

Dessalement nucléaire : une source alternative pour la production d'eau et d'électricité à bas coût

Simon Nisan

CEA (Commissariat à l'énergie atomique), Département d'études des réacteurs (DER), Service d'études des systèmes innovants (SESI), Centre de Cadarache, Saint-Paul-lez-Durance, France

Résumé

«Aujourd'hui, 1,2 milliard de personnes ne disposent pas d'un accès à une eau potable ; 2,5 milliards de personnes vivent sans un assainissement satisfaisant ; deux millions de personnes, surtout des enfants, meurent chaque année de maladies liées à l'eau ou à l'hygiène»¹. C'est l'équivalent d'un Boeing 747, plein d'enfants, s'écrasant toutes les heures !

Ce papier souligne ainsi l'importance du problème de pénurie d'eau que rencontreront plusieurs régions du monde dans les années à venir.

Le dessalement de l'eau de mer peut être une solution attrayante pour parvenir aux besoins en eau des deux tiers environ de la population mondiale. Les diverses techniques de dessalement sont ainsi décrites succinctement.

Dans ce contexte, le dessalement par les réacteurs nucléaires apparaît comme une solution très compétitive par rapport aux systèmes basés sur des énergies d'origine fossile, non seulement pour la production simultanée d'électricité et d'eau potable, mais également pour la minimisation de l'émission des gaz à effet de serre.

Les quantités de gaz à effet de serre sont estimées pour l'ensemble de la région méditerranéenne. De même, les coûts des externalités (limite basse, E1, et limite haute, E2), liés aux dommages sur l'environnement, sont présentés.

Dans le cadre de ses collaborations internationales, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) a récemment conduit plusieurs études d'évaluations technico-économiques, en particulier sur les coûts comparatifs de dessalement par la centrale turbine à gaz, cycle combiné (CC-600), par les centrales à charbon, lit fluidisé (CFB-900) et par les réacteurs nucléaires (REP-900, AP-600, GT-MHR et PBMR), tous couplés aux procédés de dessalement de type MED (distillation à effet multiple) et RO (osmose inverse).

Ces études ont clairement montré que :

- Le dessalement de l'eau de mer avec les réacteurs nucléaires est une option techniquement faisable.
- Comparé au système CFB-900 + MED, le coût de dessalement avec les réacteurs nucléaires est de 7 à 32 % plus faible dans les conditions nominales, de 27 à 47 % moindre avec la prise en compte des externalités E1, et de 52 à 65 % plus faibles avec le scénario E2.
- Les coûts de dessalement les plus faibles sont obtenus avec les réacteurs GT-MHR et PBMR utilisant la chaleur, virtuellement gratuite et normalement perdue à la source froide.
- De même, comparé au système CFB-900 + RO, les coûts de dessalement correspondants par REP-900 + RO et par AP-600 + RO sont respectivement 8,9 et 6,9 % plus faibles. Dans le scénario E1, ces coûts sont 22 à 20 % inférieurs. Cette différence s'élève à 40 à 41 % dans le scénario E2.
- Le coût de dessalement avec la centrale charbon + MED est 45 % moindre par rapport à la centrale CC-900 dans les conditions normales. Ce même coût est 19 % moindre dans le scénario E1. Toutefois, cette tendance est inversée dans le scénario E2 puisque le coût de dessalement par le système CC-900 + MED est alors 7,8 % moindre. Pour les systèmes correspondants avec RO, ces écarts sont respectivement +28, +14,6 et -3 %.
- Pour toutes les combinaisons, les coûts de dessalement par RO sont de 25 à 40 % plus faibles que ceux par les systèmes correspondant avec MED.

¹ R. Coulomb, vice-président, Conseil mondial de l'eau, Conf. Int. Marrakech, 16-18 octobre 2002.

Introduction

■ La problématique de l'eau

L'eau est une denrée indispensable pour l'existence de l'humanité et son développement socio-économique.

La quantité d'eau existant à la surface du globe terrestre est supérieure à 1 milliard de km³, et couvre 70 % de la terre, tandis que la consommation mondiale ne dépasse pas 1 500 km³/an. A première vue, cette différence considérable devrait plutôt être rassurante.

Cependant, 97,5 % de cette eau est saline ou saumâtre. Seuls 2,5 % sont donc disponibles. Toutefois, 70 % de cette fraction sont sous forme de glaces (Antarctique, Groenland...) et une grande partie de la fraction restante se trouve dans l'humidité du sol et dans les nappes profondes. En conséquence, la fraction d'eau effectivement disponible pour une utilisation directe est seulement de l'ordre de 0,007 %, soit 70 000 km³ environ.

Cette fraction est distribuée de manière extrêmement hétérogène. Conjugué à la croissance démographique et au développement industriel, cela a déjà induit un déficit important en eau potable dans plusieurs régions du monde. Selon le Comité sur les ressources naturelles [1], en 1997, 80 pays, avec environ 40 % de la population mondiale, étaient en situation de pénurie d'eau (figure 1, planche II).

Les ressources en eau sont non seulement rares mais aussi inégalement réparties. Elles sont surtout très fragiles. Outre la dynamique des populations, ces ressources et les écosystèmes qui les renouvellent sont aujourd'hui gravement menacés par des pressions multiples : surexploitation et pollution, changement du climat, usage et aménagement arbitraires des territoires, etc. Ainsi par exemple, en 1960, les ressources renouvelables d'eau douce en Afrique étaient d'environ 15 000 m³/habitant/an. En 2025, elles ne seront que de 2 000 m³/habitant/an (figure 2, planche II).

