite synthétique No. CAS 7782-42-5 et sur les revues d'études toxicologiques effectuées par Donaldson *et al.* et Lam *et al.* en 2006.

### **2.5.1 Informations issues de fiches signalétiques**

Les nanotubes de carbone étant apparentés au graphite, le répertoire du système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT) de la commission de la santé et sécurité au travail du Québec classe ceux-ci comme une matière très toxique et réfère à la toxicité du graphite naturel pour en savoir plus. Une seule voie d'absorption est identifiée et il s'agit de l'inhalation. Les effets chroniques qui peuvent être ressentis sont maux de tête, perte d'appétit, dyspnée, expectorations noirâtres, insuffisance respiratoire, emphysème et fibrose pulmonaire. De plus, le produit peut causer des irritations aux yeux. Notons que l'information présentée par cette source semble avoir fait l'objet de peu de mise à jour depuis une dizaine d'années (CSST, 2005).

Par contre, de l'autre côté de l'Atlantique, la fiche signalétique de sécurité sur le graphite synthétique et les nanotubes de carbone publiée par le fabricant belge Nanocyl S.A. est beaucoup plus complète. Elle mentionne qu'il est nécessaire d'appliquer rigoureusement des mesures d'hygiène en milieu de travail pour se prémunir contre les risques que comporte leur produit. Toutes les voies d'exposition sont présentées avec les effets chroniques et aigus associés (Nanocyl, 2006).

Quoique le produit soit réputé non cancérigène, la fiche fait état d'études toxicologiques récentes sur le produit. Elle mentionne entre autre que le résultat préliminaire d'une

étude sur l'inhalation du produit par des rats démontre que celui-ci est potentiellement toxique pour l'être humain même si l'information sur les doses/réponses n'est pas disponible. Fait intéressant la fiche indique les précautions à prendre pour disposer du produit à la fin de sa vie utile et ce même s'il n'est pas dangereux lorsqu'il fait partie intégrante d'un produit fini. Selon ces recommandations, le produit peut donc être enfoui ou incinéré à condition que les poussières soient récupérées lors de l'incinération. Dans le même ordre d'idée, si les nanotubes de carbone se trouvent en solution, l'eau doit être filtrée avant le rejet à l'égout.

À la lumière de ces informations, il apparaît que l'importance associée aux risques potentiels et impacts des nanotubes de carbone varie d'une source à l'autre malgré la fiabilité qu'on pourrait leur accorder. Force est de constater que pour certains les nanotubes de carbone sont encore associés au graphite alors que l'Agence de protection de l'environnement américaine affirme que des études récentes démontrent que le graphite n'est pas une référence adéquate comme standard de sécurité. En effet, lorsqu'il est question des nanotubes de carbone, les doses-réponses mesurées ainsi que les pathologies du poumon rencontrées sont très différentes de celles connues pour le graphite (EPA, 2007).

Les données issues d'études toxicologiques récentes sur les nanotubes de carbone présentées dans la section suivante donneront plus de détails sur les risques et impacts potentiels qui leur sont attribuables d'un point de vue toxicologique.

### **2.5.2 Informations issues d'études toxicologiques**

Les chercheurs ayant effectué des recherches sur les nanotubes de carbone se sont intéressés à ceux-ci en raison de trois de leurs propriétés physiques qui sont généralement associés à la toxicité des particules :

- Il s'agit de nanoparticules et leur taille minuscule pourrait avoir une toxicité plus grande que les particules plus grosses;
- Ce sont de particules fibreuses qui en raison de leur forme d'aiguille pourraient agir comme d'autres fibres toxiques telles que l'amiante;
- Elles sont essentiellement graphitiques ce qui laisse présager de leur biopersistance (Donaldson *et al.*, 2006).

Il y a trois méthodes de synthèse des nanotubes de carbone, l'ablation par arc électrique, le dépôt chimique en phase vapeur et l'ablation par laser (Donaldson *et al.*, 2006). Mais peu importe celle-ci, tous les nanotubes de carbone produits, qu'ils soient monofeuillet ou multifeuillets, contiennent des résidus métalliques. Ces résidus sont des impuretés indésirables qui peuvent être retirées du produit fini par divers procédés lors de la purification (Lam *et al.*, 2006).

Revenons brièvement sur l'exposition humaine et les effets sur la santé et ce spécifiquement pour les nanotubes de carbone. Puisque les caractéristiques de ceux-ci varient selon leur méthode de synthèse et leur pureté, elles influencent les risques d'exposition des travailleurs. De plus, les manipulations nécessaires afin d'incorporer les nanotubes dans un produit fini influencent aussi l'exposition des travailleurs. La disponibilité dans divers produits pourrait, quant à elle, exposer la population en général. En effet, plus leurs applications s'étendront aux produits de consommation, plus il y aura de risques de génération de particules fines et de contamination de l'environnement lors de la détérioration des produits en fin de vie. De plus, lors de leur enfouissement ou incinération, les matériaux et produits contenant des nanotubes de carbone pourraient en libérer dans l'environnement (Lam *et al.*, 2006).

Sachant que les humains sont déjà exposés aux nanotubes de carbone puisqu'ils sont présents dans l'environnement en raison de certaines activités humaines telles que la combustion d'essence, de diesel, de propane et de gaz naturel et que ces nanotubes sont de taille encore plus fine que ceux produits lors de la synthèse en laboratoire, l'inquiétude suscitée par le sort de ces nanomatériaux est-elle justifiée?

La toxicité des nanotubes de carbone faisait l'objet de débats suite aux premières études réalisées sur des souris et des rats. Depuis, il a été démontré qu'ils causent des lésions aux poumons chez les rongeurs testés et ce peu importe leur procédé de synthèse (Lam *et al.*, 2006). Sans entrer dans les détails, ces lésions sont causées par les nanotubes eux-mêmes et peuvent être aggravées par la présence d'impuretés. Les problèmes pulmonaires observés sont des inflammations, des granulomes, de la fibrose et d'autres changements pouvant nuire au bon fonctionnement pulmonaire. Par contre, toutes les études ont été réalisées par administration de nanotubes de carbone

directement via la trachée des cobayes. Il faudra voir si ces particules sont en mesure de rejoindre d'elles-mêmes le système respiratoire par l'inhalation normale. Si cette hypothèse se confirme, il sera possible d'établir des limites d'exposition (Lam *et al.*, 2006).

Peu à peu l'étendue des recherches se diversifie et la publication de résultats portant sur les effets des nanotubes de carbone sur le cœur des souris et sur les cellules de peau humaine valide certaines hypothèses. Cependant, des recherches additionnelles sont nécessaires pour permettre de mieux comprendre les mécanismes régissant les nanotubes de carbone qui causent des effets pervers et ce afin de protéger les populations exposées (Donaldson *et al.*, 2006).

Étant donné qu'un nanotube de carbone peut être produit par différents procédés et que le produit peut avoir des propriétés différentes qui ont des impacts différents (EPA, 2007), cette section a présenté un aperçu des risques associés aux nanotechnologies et aux nanotubes de carbone à partir des informations disponibles au public sur le sujet. Néanmoins, il sera important d'évaluer les risques spécifiques à chacun des produits d'une manière précise afin d'avoir un portrait juste de la situation. Des recherches longues et coûteuses sont donc à prévoir pour mieux comprendre les produits et matériaux issus du domaine des nanotechnologies.

Malgré leur importance et leur caractère parfois dissuasifs, les seuls risques associés aux nanotechnologies ne sont pas suffisants pour effectuer une prise de position ou une prise de décision quand à l'adoption ou non de ces technologies. Au chapitre suivant une liste de critères d'évaluation des procédés de dessalement est élaborée en considérant les différents aspects du développement durable. Celle-ci permettra d'encadrer la réflexion sur les avantages et inconvénients des différentes technologies de dessalement.

### **3 CRITÈRES D'ÉVALUATION ET DE COMPARAISON DES ALTERNATIVES**

Pour en arriver à établir si une technologie innovatrice, comme les membranes à base de nanotubes de carbone appliquée au dessalement de l'eau est une solution viable et représente un intérêt pour la mise en marché, il est utile de la comparer aux autres technologies utilisées dans l'industrie. Des critères de comparaison établis en fonction des principes de développement durable et traitant donc des aspects économiques, environnementaux et sociaux permettront d'obtenir une idée globale des impacts de chacun des procédés analysés. Ce faisant, ils permettront d'établir les avantages et inconvénients de chacune des technologies.

#### **3.1 Aspects économiques**

Lorsqu'il est question d'application à grande échelle d'une technologie et de mise en marché, le critère prédominant dans la prise de décision est le coût. Selon Walha *et al.* (2006), une évaluation des aspects économiques d'une solution devrait, dans le cas d'installation de dessalement de l'eau, tenir compte à la fois des coûts initiaux d'installation mais également des coûts de maintenance et d'opération. La construction de bâtiments, les pompes, la tuyauterie, les membranes et les filtres ainsi que l'accès à une source d'énergie seront tous inclus dans l'investissement initial requis qui est habituellement amorti sur 20 ans. Les coûts de maintenance et d'opération de leur côté représentent tout ce qui a trait au contrôle des conditions d'opération et à la réparation des équipements et matières premières. Ce coût varie entre cinq et dix pour cent du coût initial par année (Walha *et al.*, 2006).