Comme l'indique la figure 1, la zone rouge représente les pays qui souffrent déjà d'une pénurie d'eau. La zone orange représente l'ensemble des pays où, en 2020, les ressources locales ne suffiront pas à satisfaire les besoins. Les zones hachurées sont les pays qui importeront, en 2010-2020, plus de 10 % de leur consommation de céréales. Il faut rappeler que, pour produire une tonne de céréales, il faut 1 000 tonnes d'eau. L'importation de céréales est donc une importation indirecte de l'eau.

Si rien n'est rapidement fait, à l'horizon 2020-2030, deux tiers environ de la population mondiale souffriront d'une pénurie modérée ou aiguë en eau potable et/ou en eau pour l'irrigation. Les pays particulièrement touchés seront :

- l'ensemble des pays d'Afrique du Nord,
- les pays du sud de l'Union européenne tels que l'Espagne (régions du sud et de l'est), la Grèce, l'Italie (régions du sud et les îles), le Portugal (Alentejo, Algarve et les îles de Porto Santo et Corvo),

- les autres pays de la Méditerranée tels que Chypre et Malte,
- les pays d'Amérique latine et l'Asie du Sud-Est.

■ Le dessalement

Les problèmes en relation avec l'eau sont nombreux et très divers. Il n'y a donc aucune solution simple permettant de répondre à sa demande dans un pays donné. Toutes les solutions alternatives pour fournir cette eau, en particulier son recyclage, son usage plus effectif, la modernisation de sa distribution pour éviter des fuites, le dessalement de l'eau marine ou saumâtre, doivent être ainsi mises à profit pour répondre à une demande toujours croissante.

Dans ce contexte, il est généralement reconnu, dans la plupart des cercles internationaux traitant des problèmes de l'eau, que le dessalement de l'eau de mer pourrait être une solution non conventionnelle, attrayante et économique contribuant à un développement durable des pays concernés, et ce, pour plusieurs raisons :

- les immenses réserves d'eau de mer disponibles,
- la chute notable du coût de dessalement,
- le fait que le dessalement apporte une solution aux besoins divers : usages domestiques et industriels, usages agricoles, traitement des eaux.

Il n'est donc pas surprenant que le marché du dessalement soit actuellement en pleine croissance, avec un taux annuel d'environ 7 %.

■ Pourquoi le dessalement nucléaire ?

Tous les arguments qui conduisent à l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production de l'énergie électrique militent également en faveur du dessalement nucléaire :

- Le dessalement nucléaire est très compétitif par rapport au dessalement par des sources fossiles (cf. § «L'économie de dessalement nucléaire», p. 36).
- Les réacteurs nucléaires fournissent de la chaleur couvrant une large gamme de températures, ce qui permet une adaptation rapide à tous les procédés.
- Grâce aux procédés innovants (cf. § «Utilisation de la chaleur perdue via des condenseurs des REP et des CANDU», p. 34), les réacteurs nucléaires permettent une utilisation aisée de la chaleur, normalement perdue à la source froide.
- Le dessalement nucléaire est bénéfique pour l'environnement.

Le dessalement est un processus qui exige beaucoup d'énergie. Une stratégie future, fondée uniquement sur l'utilisation des ressources fossiles pour le dessalement ne serait donc ni pratique ni souhaitable : les réserves en énergies fossiles sont limitées (et devraient être conservées pour d'autres utilisations essentielles), tandis que les

besoins en eau augmenteront toujours avec la croissance démographique et avec l'augmentation du niveau de vie des populations. Les mesures de conservation portant sur le recyclage des eaux usées, la minimisation des fuites, l'aménagement et la modernisation des réseaux de distribution, etc., contribueront certes à réduire cette demande, mais elles ne pourront pas empêcher la dissémination des usines de dessalement et, en conséquence, des centrales fossiles de production d'énergie, avec des conséquences néfastes pour l'environnement et pour la santé des populations.

Le dessalement nucléaire répond à un besoin fondamental de l'humanité. Il contribue ainsi à l'acceptation par le public de l'énergie nucléaire.

En se basant sur des estimations intéressantes seulement la région méditerranéenne, on a montré [2] qu'en 2025, le besoin supplémentaire en production d'eau dessalée sera approximativement de 20 millions de m³/jour.

On peut alors conclure que, pour une capacité de dessalement de 20 millions de m³/jour dans la seule région méditerranéenne, on produirait en utilisant des énergies fossiles² :

- 13 à 264 millions de tonnes/an de CO₂,
- 1 350 à 1 310 000 de tonnes/an de SO_x,
- 21 100 à 540 000 de tonnes/an de NO_x,
- 1 190 à 40 000 de tonnes/an de particules.

Les émissions potentielles de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale pourraient être de plus du double de ces chiffres. Ces émissions pourraient être évitées par l'usage de l'énergie nucléaire.

Réacteurs nucléaires et procédés de dessalement

■ Réacteurs nucléaires

Il n'y a pas de réacteurs nucléaires spécifiques pour le dessalement. Tous les réacteurs capables de fournir de l'électricité et/ou de l'énergie thermique peuvent être associés à un processus de dessalement approprié. Ces réacteurs peuvent opérer comme systèmes dédiés (produisant seulement de l'eau dessalée) ou comme systèmes de co-génération produisant de l'eau et de l'électricité.

Les systèmes nucléaires dédiés sont considérés comme plus convenables pour les régions éloignées et isolées. Cependant, les études ont montré [3] que le coût de l'eau dessalée par de tels réacteurs est toujours plus élevé que celui de l'eau dessalée par les systèmes de co-génération.

Il s'avère que beaucoup de pays en voie de développement souffrent à la fois de pénurie d'électricité et de pénurie d'eau. Dans ce cas, les études de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) ont montré que des

réacteurs de petite ou moyenne puissance, SMR (*Small and Medium Sized Reactors*), opérant en mode co-génération, pourraient être les systèmes de dessalement nucléaire les plus appropriés, et ce, pour plusieurs raisons :

- Les SMR ont des coûts d'investissement relativement inférieurs à ceux des réacteurs de grande taille.
- Presque tous les concepts SMR indiquent une disponibilité accrue (90 %).
- En raison de leurs caractéristiques de sûreté inhérentes, la plupart des SMR ont une plus grande possibilité d'être localisés près de centres de population, ce qui abaisserait les coûts de transport de l'eau.

L'Inde et le Pakistan utilisent déjà des réacteurs SMR de type PHWR (*Pressurised Heavy Water Reactor*) pour leurs usines nucléaires de démonstration de dessalement.

À court terme, on peut mentionner deux REP (réacteurs à eau pressurisée, PWR en anglais) qui paraissent présenter des avantages économiques : le REP français de 900 MWe, et le REP avancé de taille moyenne proposé par Westinghouse, AP-600.

Pour un déploiement à plus long terme, des coûts plus bas pourraient être obtenus par l'utilisation de la chaleur produite dans les réacteurs de type HTR (réacteur à haute température) à cycle direct tels que le GT-MHR en cours de développement par General Atomics et ses partenaires (Etats-Unis, Russie, Japon), le PBMR d'Afrique du Sud, et le concept ANTARES proposé par AREVA, France.

Le REP-900 (PWR-900)

Le REP-900 est assez bien connu et peut être considéré comme la référence du fait de ses coûts considérablement inférieurs qui résultent principalement de la construction en série de 34 unités standardisées en France.

Le réacteur comprend essentiellement une enceinte de confinement formée d'un seul liner d'acier qui renferme le réacteur proprement dit, et le système primaire avec trois boucles de caloporteur. La salle des turbines, partagée par une ou deux paires d'unités sur le site, est orientée soit tangentiellement (modèle CP1), soit radialement (modèle CP2). Pour chaque unité, la salle abrite un ensemble de turbo-générateurs avec un cylindre de haute pression et trois cylindres de basse pression (CP1) ou un de haute pression et deux de basse pression (CP2).

L'AP-600

L'AP-600 [4] est un réacteur de 600 MWe avancé à eau légère pressurisée (figure 3), avec deux boucles de

² Les sources considérées dans [2] sont des installations utilisant le charbon et le pétrole, et des installations à cycle combiné de turbines à gaz.

caloporteur. Chaque boucle consiste en un générateur de vapeur, deux pompes à rotor noyé, une conduite chaude unique et deux conduites froides pour le caloporteur du réacteur circulant entre le réacteur et le générateur de vapeur. Le système inclut un pressuriseur.

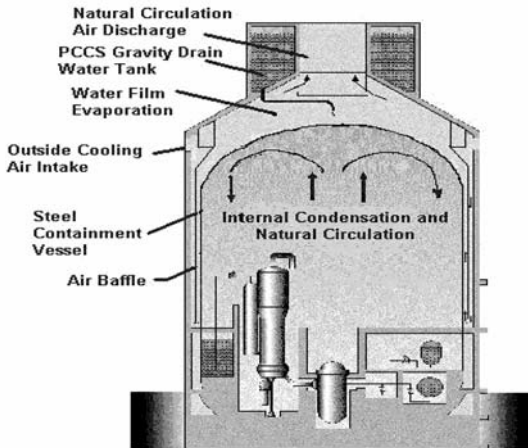


Fig. 3 : Principe de fonctionnement de l'AP-600

Les traits innovants majeurs de l'installation sont : la faible densité de puissance du cœur, la configuration simplifiée de la boucle primaire qui emploie des pompes à rotor noyé montées sur la tête inférieure du générateur de vapeur, et des systèmes de sécurité passifs simples, qui, une fois activés, dépendent seulement des forces naturelles telles que la gravité et la circulation naturelle.

Le GT-MHR

Le GT-MHR (*Gas Turbine - Modular Helium Reactor*) est un réacteur dont le cœur est intrinsèquement sans possibilité de fusion en cas d'accident grave. Il a été initialement développé par un consortium international (principalement General Atomics, Mitsubishi, Minatom et Framatome) pour satisfaire le besoin d'un procédé de génération d'électricité et de chaleur nucléaire sûr et économique [5].

Le réacteur est caractérisé par un caloporteur inerte d'hélium, du graphite comme matériel de structure central, et des particules de combustible couvertes d'une substance réfractaire qui retient les produits de fission à très haute température. Dans le GT-MHR, le caloporteur d'hélium à haute température actionne directement une turbine à gaz associée à un générateur électrique (cycle de Brayton, figure 4). Le rendement du système est d'environ 48 %. Un module GT-MHR typique de 600 MWth produit ainsi environ 285 MWe.