Cependant, c'est l'estimation du coût total pour la durée de vie qui permet de déterminer quelle technologie est la plus avantageuse. Pour ce faire, Borsani et Rebagliati propose de déterminer le coût de l'eau produite en divisant la somme de l'investissement initial, des coûts de maintenance et d'opération et des coûts d'énergie thermique et électrique nécessaire à la production de l'eau par la valeur nette de production actuelle (Borsani et Rebagliati, 2005).

## **3.2 Aspects techniques**

Un des principaux enjeux techniques qui doit être pris en considération est la consommation d'énergie qui varie d'une technologie à l'autre. Certaines solutions de dessalement sont tout simplement inapplicables dans certaines régions en raison de la quantité d'énergie nécessaire à leur opération.

En ce qui a trait aux procédés de filtration par membrane, la perméabilité de celle-ci ainsi que la susceptibilité au colmatage et la dégradation seront évaluées. Le colmatage peut être défini comme l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques se produisant à l'interface membrane-solution ou dans le volume poreux, dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité. Le colmatage d'une membrane peut résulter soit de l'obstruction des pores à l'intérieur même de la membrane, soit de phénomènes d'adsorption, ou encore par un dépôt de matière. (Maurel, 1993)

La dégradation des membranes peut survenir si les conditions d'opération les exposent à des pH ou des substances chimiques qui ne correspondent pas à leur condition d'opération idéale. Ainsi, la qualité de l'eau de mer peut avoir une influence sur la durée de vie de la membrane. Ceci entraîne la nécessité de pré-traitement pour certaines des solutions.

## **3.3 Aspects environnementaux**

Étant donné la multiplication des installations de dessalement dans le monde entier, il est essentiel de tenir compte des impacts environnementaux de celles-ci. Il est entendu que le dessalement de l'eau offre des bénéfices environnementaux variés mais ce procédé s'accompagne aussi d'effets pervers. Ces impacts sur l'environnement peuvent être catégorisés en cinq aspects clés qui sont décrits dans les paragraphes suivants.

### **3.3.1 Utilisation d'énergie**

La consommation d'énergie d'une usine de dessalement est grande et elle a un impact direct sur l'environnement. En effet, quoiqu'elle varie selon le procédé, l'augmentation

de la production d'électricité est nécessaire à l'opération des installations et cela se traduit par des conséquences environnementales (Einav *et al.*, 2002).

### **3.3.2 Impacts sur l'écosystème marin**

La saumure retournée à la mer à la fin du procédé de dessalement engendre des impacts sur l'écosystème marin. Cette solution aqueuse qui provenait à l'origine de la mer a changé de concentration, de température et peut contenir des substances chimiques ayant servi au pré-traitement. Celle-ci peut donc nuire au milieu aquatique entourant l'emplacement du rejet. L'installation de la canalisation peut en soi avoir un impact négatif sur l'environnement. Il y a aussi d'autres activités connexes qui sont également tributaires de rejets par l'usine comme c'est le cas lors de la vidange et du nettoyage du système.

### **3.3.3 Impacts du bruit**

Certaines usines de dessalement utilisent des pompes à haute pression et des turbines qui sont bruyantes. Ces installations devraient donc être situées loin des régions peuplées à moins que des moyens de mitigation ne soient utilisés pour réduire leur niveau sonore. Outre ces 3 aspects environnementaux qui risquent de subir les impacts du dessalement, les deux critères suivants sont décrits à titre indicatif uniquement, ils ne seront pas évalués dans le cadre de cette analyse. Ils deviendront cependant importants à un stade ultérieur de prise de décision.

### **3.3.4 Utilisation du territoire**

Puisque les installations sont situées près des rives et sur le bord de la mer, des sites ayant un potentiel touristique sont utilisés pour des industries et des stations de pompage. La localisation d'une usine ainsi que sa construction ont donc un impact sur l'utilisation du territoire.

Pour cet aspect toutes les technologies se valent car une usine doit être construite dans tous les cas. Ce critère ne sera donc pas évalué mais il devra l'être si lors d'un projet le choix entre deux sites s'impose.

### **3.3.5 Impacts sur l'eau souterraine**

Si une usine de dessalement est éloignée des rives pour minimiser l'impact sur la plage, il est nécessaire de construire des pipelines pour le transport de l'eau de mer et de la saumure. Une fuite peut alors entraîner une pénétration d'eau salée dans la nappe et présenter un danger.

L'eau souterraine est également en danger de contamination lorsqu'il est question de creuser pour installer une station de pompage des eaux saumâtres. Ce critère ne fera pas l'objet de cette analyse des procédés car il n'est pas en lien direct avec ceux-ci mais il devra être considéré lorsqu'il faut choisir entre différents sites d'installation.

### **3.4 Aspect sociaux**

Lorsqu'il est question de faire appel au dessalement de l'eau pour subvenir aux besoins d'une région, il est essentiel de s'assurer que les besoins en eau pourront être comblés, qu'il sera possible de faire fonctionner l'usine grâce à une main d'œuvre compétente et formée et que le projet est accepté par la population. La prise en considération de ces enjeux pourrait faire la différence entre un projet réussi et une installation abandonnée et non fonctionnelle (Wener et Schäfer, 2006).

Il est à noter que si une technologie innovatrice et inexpérimentée est introduite, il y aura forcément de la résistance au changement, c'est une réaction naturelle observée.

De plus un des impacts non intentionnels qui découle de la disponibilité de l'eau que permet le dessalement est l'augmentation de la demande par la population. En effet, lorsque l'eau est disponible, la demande ne cesse d'augmenter et les bénéficiaires utilisent l'eau à divers usages non prévus. Il s'agit en fait d'une nouvelle ressource pour laquelle on ne fait que repousser les limites (Meerganz von Medeazza, 2005). Malheureusement aucune technologie de dessalement aussi puissante soit-elle ne peut répondre à cette problématique de l'offre et de la demande.

Dans la section suivante, l'application de ces critères d'évaluation et de comparaison des technologies de dessalement tentera d'évaluer les avantages, inconvénients,

impacts et risques associés à chacune de celles-ci dans la mesure où l'information est disponible.

### 3.5 Méthodologie et comparaison

Afin de répondre aux questions soulevées précédemment, nous procéderons à la comparaison des technologies de dessalement conventionnelles avec le procédé utilisant une membrane de nanotubes de carbone. Les critères d'évaluation décrits au chapitre précédent seront évalués pour chacun des procédés. Si l'information pertinente n'est pas disponible, une mention sera faite à cet effet. Le Tableau 3.1 présente le gabarit qui sera utilisé pour présenter les impacts associés à chaque procédé analysé.

Tableau 3.1 Gabarit de présentation des impacts par technologie

Aspect	Critères	Description	Évaluation de l'impact
Éc	Coûts initiaux		
	Coûts de maintenance et d'opération		
Technique	Consommation énergétique		
	Capacité de traitement		
	Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile		
Environ	Écosystème marin		
	Bruit		
	Source d'énergie		
	Gestion des résidus		
Sociaux	Réponse au besoin		
	Main d'œuvre		
	Acceptation		
	Santé humaine		

Dans le tableau en question, les critères seront évalués afin de savoir si les technologies évaluées engendrent des impacts positifs, négatifs ou encore si les impacts potentiels sont inconnus ou s'ils ne seront pas évalués. La colonne « Symbole » du Tableau 3.2 présente les valeurs possibles pour la colonne d'évaluation de l'impact tandis que la colonne « Valeur » permettra de quantifier l'impact total associé à un procédé par l'addition des résultats obtenus lors de l'évaluation des impacts.

Tableau 3.2 Échelle de valeur et symboles pour l'évaluation des impacts

Description	Commentaires	Symbole	Valeur
Positif	Aspect dont l'impact est positif	+	2
Négatif	Aspect dont l'impact est négatif	-	-2
Inconnu	Aspect dont l'impact est inconnu	*	-1
Sans objet	Aspect dont l'impact ne sera pas évalué	S/O	0

Il va de soit qu'une valeur positive soit choisie pour un impact positif et que le contraire s'applique pour un impact négatif. Cependant, afin de représenter l'importance de rester sur ses gardes en cas d'incertitude et pour bien illustrer la précaution dont il faut faire preuve devant les risques hypothétiques, une valeur négative a également été donnée pour les impacts dont l'issue réelle est inconnue à l'heure actuelle. Ceci permettra d'avoir un poids associé aux impacts inconnus qui auront été abordés lorsqu'on fait la somme des impacts totaux par procédé. Ceci n'aurait pas été possible si une valeur nulle avait été donnée à l'inconnu comme c'est le cas pour les impacts non évalués. Les résultats auraient alors été faussés parce que les résultats n'auraient pas tenu compte d'un nombre important d'impacts potentiels.

## 4 SURVOL DES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT

### 4.1 Procédés conventionnels

Les usines de dessalement actuellement en service font appel à deux grandes familles de procédés, les procédés thermiques et les procédés membranaires. Le procédé thermique de distillation à détente étagée et le procédé de séparation par membranes appelé osmose inverse sont les plus répandus comme en fait foi le Tableau 4.1.

Plus de la moitié de la capacité de dessalement mondiale se trouve dans les pays du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord qui font partie du Conseil de coopération du Golfe (CCG) soit l'Arabie Saoudite, le Qatar, le Koweït, le Bahreïn, L'Oman et les Émirats Arabes Unis (Abu Arabi, 2003), c'est pourquoi des résultats distincts sont présentés pour cette région.

Tableau 4.1 Répartition mondiale des procédés de dessalement

Procédé	CCG (en %)	Ailleurs (en %)
Distillation à détente étagée	73,5	11,2
Osmose inverse	20,1	60,0
Compression de vapeur	4,0	6,8
Électrodialyse	1,6	14,2
Distillation à multiples effets	0,6	6,1
Autres	0,3	0,7

Tiré de Abu Arabi, 2003.

Le dessalement par électrodialyse occupe lui aussi une place importante dans le classement mondial mais compte tenu que son application est principalement faite en combinaison à l'osmose inverse lorsque l'eau saumâtre circule sous terre (UNEP, 1994) ou pour obtenir de l'eau de procédé et qu'il est moins utilisé pour fournir de l'eau potable aux populations qui le requièrent, il ne sera pas abordé lors de la comparaison des procédés.

Toutes ces méthodes permettent d'obtenir de l'eau dessalée à partir de l'eau de mer (salinité comprise entre 30 et 50 g/L) et de l'eau saumâtre souterraine ou de surface

(salinité comprise entre 1 et 10 g/L). Cette eau dessalée est utilisée pour des besoins domestiques, industriels et agricoles (Aptel, 2006). Selon la salinité de l'eau, l'utilisation des technologies de dessalement varie légèrement; le Tableau 4.2 présente la répartition des deux procédés de dessalement utilisés dans le monde en fonction de l'eau à traiter.

Tableau 4.2 Répartition mondiale des procédés de dessalement utilisés selon la teneur en sel de l'eau brute.

Procédés	Eau Saumâtre	Eau de mer
Distillation à détente étagées	43,5 %	66,3 %,
Osiose inverse	43,5 %	22,4 %
Distillation à effet multiples	en progression à l'échelle mondiale	

Inspiré de Al-Subaie, 2006.

Comme le résume bien Viviane Renaudin dans son article sur « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres » publié en 2003, « quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes : une prise d'eau de mer avec une pompe; un pré-traitement; le procédé de dessalement lui-même; le post-traitement. A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre. » (Renaudin, 2003)

#### 4.1.1 Recherches et applications futures

Puisque le dessalement est une des avenues qui permet de remédier aux problèmes d'approvisionnement en eau douce et potable, des équipes de recherches s'affairent à trouver des procédés toujours plus efficaces et efficients pour ce faire. Certaines de ces recherches prometteuses pourraient remédier au principal problème rencontré lorsqu'il est question de dessalement, le coût prohibitif associé à la production de l'eau. Trois recherches actuelles sont abordées ici très brièvement afin de donner au lecteur un aperçu de ce que réserve l'avenir du dessalement.

Premièrement, une équipe de chercheur de l'université Yale effectue des essais pour permettre d'étendre, à la désalinisation de l'eau de mer, le procédé de dessalement par osiose directe utilisée pour traiter l'eau usée ou le lixiviat de site d'enfouissement. Les

coûts associés à ce procédé détermineront s'il sera possible de l'appliquer à grande échelle avec succès (Patel-Predd, 2006).

Deuxièmement, une technologie innovatrice, le condensateur à flux continu est également à l'étude. Cette technologie fonctionne par adsorption des ions de chlorure de sodium (NaCl) sur des électrodes chargées. Elle permettrait de couper les coûts d'exploitation ainsi que l'énergie consommée et aurait un impact moindre sur l'environnement que la distillation et l'osmose inverse. Des recherches en cours visent à mesurer les bénéfices obtenus lors du remplacement des électrodes de charbon activé par des électrodes faites de nanotubes de carbone (EPA, 2007)

Le troisième procédé à l'étude depuis quelques années vise l'utilisation de nanomembranes composées de nanotubes de carbone de moins de deux nanomètres pour le dessalement de l'eau. Les ouvertures minuscules la composant offrent une perméabilité supérieure que ce qui avait été simulé et modélisé. L'implantation de ce type de membranes dans les installations utilisant le procédé d'osmose inverse est visée afin de réduire significativement les coûts de traitement. Si cela s'avère possible, il s'agirait d'une application des nanotechnologies qui amènerait des bénéfices environnementaux (Holt *et al.*, 2006) et des bénéfices sociaux tangibles.

Seule la troisième technologie est retenue pour l'analyse comparative faisant l'objet de ce document. Elle sera comparée à l'osmose inverse et à la distillation qui sont les procédés de dessalement conventionnels les plus répandus.

## 5 ÉVALUATION DU PROCÉDÉ DE NANOFILTRATION PAR NANOMEMBRANE

Tel qu'abordé au chapitre précédent, une des recherches prometteuses dans le domaine du dessalement et des nanotechnologies traite d'une membrane de filtration à base de nanotubes de carbone créée par une équipe de chercheur du Lawrence Livermore National Laboratory. Cette membrane, dont les pores sont composés de nanotubes de carbone doublefeuilletés de moins de deux nanomètres, était à l'origine développée pour étudier la mécanique des fluides. Selon les résultats obtenus, la perméabilité observée pour cette membrane est supérieure à celle des membranes commerciales de polycarbonate utilisées pour l'osmose inverse et ce même si ses pores sont plus étroits.

Malgré le côté innovateur du procédé, cette section présente un inventaire des risques et des impacts anticipés pour cette technologie de dessalement.

### 5.1 Fabrication, installation et procédé

La vie d'une membrane à base de nanotubes de carbone commence par sa fabrication complexe illustrée ici en quelques étapes. Le procédé débute par la synthèse à haute température des nanotubes de carbone. Celle-ci est réalisée sur un disque de silicone gravé sur lequel est déposée une mince couche d'agrégat bimétallique. La matrice en question est chauffée à très haute température afin d'obtenir des « semences » de nanoparticules d'où la croissance des nanotubes est initiée. Étant donné la densité des « semences », la croissance des nanotubes est alignée verticalement, ils croissent du haut vers le bas. Une fois la croissance terminée, l'étape de fabrication suivante vise le remplissage des minuscules trous entre les nanotubes afin de stabiliser la membrane. Ceci peut être effectué par l'addition de nitrite de silicone ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ou d'un autre composé. Les nanotubes sont ensuite ouverts à leurs deux extrémités. On obtient alors une membrane composée presque exclusivement de nanotubes de carbone (Holt *et al.*, 2006).

A partir de cette description du procédé de fabrication il est possible d'identifier les risques potentiels d'exposition en milieu de travail auxquels feront face les travailleurs. Le Tableau 5.1 présente des sources d'expositions potentielles aux nanotubes de carbone lors de la synthèse de la membrane.

Tableau 5.1 Nanotubes de carbone et risque d'exposition en milieu de travail

Source d'exposition ou étape de fabrication	Formation de particules	Route d'exposition
Chauffage, fuite, émissions de particules fines en suspension dans l'air.	Dans l'air	Inhalation
Ouverture des nanotubes à leurs extrémités	En surface, dans l'air	Inhalation, cutané
Stabilisation de la membrane, manipulation des matières premières	Dans l'air, en surface	Inhalation, cutanée
Préparation, emballage et expédition	En surface	Cutanée, inhalation

Inspiré de EPA, 2007

Dans le processus de synthèse de la membrane, une phase de manipulation mécanique visant l'ouverture des nanotubes à leurs deux extrémités est particulièrement critique puisque celle-ci produira une poussière formée de particules respirables qui augmentera l'exposition des travailleurs.

Advenant la commercialisation de ces membranes, il sera nécessaire de prendre en considération les risques inhérents à la production à plus grande échelle. En effet, certaines usines pourraient ne pas respecter les standards d'hygiène observés dans les laboratoires ce qui pourrait augmenter les risques pour les travailleurs (Lam *et al.*, 2006). Des études plus exhaustives viendront compléter les connaissances actuelles.

Comme ce fut mentionné, le risque d'exposition aux nanotechnologies dépend de la méthode de fabrication, du produit manipulé et de la phase de fabrication. Un problème pourrait par exemple survenir lors de l'incorporation des nanotubes dans un produit plus complexe (Lam *et al.*, 2006). Ceci ne s'applique pas dans ce cas précis car la phase de synthèse des nanotubes de carbone correspond à la création du produit. Il n'y a donc pas d'étape de transformation supplémentaire.

## 5.2 Coût de production, d'utilisation, de disposition

Les nanotubes de carbone sont très intéressants de par leurs propriétés assez exceptionnelles mais leur volume de production est encore faible et le coût demeure élevé pour une utilisation industrielle. En 2003, le prix des nanotubes monofeuillet était de l'ordre de centaines de milliers de dollars la livre selon Richard Smalley (BEARDEN,

2003). Aujourd'hui le prix des nanotubes de carbone monofeuillet varie de 375 \$ US à 2000 \$ US le gramme en fonction de leur degré de pureté (Carbon Nanotechnologies inc., 2006). Ce prix étant celui de la matière première brute en poudre, il est loin d'être aussi élevé que ce que pourrait être celui d'un produit fini tel qu'une membrane de filtration.

Étant donné que la membrane à base de nanotubes de carbone est encore loin de sa mise en marché, elle pourra tout probablement bénéficier de l'avancement des technologies de fabrication des nanotubes de carbone afin que son coût soit plus abordable. En effet, selon Jason Holt, « malgré l'intérêt porté à la commercialisation de cette technologie par des compagnies comme GE et Culligan, il serait optimiste de penser qu'elle soit sur le marché d'ici 5 ans. Un horizon de 10 ans serait plus réaliste » (Holt, 2006).