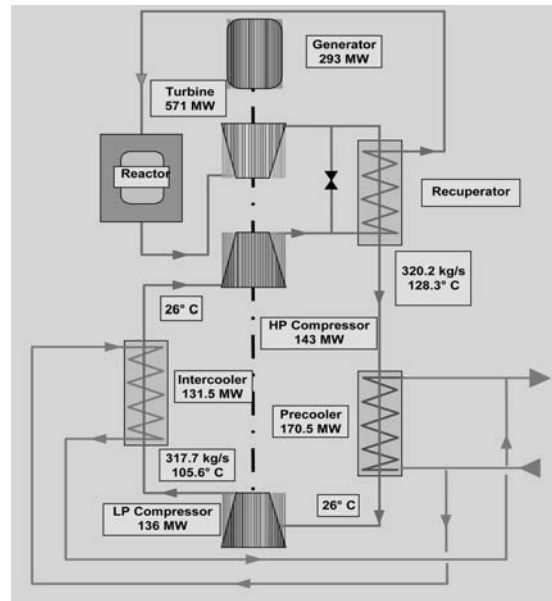


Fig. 4 : Système de conversion énergétique d'un GT-MHR

Le PBMR³

Le PBMR est également un réacteur à haute température refroidi par gaz, dont la conception générale est, dans son principe, semblable à celle du GT-MHR. La construction d'une unité PBMR produisant approximativement 180 MWe est prévue en Afrique du Sud (figure 5).

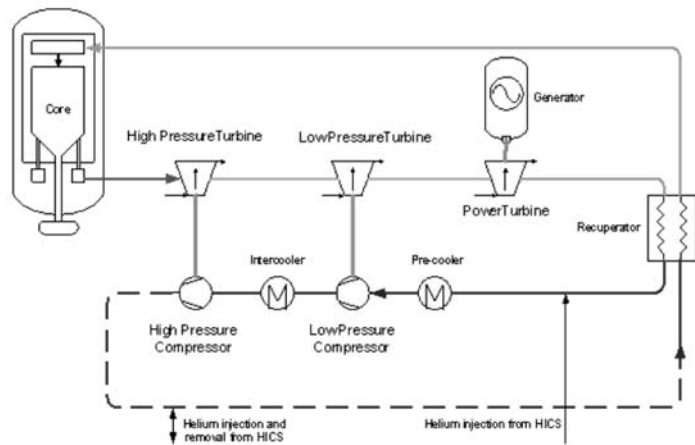


Fig. 5 : Système de conversion énergétique d'un PBMR

ANTARES

Forte de son expérience considérable dans la conception de MODUL, et de sa participation passée dans le développement du GT-MHR, AREVA NP (précédemment connue sous le nom de FRAMATOME ANP), filiale d'AREVA commune avec SIE-

³ Site Web PBMR <http://www.pbmr.com>.

MENS, développe une nouvelle génération d'HTR utilisant le système de conversion énergétique de cycle combiné [6]. Un tel système promet un très haut rendement (47 %) en évitant des risques technologiques (figure 6, planche II).

ANTARES est d'une conception modulaire où le cœur est contenu dans une enceinte métallique conçue pour évacuer la chaleur résiduelle par rayonnement en cas d'accident majeur. Ces moyens passifs sont suffisants pour limiter la température du cœur du combustible au-dessous de la limite imposée de 1 600 °C.

Afin d'optimiser le niveau de puissance, le cœur est de forme annulaire. Pour minimiser la pression du cœur et simplifier la récupération du combustible, les particules TRISO de combustible sont contenues dans des compacts, lesquels sont à leur tour contenus dans des blocs de graphite arrangés en une géométrie hexagonale (figure 7).

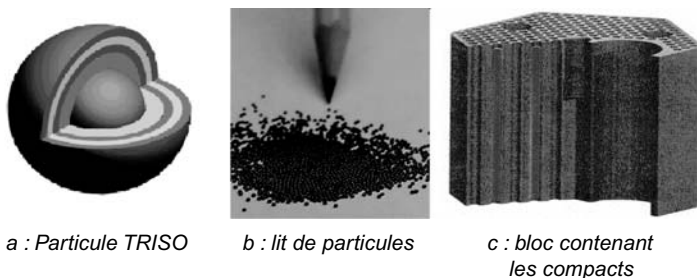


Fig. 7: Particule TRISO, lit de particules et bloc contenant les compacts, utilisés dans les HTR

La boucle primaire d'ANTARES est considérablement simplifiée, réduisant ainsi non seulement les coûts des composants, mais aussi ceux des opérations d'entretien dans un environnement hautement radioactif. La pression du circuit primaire (5,5 MPa) est considérablement inférieure à la pression exigée dans les systèmes à cycle direct (7 à 9 MPa). Cela amène à une réduction d'épaisseur de la paroi de l'enceinte de confinement et à des soudures relativement minces. La pression, plus basse, est aussi compatible avec les performances des soufflantes actuelles. La soufflante est d'un type à vitesse de rotation variable, dont le flux peut être adapté au niveau de puissance du réacteur. Cette caractéristique élimine pratiquement le contrôle de l'inventaire, inévitable dans les réacteurs à cycle direct.

Le système de cycle combiné dans ANTARES utilise un cycle de Brayton à gaz via un échangeur de chaleur intermédiaire IHX pour récupérer la chaleur du cœur (à 800 °C) et la convertir en électricité. Alors que le cycle de Brayton est efficace à haute température, il entraîne une perte de chaleur aux températures comprises entre 120 °C et 26 °C via les échangeurs precool et intercooler comme dans le GT-MHR. Dans la conception d'ANTARES, toute l'énergie du gaz se retrouve dans le générateur de vapeur et passe dans le cycle de la vapeur pour une production supplémentaire d'électricité.

La production de puissance de la boucle de gaz est approximativement de 83 MWe alors que le cycle de vapeur produit approximativement 210 MWe. Ce sont des valeurs brutes.

■ Procédés de dessalement

Le dessalement de l'eau de mer est un procédé permettant d'obtenir de l'eau «pure» par séparation d'un flux d'alimentation en eau de mer en : 1° un flux relativement dépourvu de substances dissoutes, et 2° un flux de saumure concentrée.

Les procédés de dessalement sont nombreux. Nous ne décrivons ici que les procédés les plus utilisés : le procédé de distillation à effets multiples (MED) et le procédé membranaire d'osmose inverse (RO).

Dans les processus de distillation [7], l'eau de mer est chauffée pour faire évaporer de la vapeur pure qui est ensuite condensée. L'énergie de la chaleur exigée pour cette distillation est fournie habituellement par de la vapeur saturée à basse pression, qui peut être extraite d'entre deux étages d'une turbine, du circuit condenseur ou d'une installation de chauffage dédiée.

La quantité et la qualité de vapeur exigées pour produire la quantité désirée d'eau pure dépendent de la température de l'eau de mer, de la température maximale de la saumure, et du type, de la conception et des performances de l'installation de distillation. D'habitude, l'efficacité d'une installation de distillation est exprimée par le paramètre GOR, qui est le rapport de la quantité d'eau pure produite par kg de vapeur utilisée dans le premier effet.

L'osmose inverse [8] est un procédé qui exige seulement de l'énergie mécanique (ou électrique) pour son fonctionnement.

Distillation à effets multiples (MED)

L'eau de mer est chauffée dans le premier effet (figure 8), vaporisant une fraction de celle-ci. Une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire où circule de l'eau de mer relativement froide. L'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, maintenu à une pression plus faible que le premier. De même, une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau de mer dans le second.

La vapeur en provenance du premier effet se condense dans le deuxième sur le faisceau tubulaire, et produit une quantité presque égale de vapeur à partir de l'eau de mer, et ainsi de suite.

A chaque effet, l'eau distillée est envoyée dans un collecteur.

Le procédé MED produit presque de l'eau pure (5 à 25 ppm TDS⁴) à partir de l'eau de mer

⁴ TDS : Total dissolved solids ; concentration totale des sels (salinité).

avec un TDS de 35 000 à 45 000 ppm. Les performances du procédé dépendent principalement du paramètre GOR (= masse d'eau dessalée/masse de vapeur consommée). Le GOR pour le procédé MED est théoriquement égal au nombre d'effets, mais en pratique, il est légèrement inférieur en raison des pertes de chaleur.

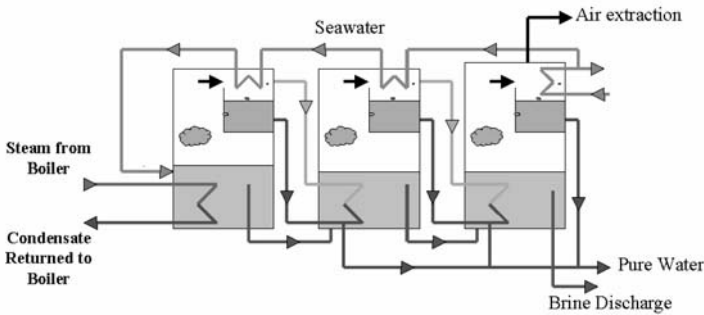


Fig. 8 : Schéma de principe du procédé MED

L'osmose inverse (RO)

L'osmose est un processus naturel dans lequel les molécules de l'eau migrent à travers une membrane semi-perméable depuis une solution de basse concentration (par exemple de l'eau pure) vers une solution de plus haute concentration (par exemple de l'eau de mer). L'osmose inverse est un procédé de séparation dans lequel l'eau pure est «forcée» hors d'une solution saline concentrée en filtrant à travers une membrane grâce à une forte pression statique transmembranaire (figure 9). Cette pression doit être plus grande que la pression osmotique (différence de niveau entre la solution et l'eau pure).

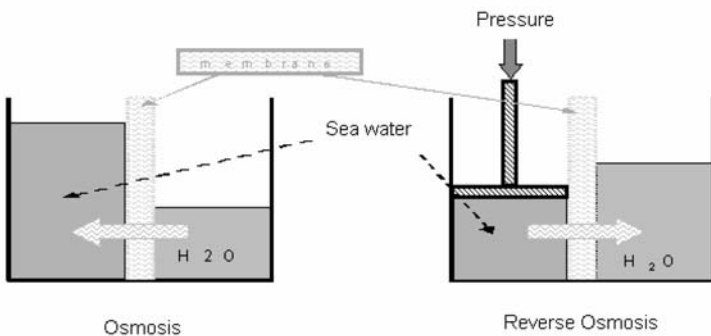


Fig. 9 : Osmose et osmose inverse

La solution saline est pompée dans une enceinte fermée où elle est mise en pression contre la membrane. Lorsqu'une fraction de l'eau passe à travers la membrane, le contenu en sel dans la saumure restante augmente. En même temps, une portion de cette saumure est vidée sans traverser la membrane.