Étant donné que la membrane de nanofiltration en question n'est pas commercialisée, il est impossible de savoir si des coûts de disposition spécifiques seront appliqués, ceux-ci ne seront donc pas considérés dans cette évaluation.

### **5.3 Enjeux techniques**

Le principal avantage technique de la membrane à base de nanotubes de carbone est sa perméabilité cent fois supérieure aux membranes conventionnelles ce qui pourrait se traduire par une baisse significative des coûts de dessalement. En effet, en considérant l'énergie nécessaire au fonctionnement des pompes produisant la pression nécessaire au traitement et l'énergie utilisée pour amener l'eau à l'usine, l'extrapolation des données obtenues en laboratoire montre que le coût de l'énergie pourrait être réduit de 80 % par rapport à celui nécessaire pour le procédé d'osmose inverse avec une membrane de polymères typique (Holt, 2006). De plus, la quantité d'eau salée ou saumâtre nécessaire à la production de l'eau douce pourrait s'avérer moindre qu'avec l'osmose inverse puisque la membrane serait plus performante.

D'un autre côté, les recherches effectuées sur les nanotubes de carbone multifeuillets ayant un diamètre de quelques nanomètres montrent qu'ils sont sujet au blocage par certaines structures chimiques et par des particules catalytiques qui peuvent s'infiltrer à l'intérieur de ceux-ci. La conséquence de ces blocages est la réduction de la densité des

pores de la membrane. Ce type de blocage n'a pas été observé pour les nanotubes monofeuillet ou double feuillets lors des recherches effectuées à date. A première vue, la membrane étudiée présenterait donc un avantage à ce niveau puisqu'elle semble avoir des propriétés antiblocages, elle ne se colmate pas facilement et peut être rincée avec de l'eau distillée pour retrouver sa perméabilité originale (Holt, 2006).

Par contre, le procédé de fabrication décrit plus haut n'a été utilisé qu'en laboratoire et seulement sur une petite surface de la grosseur d'une pièce de vingt-cinq cents. Le rapport de recherche mentionne que le procédé de synthèse s'appliquerait en théorie aisément à des surfaces plus grandes puisqu'il s'agit d'une technique compatible avec les standards de micro fabrication électromécanique (Holt, 2006). Cependant, aucun essai n'a encore été effectué pour voir s'il serait possible de fabriquer des filtres assez puissants pour satisfaire les besoins des usines de dessalement existantes ce qui constitue un point en défaveur de la membrane filtrante à base de nanotubes de carbone.

Caractéristique essentielle pour le dessalement, la capacité de filtration du sel et du chlore mesurée pour la membrane lors d'un seul passage de l'eau est légèrement inférieure à celles des membranes d'osmose inverse actuelle. Cette filtration s'effectue non seulement par exclusion des particules plus grosses que le pore mais également grâce à la charge de surface des nanotubes. Cependant si la membrane était conçue en spirale ou si plusieurs membranes étaient alignées, un taux d'enlèvement de 90 à 95 % pourrait être atteint (Holt, 2006).

#### **5.4 Vie utile et impact environnemental**

Les rejets de saumure problématiques dans toutes les usines de dessalement ne feraient pas exception avec cette solution et auraient des impacts sur les écosystèmes au même titre que les rejets de procédés d'osmose inverse et de distillation s'ils ne sont pas traités et dilués.

Peu d'études se penchent sur le potentiel de contamination environnementale associé aux nanotubes de carbone et sur leur dispersion dans le milieu qu'il s'agisse de l'air, l'eau ou le sol. L'essentiel des connaissances actuelles a été abordé dans le chapitre traitant des risques associés aux nanotechnologies et ne doit pas être pris à la légère.

Malheureusement aucune étude fiable n'existe encore pour savoir si des nanotubes pourraient être libérés lors de la nanofiltration. On peut toutefois présager que la fabrication des membranes ainsi que leur dégradation et leur rejet à la fin de leur vie utile pourraient entraîner la libération de nanotubes dans l'environnement et par le fait même l'exposition des populations.

Il est encore tôt pour évaluer si les membranes à base de nanotubes de carbone auront une vie utile plus longue qu'une membrane ordinaire ou encore si celles-ci pourront être réutilisées ou recyclées mais ces critères devront être pris en considération lorsque l'expérience le permettra.

### **5.5 Considération sociales et éthiques**

Les applications potentielles des nanotubes de carbone sont indéniables. Cependant, l'information disponible concernant les risques et les impacts demeure incomplète en raison de la nouveauté de ces technologies. Comme le mentionne le principe de précaution : "l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles [...] à un coût économiquement acceptable" (Wikipedia, 2007). Plusieurs recherches posent des hypothèses quant à la toxicité des nanotubes de carbone selon leur nature et leurs usages; celles-ci devront être considérées avant l'adoption de cette technologie et ce malgré tous les bénéfices techniques escomptés. Des coûts additionnels devront être comptabilisés afin de mettre en place des mesures d'hygiène et de contrôle des procédés de fabrication.

Advenant le cas où la membrane de filtration fasse son chemin jusqu'à la commercialisation, une bonne communication s'avèrera essentielle lors de l'adoption de cette technologie innovatrice afin d'obtenir l'acceptation de la population et de désamorcer les réticences. Déjà, malgré l'émergence de ce domaine de recherche, des groupes militent en défaveur des nanotechnologies.

## 5.6 Caractérisation du procédé à base de nanotubes de carbone

Malgré tout le potentiel que possède la nanomembrane de filtration, l'incertitude concernant les risques qui lui sont réellement associés et qui sont encore à l'étude pour les nanotubes de carbone sont des handicaps importants. Des études additionnelles coûteuses seront nécessaires afin de répondre aux nombreuses questions soulevées. Le Tableau 5.2 présente un résumé des enjeux dont il a été question dans les sections précédentes ainsi qu'une évaluation des impacts selon l'échelle de valeur présentée au Tableau 3.2.

Tableau 5.2 Évaluation du procédé par nanomembrane

Aspect	Critères	Description	Évaluation de l'impact
Économi	Coûts initiaux	Utilisation des infrastructures existantes.	+
	Coûts de maintenance et d'opération	Aucune mention que le pré-traitement de l'eau serait éliminé. Indisponibilité, coût prohibitif au stade actuel de recherche.	-
Technique	Consommation énergétique	Pression nécessaire moins élevée que l'osmose inverse	+
	Capacité de traitement	Plus élevée que pour l'osmose inverse car la perméabilité est plus grande	+
	Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile	Facilité de fabrication non prouvée au stade actuel de recherche; Selon les données actuelles, les nanotubes double feuillets sont peu sujets au blocage. Vie utile et dégradation inconnues.	*
Environneme	Écosystème marin	Possibilité de rejet de nanotubes si la membrane se détériore.	-
	Bruit	Idem aux autres alternatives	-
	Source d'énergie	Moins grande consommation d'énergie	+
	Gestion des résidus	Devra tenir compte de la libération potentielle dans l'environnement	*
Sociaux	Réponse au besoin	Atteinte d'un niveau de dessalement incertain	*
	Main d'œuvre	Exposition des travailleurs	-
	Acceptation	Déjà il existe des mouvements anti nanotechnologie, la communication sera importante.	-
	Santé humaine	La recherche sur la toxicité des nanotubes de carbone identifie certains problèmes sur les rongeurs. L'application du principe de précaution sera essentielle.	-

Légende : + Impact Positif; - Impact Négatif, \* Impact Inconnu, S/O non évalué

## **6 ÉVALUATION DU PROCÉDÉ PAR OSMOSE INVERSE**

L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau contenant des matières en solution par un système de filtrage très fin qui ne laisse passer que les molécules d'eau. Il permet de filtrer toutes les particules dissoutes ou en suspension dans l'eau et peut être utilisé pour le dessalement de l'eau de mer. L'eau brute pré-épurée est poussée à haute pression au travers d'une membrane semi-perméable. Il en résulte d'une part un flux d'eau avec une très faible concentration en sel et d'autre part un flux rejeté à haute teneur en sel, appelé saumure.

### **6.1 Fabrication, installation et procédé**

L'osmose inverse est utilisée pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Il s'agit du procédé nécessitant la plus basse mise de fond et les coûts d'opération les plus faibles puisque sa consommation d'énergie est plus basse, sa construction plus facile et le procédé plus simple que la distillation. (Al-Subaie, 2006)

Tel que mentionné plus tôt c'est un procédé largement répandu qui est par le fait même bien connu, étudié et maîtrisé ce qui élimine une partie de l'incertitude liée à sa mise en place et son opération.

#### **6.1.1 Coût de production, d'utilisation, de disposition**

Quoique la quantité d'énergie nécessaire soit inférieure à ce qui est requis pour la distillation (Fritzmann *et al.*, 2006), elle demeure importante étant donné qu'il faut appliquer à l'eau salée une pression suffisante pour la faire passer à travers une membrane semi-perméable afin de recueillir l'eau potable de l'autre côté. La principale dépense de production lors de l'utilisation de ce procédé est donc associée à l'énergie nécessaire pour son opération.

Selon la qualité de l'eau qui entre dans le procédé, une autre dépense importante est associée aux systèmes de pré-traitements (Al-Subaie, 2006). En effet, l'osmose inverse nécessite de traiter l'eau de mer en la filtrant et en la désinfectant afin de la débarrasser des éléments en suspension et des micro-organismes qu'elle contient avant de procéder à sa filtration. Le pré-traitement variera en fonction de la turbidité de l'eau et de la

quantité d'algues présentes et de solides dissous. Ainsi, la source d'approvisionnement en eau qui peut avoir une influence importante sur ces facteurs devra être sélectionnée en conséquence. En effet, un approvisionnement à partir d'un puits réduit de beaucoup la problématique de turbidité comparé à une prise d'eau directement en mer.

Des coûts importants sont aussi liés à l'achat des membranes de polymères semi-perméables qui ont une durée de vie limitée. Quoique moindres que les deux dépenses décrites précédemment, ils doivent tout de même être considérés puisqu'ils sont récurrents et qu'ils peuvent fluctuer en raison du marché ou de la technologie sélectionnée.

### **6.1.2 Enjeux techniques**

Le principal problème rencontré lors de l'utilisation de l'osmose inverse est le colmatage des membranes. Les membranes d'osmose arrêtent toutes les matières en suspension. Il en résulte un colmatage rapide, qui les rend impropres à l'usage. Pour conserver l'efficacité de celles-ci, il est indispensable de rendre l'eau de mer aussi limpide que possible avant leur utilisation.

Le pré-traitement constitue donc un point critique pour ce procédé puisqu'une eau de mauvaise qualité réduit la durée de vie des membranes et augmente les coûts de fonctionnement (Danis, 2003). Cependant tous les matériaux utilisés pour la fabrication des membranes ont une tolérance limitée aux oxydants tels que le chlore et l'ozone utilisés lors du pré-traitement. Il est donc nécessaire d'éliminer ceux-ci avant le dessalement (Fritzmann *et al.*, 2006), ce qui complique le procédé.

De plus, les membranes sont sujettes à la dégradation chimique par les ions chlorures et lors de l'atteinte de valeur de pH limite. Selon le matériel utilisé, acétate de cellulose, polycarbonate ou autre matériau composite, la résistance de la membrane aux variations de pH, à la dégradation bactérienne ou chimique ainsi que la perméabilité varie. A titre indicatif, la durée de vie d'une membrane d'acétate de cellulose passe de 5 ans à quelques jours selon le pH (Fritzmann *et al.*, 2006).

En ce qui à trait à la consommation d'eau du procédé, il est estimé que 2 m<sup>3</sup> d'eau sont nécessaires pour produire 1m<sup>3</sup> d'eau de consommation par osmose inverse. Il s'agit donc d'une solution qui consomme moins d'eau que la distillation (Holt, 2006).

### **6.1.3 Vie utile et impact environnemental**

Comme pour les autres technologies de dessalement, le rejet d'eau et la consommation d'énergie constituent les principaux impacts environnementaux. La nature de l'eau rejetée varie selon l'étape de traitement correspondant à sa provenance. Ainsi, l'eau rejetée suite au pré-traitement lors du nettoyage des unités de filtration a une haute teneur de matières en suspension biologique, organique et minérale tandis que l'eau de rinçage du procédé a une salinité et une acidité plus grande et que l'eau provenant du nettoyage des membranes est alcaline ou acide avec une grande charge de matières en suspension. C'est sans compter les rejets d'eaux saumâtres suite au dessalement qui ont elles aussi une très grande salinité comparée au milieu récepteur (Mauguin et Corsin, 2005).

De plus, les usines d'osmose inverse utilisent des pompes à haute pression et des turbines qui sont bruyantes et qui contribuent à la pollution sonore (Einav *et al.*, 2002). D'un autre point de vue, les membranes de filtration ont une durée de vie limitée et il faut prendre en considération que celles-ci deviennent des déchets à la fin de leur vie utile.

### **6.1.4 Considérations sociales et éthiques, application du principe de précaution**

L'osmose inverse est une technologie connue et déjà utilisée par de nombreuses installations de dessalement ce qui facilite son acceptation lorsque le besoin de recourir au dessalement est justifié.

### **6.1.5 Caractérisation du procédé d'osmose inverse**

L'osmose inverse présente les avantages suivants par rapport à la distillation: faible consommation énergétique, coût d'investissement plus faible, gamme étendue de capacités allant jusqu'à la production de plus de 100 000 m<sup>3</sup> d'eau par jour, salinité de l'eau produite qui convient bien aux usages domestiques (Aptel, 2006). Le Tableau 6.1 présente l'évaluation des impacts associés à ce procédé.

Tableau 6.1 Procédé d'osmose inverse

Aspect	Critère	Description	Évaluation de l'impact
Écono	Coûts initiaux	Moindre que distillation	+
	Coûts de maintenance et d'opération	Nécessite un pré-traitement	-
Technique	Consommation énergétique	Moindre que pour la distillation	+
	Capacité de traitement	Le procédé consomme moins d'eau de mer que la distillation pour produire la même quantité d'eau potable.	+
	Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile	Susceptible au colmatage et à la dégradation	-
Environnement	Écosystème marin	Les produits chimiques utilisés lors du pré-traitement peuvent contaminer le rejet.	-
	Bruit	Utilisation de turbines et de pompes à haute pression bruyantes.	-
	Source d'énergie	Consommation moindre	+
	Gestion des résidus	Les membranes ont une courte durée de vie et constituent des déchets.	-
Sociaux	Réponse au besoin	Possibilité d'usine à grande capacité.	+
	Main d'œuvre	Procédé répandu et bien connu	+
	Acceptation	Procédé le plus populaire	+
	Santé humaine	Eau produite convient bien aux usages domestiques	+

Légende : + Impact Positif; - Impact Négatif, \* Impact Inconnu, S/O non évalué

## **7 ÉVALUATION DU PROCÉDÉ PAR DISTILLATION**

La distillation consiste à faire évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur des rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable.

L'inconvénient majeur de ces systèmes est qu'ils sont très coûteux. Les installations sont peu rentables parce que les quantités d'énergie nécessaires au chauffage ou à la compression de l'eau sont très élevées, et les volumes d'eau produits faibles. L'utilisation de cette technique de production d'eau potable reste donc encore très marginale.

Cette technologie de dessalement est principalement utilisée au Moyen Orient (Al-Subaie, 2006) ou des pays suffisamment riches, comme le Koweït et l'Arabie Saoudite, l'utilisent pour produire de l'eau douce destinée à la consommation humaine. Les deux procédés de dessalement thermiques sont décrits dans les paragraphes suivants.

### **7.1 Distillation à détente étagées**

Cette technologie de dessalement est fondée sur un principe simple : la reproduction du cycle naturel de l'eau. Ainsi, dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Pendant qu'une pompe évacue les gaz incondensables, un groupe de pompes soutire l'eau condensée et un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure (Danis, 2003). Il faut approximativement un kilogramme de vapeur pour produire un kilogramme d'eau. La quantité d'énergie thermique devient donc gigantesque dès qu'il s'agit de répondre aux besoins de la population d'une ville (Danis, 2003).

### **7.2 Distillation multi-effets**

Une installation de distillation à effets multiples est constituée par la juxtaposition de cellules fonctionnant selon le principe de la distillation à effet simple. Le fluide de

réchauffage porte à ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, qui est aussi la cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine, où on maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise l'eau de mer présente dans la deuxième cellule. C'est le deuxième effet. On peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois, la limite basse étant donnée par la température de l'eau de mer froide. Dans ce procédé, la consommation d'énergie est approximativement celle de la distillation simple divisée par le nombre d'effets (Danis, 2003).

### **7.2.1 Coût de production, d'utilisation, de disposition**

Comme le rapporte Borsani et Rebagliati, « Le coût d'une installation de distillation a diminué de 50% au cours des vingt dernières années et ce malgré l'augmentation du coût des matières premières et de la main d'œuvre ». Ceci s'explique entre autre par la présence de technologies alternatives sur le marché, par l'optimisation technique du procédé et par l'ajustement des spécifications. Même s'il demeure plus élevé que pour l'osmose inverse, l'investissement initial pour la distillation peut-être intéressant en raison de la fiabilité des installations, de la performance du procédé et des coûts récurrents plus faibles (Borsani et Rebagliati, 2005).

### **7.2.2 Enjeux techniques**

Le procédé de dessalement par distillation présente certains avantages en particulier pour les eaux très salines puisque sa performance et ses coûts sont indépendants de la salinité (Aptel, 2006). Un autre des avantages de la distillation est que contrairement à l'osmose inverse, son efficacité ne dépend pas de la qualité de l'eau qui entre dans le procédé. De plus la distillation produit une eau contenant peu de solides dissous totaux ce qui est intéressant pour les industries ayant recours à l'eau dans leur procédé. (Al-Subaie, 2007, Aptel, 2006). Par contre, en raison de sa très grande consommation, toute usine de dessalement par distillation doit être couplée à une source d'énergie importante (Borsani et Rebagliati, 2005).

Les autres problématiques dont il a été question dans le chapitre sur l'osmose inverse telles que le colmatage et la dégradation des membranes ne posent pas problème dans ce cas puisque la distillation n'utilise pas de membranes. De plus, il s'agit d'un procédé

beaucoup moins sensible aux matières en suspension qui ne requiert qu'une filtration grossière telle un dégrillage pour la protection des pompes et des échangeurs (Aptel, 2006).