Les membranes RO présentent une variété de configurations modulaires. Un exemple typique de membrane RO eau de mer moderne est la membrane Dow/Filmtec SW30HR-380, faite d'un mince film composite en polyamide, donnant une surface hautement active et un rejet de bore et de sel élevé. Cette membrane peut

opérer jusqu'à une température de 45 °C et une pression de 69 bars. Le régime normal en continu est cependant dans la gamme de 35 °C et de 55 bars.

Couplage de réacteurs nucléaires aux procédés de dessalement

■ **Couplage avec des réacteurs de type PWR**

Un réacteur nucléaire peut fournir l'énergie nécessaire aux procédés de dessalement soit sous forme de chaleur (procédé MED), soit sous forme d'énergie électrique (RO). En dehors de l'énergie pour le dessalement, l'intégration de tout procédé de type distillation nécessite de l'électricité pour le pompage et d'autres services.

Les systèmes intégrés pour le dessalement (réacteur + procédé) peuvent également être de deux types : systèmes dédiés ou systèmes à co-génération. Dans un système dédié, l'énergie du réacteur nucléaire est exclusivement utilisée pour la production d'eau. Dans un système à co-génération, seule une partie de l'énergie du réacteur est utilisée pour le dessalement, le reste étant consacré à la production d'électricité.

Dans les systèmes dédiés, le couplage entre le réacteur et le procédé est relativement simple et n'exige pas de considérations particulières, sinon le choix de capacités adaptées (production d'électricité ou de chaleur, et production d'eau).

Ce couplage est plus complexe dans les systèmes à co-génération (figure 10). Quelle que soit l'application, le couplage exige certaines considérations spécifiques pour la conception de deux systèmes.

Le schéma de couplage présenté en figure 10 est celui d'un procédé RO innovant, élaboré dans le cadre du projet EURODESAL (cf. § «Utilisation de la chaleur perdue via des condenseurs des REP et des CANDU», p. 34).

Quelques résultats des calculs thermodynamiques pour le système REP-900 + MED sont donnés dans le tableau 1. Ces résultats sont aussi valables pour le réacteur AP-600. Dans tous les calculs, une température initiale de 90 °C de la vapeur extraite a été postulée. La température à l'entrée de l'installation MED serait alors approximativement de 70 °C.

Le tableau 1 inclut la puissance électrique perdue (*lost shaft power*) à cause de la vapeur envoyée à l'installation MED. Cette installation est prévue pour être modulaire avec des unités de 12 000 m³/jour.

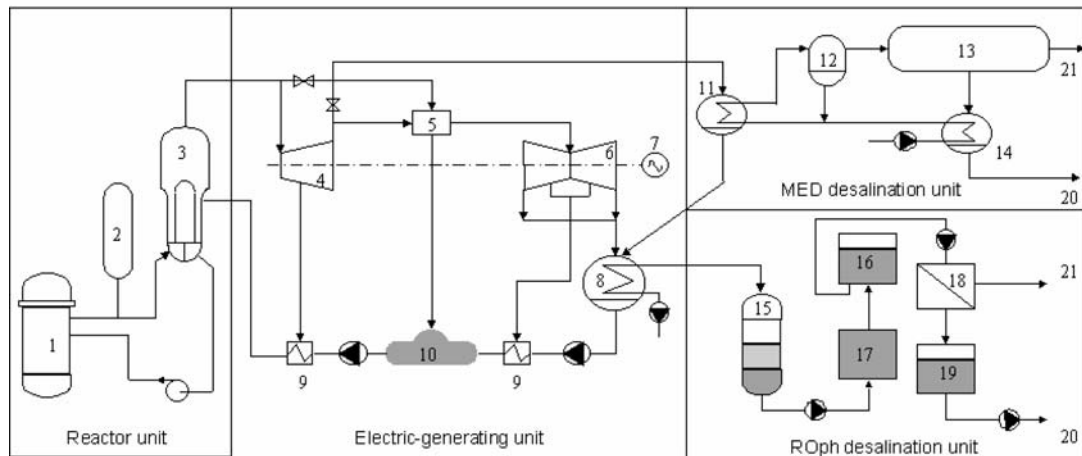


Fig. 10 : Couplage d'un procédé MED à un REP (parties 11, 12, 14) et à un procédé RO avec préchauffage via le condenseur (parties 15, 16, 17, 18, 19)

1 : cœur - 2 : pressuriseur - 3 : générateur de vapeur - 4 : turbine haute pression - 5 : réchauffeur intermédiaire - 6 : turbine basse pression - 7 : générateur - 8 : condenseur principal - 9 : préchauffeurs - 10 : dégazage - 11 : échangeur procédé - 12 : flash tank - 13 : procédé MED - 14 : condenseur de sortie MED - 15 : pré-traitement RO - 16 : enceinte de chlorification - 17 : membrane d'ultra-filtration - 18 : membrane RO - 19 : réservoir d'eau dessalée - 20 : sortie d'eau dessalée - 21 : rejet de la saumure concentrée

Tableau 1 : Production d'eau par le système REP-900 + MED (TUNDESAL)

Capacité de production (m ³ /jour)	Puissance thermique utilisée (MWth)	Flux initiaux de vapeur (kg/s)	Puissance perdue (MWe)
48 000	89,3	42	11,3
150 000	278,9	132	35,2
216 000	401,6	190	50,7
240 000	446,4	211	56,3

■ Utilisation de la chaleur perdue à la source froide du GT-MHR (ou PBMR)

Un grand avantage du GT-MHR (et/ou PBMR) est que leurs conceptions prévoient l'utilisation de la chaleur produite dans leurs échangeurs precoolers et intercoolers qui est évacuée à la source froide. Cette chaleur est à des températures idéales pour le dessalement (80 à 120 °C). Parce que cette chaleur est normalement envoyée à la source froide, elle est considérée comme pratiquement gratuite pour le dessalement. Ce principe a été utilisé dans les projets EURODESAL et TUNDESAL.