### **7.2.3 Vie utile et impact environnemental**

Outre l'augmentation de la salinité, de la turbidité et la création de courants d'eau non naturels associés aux rejets d'une usine de dessalement, un des effets pervers est la pollution thermique qui résulte de la distillation à détente étagée. La température de l'eau rejetée étant plus élevée à la sortie du procédé, elle modifie l'environnement marin en augmentant la température de l'écosystème (Al-Mutaz, 1991).

De plus, dans ce procédé, de grandes quantités de carburant sont consommées pour effectuer le dessalement. Lors de leur combustion, ceux-ci rejettent des polluants dans l'air tels que le monoxyde de carbone et des hydrocarbures (Al-Mutaz, 1991). Par contre, contrairement à l'osmose inverse, ce procédé est moins bruyant et il n'utilise pas de membranes. Il produit donc moins de déchets.

### **7.2.4 Considération sociales et éthiques, application du principe de précaution**

La distillation fait simplement appel à un changement d'état de l'eau qu'on retrouve tel quel dans la nature, le procédé théorique est donc acceptable d'emblée. Malheureusement, la consommation d'énergie élevée qui lui est associée suscite le questionnement et l'opposition de certains groupes.

Son utilisation populaire dans les pays producteurs de pétrole est associée à la création de besoins sans cesse grandissants associés à la croissance de certaines industries. Loin de répondre au simple besoin de la population, la production d'eau repousse les limites de ce qui est envisageable comme développement dans la région du Moyen-Orient.

### **7.2.5 Caractérisation du processus de distillation**

Une usine de dessalement faisant appel à la distillation est plus coûteuse initialement et demande une plus grande quantité d'énergie qu'une installation d'osmose inverse. Cependant puisqu'il ne requiert pas de pré-traitement complexe ou de membrane, le

procédé est moins compliqué et produit moins de rejets tangibles. Le Tableau 7.1 présente l'évaluation des impacts associés au dessalement par distillation.

Tableau 7.1 Procédé de distillation

Aspect	Critère	Description	Évaluation l'impact
Économique	Coûts initiaux	Les coûts de démarrage sont plus élevés que pour l'osmose inverse.	-
	Coûts de maintenance et d'opération	Procédé très fiable et sans membrane.	+
Technique	Consommation énergétique	Très élevée due à la nécessité de chauffer l'eau pour l'évaporation.	-
	Capacité de traitement		+
	Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile	Non évaluée puisqu'il s'agit d'un procédé thermique.	S/O
Environnement	Écosystème marin	Rejet d'eau ayant une température plus élevée que le milieu récepteur.	-
	Bruit	Ne nécessite pas l'utilisation de pompe à haute pression et de turbine, il est donc moins bruyant.	+
	Source d'énergie	Très énergivore	-
	Gestion des résidus	Aucune membrane donc moins de déchets produits.	+
Sociaux	Réponse au besoin	Possibilité d'usine à grande capacité.	+
	Main d'œuvre	Procédé répandu et bien connu	+
	Acceptation	Procédé populaire et accepté	+
	Santé humaine	La production d'énergie pollue et a un impact sur la santé	-

Légende : + Impact Positif; - Impact Négatif, \* Impact Inconnu, S/O non évalué

## 8 COMPARAISON DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES

Selon le 19<sup>e</sup> inventaire des usines de dessalement réalisée par l'Association internationale de dessalement (IDA), il existe plus de 12 300 projets d'usine de dessalement ayant chacune une capacité de plus de 100 mètres cube par jour. La capacité totale de dessalement à l'échelle planétaire est de plus de 47 millions de mètres cube quotidiennement. Une estimation du rythme de croissance de la demande faite à partir de données de 2001 à 2005 établit celui-ci aux environs de 25 % par année (GWI, 2006). Le dessalement est donc une source d'eau potable bien établie et en croissance mais qu'en est-il des technologies permettant ce tour de force? Est-ce que les bénéfices engendrés sont supérieurs aux impacts qu'entraînent les procédés? Les données disponibles permettent-elles de dire quel procédé constitue le meilleur choix?

La distillation a la faveur des pays producteurs de pétrole en raison de l'accessibilité de l'énergie mais cette solution amène son lot de désavantages au point de vue environnemental étant donnée la pollution associée à la production de l'énergie requise.

A l'opposé, au titre de la consommation d'énergie, l'osmose inverse est un procédé plus efficient mais ce type de filtration membranaire rencontre toute une série d'enjeux techniques. Les principales limitations des membranes utilisées à l'heure actuelle étant leur faible perméabilité, leur besoin élevé d'énergie, leur blocage et la nécessité d'un pré-traitement ainsi que leur dégradation par le chlore et leur décomposition en milieu acide (Holt, 2006). Une équipe de recherche semble avoir trouvé un moyen de remédier en partie à ces inconvénients en remplaçant les membranes conventionnelles par des nanomembranes offrant une meilleure perméabilité et une résistance plus grande au colmatage.

Cependant il est encore tôt pour savoir si cette membrane à base de nanotubes de carbone doublefeuilles constitue une alternative technique intéressante et si elle possède réellement les attributs nécessaires à sa commercialisation.

Le Tableau 8.1 présente les résultats de l'évaluation des alternatives dont il a été question aux chapitres précédents. Dans celui-ci, les impacts positifs, négatifs, inconnus ou incertains ont été associés aux valeurs correspondantes établies dans le Tableau

3.2. Suite à cela, les sous-totaux par aspect ont été calculés avant de faire la somme pour l'ensemble des critères pour chaque alternative comparée.

Étant donné que des poids positifs sont associés aux impacts positifs et que des poids négatifs sont associés aux impacts négatifs ou inconnus, le Tableau 8.1 permet de voir en un coup d'œil quelle technologie comporte le plus d'impacts positifs par aspect en regardant les rangées « Sous-totaux » et dans son ensemble en consultant la rangée « Totaux ».

Tableau 8.1 Présentation des résultats comparatifs et des totaux.

Aspect	Critères	Nanotubes de carbone	Osmose inverse	Distillation
Éc	Coûts initiaux	2	2	-2
	Coûts de maintenance/d'opération	-2	-2	2
	<b>Sous totaux – économique</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Technique	Consommation énergétique	2	2	-2
	Capacité de traitement	2	2	2
	Membrane : fabrication, perméabilité, colmatage, dégradation, vie utile	-1	-2	0
	<b>Sous-totaux – technique</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>0</b>
Environ	Écosystème marin	-2	-2	-2
	Bruit	-2	-2	2
	Source d'énergie	2	2	-2
	Gestion des résidus	-1	-2	2
	<b>Sous-totaux - environnement</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	<b>0</b>
Sociaux	Réponse au besoin	-1	2	2
	Main d'œuvre	-2	2	2
	Acceptation	-2	2	2
	Santé humaine	-2	2	-2
	<b>Sous-totaux – Sociaux</b>	<b>-7</b>	<b>8</b>	<b>4</b>
	<b>Totaux</b>	<b>-7</b>	<b>6</b>	<b>4</b>

Les résultats obtenus pour chacun des aspects évalués sont abordés dans les paragraphes suivants. Il sera par la suite question des résultats totaux.

## **8.1 Aspects économiques**

À première vue, du point de vue des coûts, aucune des technologies retenues pour l'étude ne démontre un avantage particulier. Si l'investissement initial est moindre, les coûts d'entretien et de fonctionnement sont plus élevés par la suite et vice versa.

Par contre l'énergie nécessaire au procédé de distillation a un coût élevé et il se doit d'être considéré dans le calcul du coût de production de l'eau. Pour un projet où, techniquement, l'osmose inverse et la distillation sont des alternatives, l'osmose inverse est environ 15% moins chère (Borsani et Rebagliati, 2005).

En ce qui a trait au procédé de dessalement utilisant la nanomembrane faite de nanotubes de carbone, les coûts ont été considérés identiques à ceux d'une usine d'osmose inverse. Ces membranes étant considérées pour remplacer les membranes actuelles le procédé quoique légèrement modifié ferait, selon les hypothèses actuellement proposées, appel aux mêmes installations.

## **8.2 Aspects techniques**

En ce qui a trait aux enjeux techniques, la distillation est largement désavantagée en raison de sa consommation d'électricité très élevée. Par contre, ce procédé ne nécessite pas de membranes, il n'y a donc pas de risque de dégradation ou de colmatage dans les installations. Quel que soit le procédé évalué, ils ont tous techniquement une capacité de traitement variable capable d'être étendue selon les besoins.

Le procédé utilisant une nanomembrane vise l'utilisation de membranes plus perméables et moins sujettes au colmatage. Il nécessiterait par le fait même une plus faible quantité d'énergie. Il se retrouve donc avec une légère avance sur le procédé d'osmose inverse traditionnelle et loin devant la distillation d'un point de vue des enjeux techniques.

## **8.3 Aspects environnementaux**

Comme il fut mentionné dans les chapitres précédents, les procédés de dessalement sont associés au rejet d'une saumure très saline ainsi qu'à d'autres rejets d'effluents provenant du pré-traitement de l'eau brute ou de la vidange des systèmes. Dans le cas

des procédés thermiques de dessalement, une élévation de la température est également notée (Al-Mutaz, 1991). Ils ont donc tous leur lot d'impacts négatifs sur l'environnement mais les critères évalués avantagent le procédé de distillation puisqu'il génère moins de pollution sonore et de résidus.