Afin de coupler un GT-MHR au MED, il est donc suffisant d'effectuer un piquage du flux d'eau chaude dans le circuit de l'unité de refroidissement (*switch cooling unit*) vers la source froide et d'envoyer une fraction d'eau chaude au circuit intermédiaire. L'installation MED agit alors comme un deuxième puits de chaleur. Le piquage d'eau chaude n'a donc aucun effet sur le rendement électrique du GT-MHR. Un tel couplage est montré dans la figure 11. Avec des modifications mineures, cela est également valable pour le PBMR.

La chaleur est transférée du precoolers (170,5 MW) et de l'intercooler (131,5 MW) par deux boucles d'eau en parallèle. À la sortie du precoolers, selon la configuration exacte utilisée, l'eau peut atteindre une température d'environ 120 °C, alors qu'à la sortie de l'intercooler une température d'environ 96 °C peut être obtenue. Les deux flux sont donc tout à fait semblables et, pour simplifier les choses, une température de mélange d'environ 106 °C peut être prévue.

Les principaux composants du couplage ont été modélisés et leurs caractéristiques thermodynamiques ont été déterminées de la même façon que pour le couplage REP + MED, pour des valeurs différentes de la température de mélange allant de 80 à 100 °C. Des détails pour les systèmes GT-MHR + MED et PBMR + MED sont donnés en référence [9].

La chaleur (ordinairement perdue) fournie par le GT-MHR est pratiquement gratuite, mais sa quantité totale disponible pour le dessalement est déterminée par les conditions thermodynamiques du système entier, en particulier la température de l'hélium exigée avant chaque étape de la compression. Cette température (laquelle devrait être

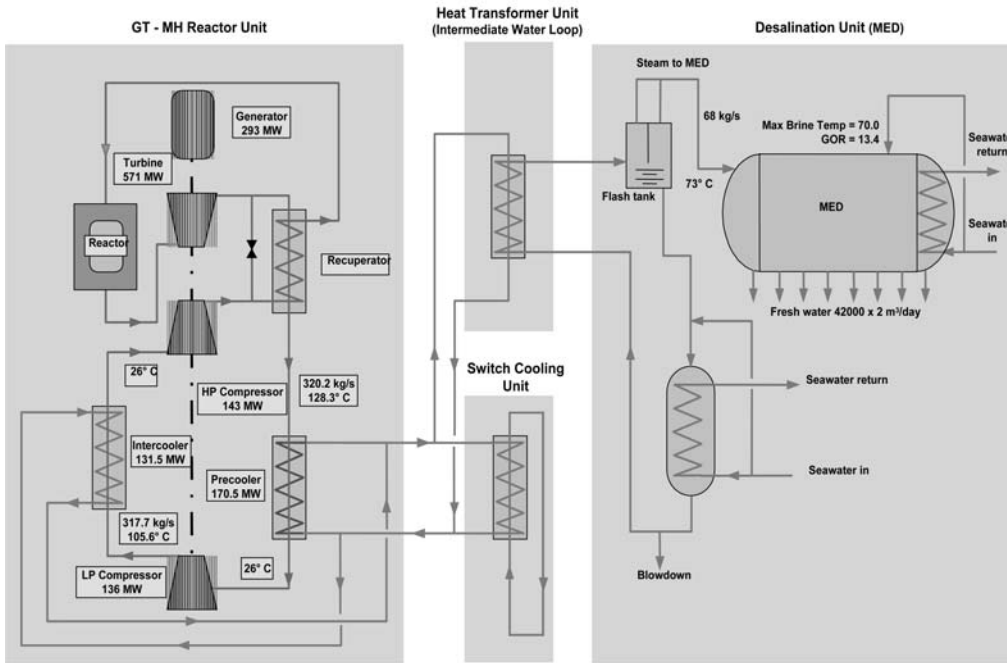


Fig. 11 : Principe du couplage GT-MHR et MED

aussi basse que possible) est liée directement à la température de l'eau de mer d'alimentation en un site donné.

Les calculs thermodynamiques montrent que les fractions de la puissance thermique totale réellement disponibles pour le dessalement par MED avec le PBMR et le GT-MHR, sont respectivement de l'ordre de 50 % et 60 % de la puissance thermique totale dissipée dans les échangeurs pre-cooler et inter-cooler. La quantité d'eau dessalée produite est donc relativement limitée, mais elle est suffisante pour fournir de l'eau potable à une ville de dimension moyenne.