Pourtant, dans un article publié en 2005, Meerganz Von Medeazza fait remarqué que « les émissions atmosphériques et l'impact environnemental associés à l'osmose inverse est d'une unité de grandeur moindre que celles correspondant à la distillation à détente étagée ou à la distillation à multiples effets » (Meerganz Von Medeazza, 2005).

#### **8.4 Aspects sociaux**

Loin derrière les deux autres procédés en ce qui a trait aux aspects sociaux, le procédé issu des nanotechnologies rencontre un lot d'incertitudes. En effet, les nanotechnologies suscitent déjà un ensemble de réticences puisqu'il n'est pas prouvé qu'elles soient sans risque. Si les résultats sur la toxicité des nanotubes de carbone telle qu'étudiée sur les rongeurs sont transposés sur les humains, leur fabrication, leur utilisation et leur dispersion pourrait avoir des impacts importants sur la santé humaine.

#### **8.5 A propos des résultats finaux**

Malgré le lot d'impacts négatifs associés aux procédés de dessalement répandus, le recours à ces solutions est en croissance constante mondialement. Les impacts négatifs de ceux-ci ne sont pas assez importants pour justifier de ne pas répondre aux besoins en eau potable. Il n'existe en effet que peu d'alternatives pour la production d'eau potable en quantité suffisante afin de satisfaire les populations.

Actuellement, lorsqu'un projet d'usine de dessalement est à l'étude, on fait très souvent le choix entre l'osmose inverse et la distillation car elles ont fait leurs preuves et ont chacune leurs forces et leurs faiblesses. La teneur en sel de l'eau, sa qualité et la disponibilité de l'énergie seront des facteurs déterminants pour la sélection du procédé. Étant donné que le dessalement continuera d'être une solution aux besoins en eau, existe-t-il des moyens de réduire les impacts engendrés? Est-ce que la nanomembrane à base de nanotubes de carbone est intéressante lorsqu'elle est comparée aux technologies actuelles?

Avec les résultats obtenus dans cette étude comparative, la nanomembrane à base de nanotubes de carbone est loin derrière et ne se démarque pas comme il aurait été possible de le penser à la lecture des résultats de recherches publiés. Comment se fait-il que malgré des caractéristiques étonnantes d'un point de vue technique, celle-ci n'arrive pas à la cheville des autres procédés?

## **8.6 Nanomembrane et dessalement**

Lorsque son utilisation est évaluée dans une perspective globale, il est évident que rien n'est gagné pour cette nanotechnologie. Sur quels critères la nanomembrane doit-elle progresser pour être en mesure de rivaliser avec ces deux autres technologies évaluées et qui ont déjà une réputation enviable?

Les bénéfices techniques qui sont attendus à l'heure actuelle n'ont pas encore été mesurés avec certitudes et il est encore trop tôt pour savoir si la technologie pourra être reproduite sur une plus grande échelle. Les bénéfices techniques anticipés devront donc être prouvés hors de tout doute avant que ces nouvelles membranes soient commercialisées pour le dessalement de l'eau.

Toutefois, ce ne sera pas la seule étape à franchir, il faudra également prouver par des études toxicologiques que les impacts sur l'environnement et la santé humaine seront acceptables en contrepartie des bénéfices qu'on retire du produit.

En fait, il faudra attendre que l'incertitude entourant cette nouvelle technologie soit éliminée et que les données manquantes soient disponibles pour être en mesure de décider si la membrane issue des nanotechnologies aura une place dans les installations de dessalement. C'est donc dire qu'il est encore trop tôt pour prendre une décision à ce sujet. Il n'est cependant pas trop tôt pour réfléchir à ce qui devra être évalué et aux données manquantes qui devront être obtenues.

De plus, l'ensemble du cycle de vie de la technologie en passant de la fabrication des membranes jusqu'à leur rejet devrait être considéré afin d'augmenter la valeur de cette analyse. Cependant, le manque de données disponibles compte tenu du caractère novateur du produit a limité l'analyse de cet aspect.

En attendant, il est toujours temps d'identifier des moyens de réduire les principaux impacts des technologies conventionnelles.

## **8.7 Mesures d'atténuations**

Il existe plusieurs pistes de solution afin de répondre aux principaux enjeux négatifs du dessalement. Malheureusement, les coûts d'investissement initiaux et ceux d'opération demeureront importants étant donné l'étendue des installations nécessaires pour produire une quantité suffisante d'eau pour répondre aux besoins de la population.

Une solution très simple pour minimiser à long terme les impacts du dessalement est d'éviter le gaspillage. La mise en place de mesures de conservation afin d'éviter que la consommation ne croisse à un rythme supérieur à la disponibilité s'avère donc importante.

D'un point de vue technique, les sections suivantes présentent des pistes de solution permettant de réduire la consommation d'énergie et les rejets de saumure qui affectent particulièrement l'environnement et l'écosystème.

### **8.7.1 Besoins énergétiques**

L'impact associé à la consommation d'énergie nécessaire pourrait, dans un premier temps, être réduit en minimisant le recours aux combustibles fossiles pour produire de l'énergie.

La première option serait de remplacer l'énergie produite par combustion par une source d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne. On voit des progrès importants dans la production d'énergie en provenance de ces deux sources depuis quelques années. Des bénéfices intéressants sont mesurés dans les projets les intégrant. Étant donné les périodes d'ensoleillement au Moyen-Orient, cette piste de solution devrait être regardée avec attention car elle permettrait de minimiser l'impact environnemental du dessalement en minimisant la pollution de l'air associée à la combustion. Selon Meerganz Von Medeazza, "l'impact environnemental est très variable selon la source d'énergie. Il est possible de réduire de 80 à 85 % l'impact sur

l'environnement lorsque le procédé de distillation est jumelé à une source d'énergie renouvelable » (Meerganz Von Medeazza, 2005).

Une autre option est proposée par l'agence internationale de l'énergie nucléaire qui prône le dessalement nucléaire. Il s'agit de la production d'eau potable à partir d'eau de mer dans une installation utilisant, comme source d'énergie un réacteur nucléaire (Konishi et Misra, 2001). Ce procédé limiterait le recours aux combustibles fossiles tout en permettant la cogénération d'électricité et d'eau potable. Peut-être est-ce là une solution intéressante mais une réflexion plus poussée est nécessaire afin d'évaluer, comme pour les nanomembranes de nanotubes de carbone, l'acceptation de la population puisque les débats que suscite le nucléaire sont nombreux.

### **8.7.2 Rejets de saumure**

Dans un tout autre ordre d'idée, il est nécessaire de s'assurer de la qualité de l'eau rejetée et de sa concentration en sel, l'utilisation d'étangs d'évaporation et bassins d'entreposage permet de minimiser l'impact du rejet de saumure sur l'environnement. Une autre optique proposée par Ahrned est de changer la perception pour considérer cette saumure comme ressource saline plutôt que comme rejet problématique (Ahrned *et al.*, 2002). Dans le cadre d'un projet nommé « Option for Productive use of Salinity (OPUS) » réalisé par le gouvernement d'Australie de 1998 à 2001, plusieurs opportunités d'utilisation du sel ont été identifiées. Celles-ci sont répertoriées dans une base de données accessible par Internet (LWA, 2001). En passant par l'irrigation de cultures d'espèces résistantes au sel, l'utilisation pour l'aquaculture en eau salée et la production de minéraux, les débouchés sont diversifiés.

Si on ne s'attarde qu'à la production de minéraux à partir de la saumure, une étude d'opportunité réalisée en 2002 a confirmé la faisabilité technique d'un procédé de transformation appelé SAL-PROC™ (<http://www.geoprocessors.com/salproc.html>) dans quatre installations de dessalement par osmose inverse. Cette étude souligne que plusieurs produits de haute qualité qui sont utilisés dans diverses industries peuvent être produits à partir de la saumure. Des sels tels que le gypse, le chlorure de sodium, l'hydroxyde de magnésium, le chlorure de calcium font partie de la liste de ressources produites à partir de cet effluent problématique (Ahrned, 2002).

## CONCLUSION

Les nanotechnologies ont été propulsées par la recherche au centre des intérêts scientifiques. Les perspectives offertes par ce domaine de recherches sont multiples et des bénéfices importants leur sont associés. Les nanotubes de carbone démontrent un grand potentiel d'application. Une nanomembrane à base de nanotubes de carbone a d'ailleurs été mise au point par une équipe de chercheurs. Celle-ci permettrait le dessalement de l'eau de mer d'une manière plus efficace et pourrait en réduire le coût. Comme pour bien des nouvelles technologies, l'emphase des chercheurs est mise sur les bénéfices techniques mais ceux-ci sont moins importants lorsque les risques associés aux nanotechnologies sont pris en considération.

Réalisée d'un point de vue théorique par la consultation de littérature et de publications traitant des sujets abordés, la présente analyse a permis la comparaison des procédés de dessalements conventionnels avec cette nouvelle technologie. Les résultats obtenus montrent que l'information disponible n'est pas suffisante pour établir clairement l'ampleur des impacts associés à la nanotechnologie en question. En effet, les études, réalisées à ce jour, démontrent une toxicité potentielle des nanotubes de carbone et l'application du principe de précaution est de mise. Il faudra donc attendre encore quelques années avant la clarification des incertitudes entourant la nanomembrane évaluée et sa mise en marché.

Le principal bénéfice du dessalement étant de multiplier l'accès à l'eau potable de qualité, sa popularité demeurera toutefois en croissance à l'échelle planétaire. Puisqu'aucune technologie innovatrice n'est encore assez mature pour remplacer les procédés conventionnels le recours à des moyens d'atténuation des impacts environnementaux de ceux-ci s'impose. Pour ce faire, la planification de nouvelles installations de dessalement devrait être réalisée judicieusement en maximisant le recours aux énergies renouvelables et la valorisation de la saumure extraite du procédé. Ces principes devraient également être appliqués lors de la mise à niveau des usines existantes afin d'améliorer leurs performances environnementales. En procédant ainsi, l'industrie du dessalement fera peu à peu des pas vers le dessalement durable.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- ABU ARABI, M (2003), Desalination Growth in the MENA Region, MEDRC, <http://www.medrc.org/watermark/watermark20/default.htm>.
- AHRNED, M., ARAKELB, AI-O., HOEY, D., THUMARUKUDYD, M.R., GOOSEN, M. F.A., AL-HADDABI, M, AL-BELUSHI, A. (2002), Feasibility of salt production Corn inland RO desalination plant reject brine: a case study, *Desalination* 158 (2003), p. 109-117.
- AL-MUTAZ, I.S. (1991), Environmental Impact of seawater desalination, *Environmental Monitoring and Assessment*, Volume 16 Numéro 1 (1991) pp. 75-84.
- AL-SUBAIE, K.Z. (2006). Precise way to select a desalination technology, *Desalination*, Volume 206 (2007), p. 29–35.
- APTEL, P. (2006). Filtration membranaire (OI, NF, UF) application en traitement des eaux, *Techniques de l'ingénieur*, Toulouse, 12 p.
- AUDINOS, R (2000.), Membranes semi-perméables, membranes de nanofiltration, *Techniques de l'ingénieur*, Toulouse, 9 p.
- BEARDEN, T. (2003). Interview du Prix Nobel Dr. Richard Smalley, Public Broadcasting System, <http://www.pbs.org/newshour/science/hydrogen/smalley.html>, Consulté le 2 mai 2007.
- BORSANI, R., REBAGLIATI, S. (2005), Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, *Desalination* 182 (2005), p. 29-37.
- BRUNS, B. (2004). Conference : Applying nanotechnology to the challenges of global poverty : strategies to accessible abundance. Washington, Octobre 2004, 12 p.
- CARBON NANOTECHNOLOGIES INC (CNI) (2006). Online store. [http://www.cnanotech.com/pages/store/6-0\\_online\\_store.html](http://www.cnanotech.com/pages/store/6-0_online_store.html), Consulté le 2 mai 2007.
- COMMISSION DE LA SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL « CSST » (2005). Le SIMDUT, Graphite (naturel) N°CAS 7782-42-5.
- DANIS, P (2003), Dessalement de l'eau de mer, *Techniques de l'ingénieur*, j2700, 18 p.
- DONALDSON, K., AITKEN, R., TRAN, L., STONE, V., DUFFIN, R., FORREST, G., ALEXANDER, A. (2006). Carbon Nanotubes : A Review of Their Properties in Relation to Pulmonary Toxicology and Workplace Safety, *Toxicological Sciences.*, July 2006; Volume 92 No.1, p. 5 - 22.
- EINAV, R., HARUSSI, K., PERRY, D. (2002). The footprint of the desalination processes on the environment, *Desalination* 152 (2002) p.141–154.

- ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY « EPA » (2007), Nanotechnology White Paper, février 2007, Washington, 132 p.
- FRITZMANN, C., LÖWENBERG, J., WINTGENS, T., MELIN, T. (2006), State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination* 216 (2007) p. 1-76.
- GLOBAL WATER INTELLIGENCE “GWI” (2006), 19th IDA Worldwide Desalting Plant Inventory extract, <http://www.globalwaterintel.com/index.php?page=reportSelect>, Consulté le 2 mars 2007.
- HOLT, J. K. (2006). Conference : Fast water transport through carbon nanotubes and implications for water treatment. Canberra, Octobre 2006, 36 p.
- HOLT, J.K., PARK, H.G., WANG, Y., STADERMANN, M., ARTYUKHIN, A.B., GRIGOROPOULOS, C.P., NOY, A., BAKAJIN, O. (2006). Fast Mass Transport Through Sub-2-Nanometer Carbon Nanotubes, *Science*, 19 May 2006, Volume 312. no. 5776, p. 1034 - 1037.
- INTERNATIONAL RISK GOVERNANCE COUNCIL (2006). Whitepaper on nanotechnology risk governance, Juin 2006, Genève, 108 p.
- KONISHI, T., MISRA, B.M. (2001). De l'eau douce en provenance de la mer les progrès du dessalement nucléaire se poursuivent, *Bulletin IAEA*, Volume 43, Numéro 2 (2001), p. 5-8.
- LAM, C., JAMES, J.T., MCCLUSKEY, R., AREPALLI, S., HUNTER, R.L. (2006). A Review of Carbon Nanotube Toxicity and Assessment of Potential Occupational and Environmental Health Risks, *Critical Reviews in Toxicology*, Volume 36 (2006), p.189–217.
- LAND AND WATER AUSTRALIA (LWA), (2001), Option for Productive use of Salinity (OPUS) database, [http://www.ndsp.gov.au/opus/minerals/salt\\_products/salt\\_products.htm](http://www.ndsp.gov.au/opus/minerals/salt_products/salt_products.htm), Consulté le 2 novembre 2007.
- NASSERI, S., SAMADI, M.T., FARD, A., MESDAGHINIA, AR (2004). Comparison of Nanofiltration and GAC Adsorption Processes for Chloroform Removal from Drinking Water, *Iranian Journal Public Health* (2004), Volume. 33, No. 3, p. 47-53.
- NGHIEM, L.D., SCHÄFER, A.I. (2005). Critical risk point of nanofiltration and reverse osmosis processes in water recycling applications, *Desalination*, Volume 187 (2006), p. 303-312.
- MAUREL, A. (1993). Techniques séparatives à membranes, considération théoriques, *Techniques de l'ingénieur*, Toulouse, 23 p.
- MAUGUIN, G., CORSIN, P. (2005). Concentrate and other waste disposals from SWRO plants : characterization and reduction of their environmental impact, *Desalination*. Volume 182 (2005), p.355-364.
- MEERGANZ VON MEDEAZZA, G.L. (2005). "Direct" and socially-induced environmental impacts of desalination, *Desalination*, Volume 185 (2005), p. 57–70.

- NANOCYL (2006). Material Safety Data Sheet [http://www.nanocyl.com/004\\_download/MSDS-Nanocyl-Powder.pdf](http://www.nanocyl.com/004_download/MSDS-Nanocyl-Powder.pdf), Consulté le 2 mai 2007.
- NATIONS UNIES (2003). Objectifs du millénaire pour le développement (OMD), septembre 2003, 3 p.
- PATEL-PREDD, P (2006). Technology solution, Water desalination takes a step forward, Environmental Science & technology, June 1, 2006, p.3454-3455.
- PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT « PNUD » (2006), Rapport mondial sur le développement humain 2006, New York, 440 p.
- RENAUDIN, V. (2003), Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Dossier pluridisciplinaire sur l'eau, <http://culturesciences.chimie.ens.fr/dossiers-chimie-societe-article-DessalementEauMer.html>, Consulté le 3 novembre 2007.
- SALIPIRA, K.L., MAMBA, B.B., KRAUSE, R.W., MALEFETSE, T.J., DURBACH, S.H. (2006), Carbon nanotubes and cyclodextrin polymers for removing organic pollutants from water, Environment Chemical Letter (2006), 5 p.
- SMITHSONIAN (1995). "OCEAN PLANET" oceanographic facts, [http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN\\_PLANET/HTML/education\\_oceanographic\\_facts.html](http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN_PLANET/HTML/education_oceanographic_facts.html), Consulté le 10 mars 2007.
- THE WORLD BANK GROUP (2001), Access to Safe Water, <http://www.worldbank.org/depweb/english/modules/environm/water/index02.html>, consulté le 10 mars 2007.
- TULLY, S (2000), Water, Water Everywhere Today companies like France's Suez are rushing to privatize water, already a \$400 billion global business. They are betting that H<sub>2</sub>O will be to the 21st century what oil was to the 20th. FORTUNE MAGAZINE, 15 mai 2000, [http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune\\_archive/2000/05/15/279789/index.htm](http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2000/05/15/279789/index.htm) Consulté le 10 mars 2007.
- UNEP (1994), Freshwater from the Sea: Two Alternative Technologies to Secure Freshwater Supply Through Desalination, INSIGHT, Fall '94 Edition, <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/INSIGHT/Fal-94/7.asp> Consulté le 20 octobre 2007.
- VEOLIA (1999), 1999 - Méry-sur-Oise, Nanofiltration, <http://www.veoliawater.com/history/1999>, Consulté le 25 mars 2007.
- WALHA, K., BEN AMAR, R., FIRDAOUS, L., QUÉMÉNEUR, F., JAOUEN, P. (2005). Brackish groundwater treatment by nanofiltration, reverse osmosis and electrodialysis in Tunisia : performance and cost comparison, Desalination, Volume 207 (2007), p. 95–106.
- WENER, M., SCHÄFER, A.I. (2006). Social aspect of a solar-powered desalination unit for remote Australian communities, Desalination, Volume 206 (2006), p.375-393.

WIKIPEDIA (2007), pages : principe de précaution, nanotubes de carbone, Consulté le 15 avril 2007.