■ **Utilisation de la chaleur perdue via des condenseurs des REP et des CANDU (procédé ROph)**

Les rendements électriques nets des systèmes de conversion énergétique sont, dans la plupart des REP et des CANDU⁵, de l'ordre de 30 à 33 %. Cela signifie que presque les deux tiers de la puissance thermique nette produite dans les réacteurs sont évacués vers la source froide par les condenseurs. La température de l'eau des condenseurs est trop basse (30 à 32 °C) pour un dessalement significatif avec les processus de distillation. Cependant, cette eau relativement chaude peut être alimentée dans une variante innovante du procédé RO, avec une préchauffe, connue maintenant comme procédé ROph.

On sait que la viscosité de l'eau d'alimentation est inversement proportionnelle à sa température. Donc, lorsque la température augmente, la viscosité de l'eau diminue et la membrane RO devient plus perméable, avec une augmentation importante de production (figure 12).

A partir des équations de base du système RO, on sait que, pour une membrane donnée, le flux de l'eau est pro-

portionnel au différentiel net de la pression active à travers la membrane.

D'un point de vue théorique, lorsque la température augmente, le différentiel de pression osmotique à travers la membrane, $\Delta\pi$, augmente. Si la pression hydraulique différentielle ΔP est maintenue à une valeur constante, la force motrice nette des membranes, NDP ($= \Delta P - \Delta\pi$), baisse. En conséquence, la consommation de puissance spécifique du système RO diminue avec la température (figure 12).

Le résultat net de ces deux effets peut ainsi amener une certaine réduction du coût de la production d'eau avec le système ROph. Cette réduction dépend du site et est une fonction complexe de plusieurs paramètres, y compris la salinité ou TDS (contenu total en sels dissous) de l'alimentation. Conformément à des calculs théoriques, pour chaque valeur TDS de l'alimentation, le rendement maximum de récupération est atteint à une température spécifique.

EURODESAL a développé en premier un système de dessalement d'osmose inverse (RO) avancé qui accentue une approche non traditionnelle de conception de système et d'opération [10]. Des principes fondamentaux de cette approche avancée d'une conception de système et d'opération RO sont l'usage d'eau d'alimentation «préchauffée», des opérations à haute pression, un prétraitement de l'eau d'entrée avancé, des systèmes de récupération d'énergie avancés, une optimisation spécifique aux sites, et des systèmes de gestion automatique en temps réel des installations.

⁵ Réacteurs CANada Deuterium Uranium.

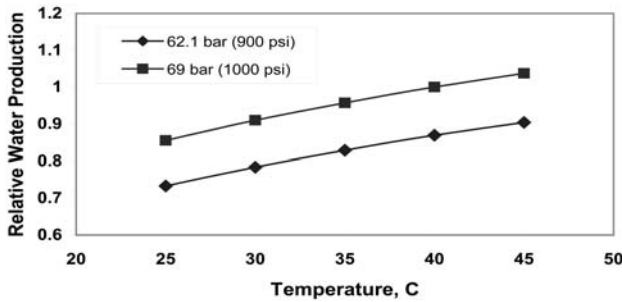


Fig. 12 : Production d'eau normalisée en fonction de la température et de la pression d'eau du RO

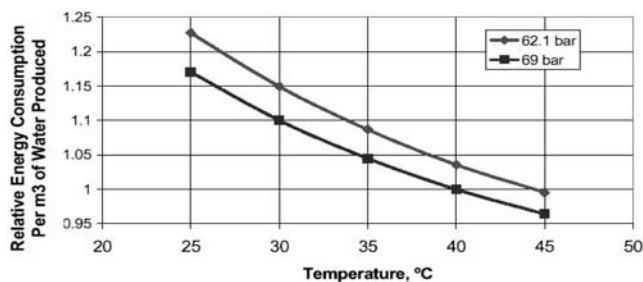


Fig. 13 : Consommation spécifique en fonction de la température et de la pression d'alimentation

L'importance du préchauffage de l'eau d'alimentation dépend à la fois de la température ambiante de l'eau de mer et des caractéristiques de la conception du réacteur nucléaire. La seule limitation est que la température maximale autorisée par les limites de la conception de la membrane RO ne soit pas dépassée. Actuellement, les membranes RO disponibles ont typiquement une limite de 45 °C, bien que leurs performances soient constamment améliorées par les fabricants. Des économies sont possibles à toutes les températures lorsque la chaleur normalement perdue peut être utilisée pour préchauffer l'eau d'alimentation, mais des économies d'ensemble dépendent de plusieurs facteurs qui sont les spécificités du site, la salinité de l'eau d'alimentation, la dimension de l'installation, l'intensité de préchauffage disponible, etc. Une considération importante dans le ROph est qu'il peut utiliser facilement l'eau chaude des condenseurs principaux d'installations de type REP.

Le procédé ROph a été d'abord appliqué à l'évaluation économique des systèmes de dessalement nucléaires dans le cadre du projet EURODESAL [11]. Cependant, la méthode utilisée était alors basée sur des formules spécifiques empiriques, et ne pourrait être appliquée qu'aux centrales électriques nucléaires telles que le CANDU et le REP, et pour une seule valeur de la salinité (TDS) de l'eau de mer.

Le CEA a donc recherché une nouvelle méthode [12] pour le traitement mathématique du procédé, étendant son application à toute installation de production d'énergie et

permettant la compréhension des paramètres clés des performances du système (par exemple le taux de conversion, la production totale, la salinité résiduelle, etc.) en fonction de variables opérationnelles telles que la température, la salinité de l'eau d'alimentation et l'intensité de son flux. La méthode a été appliquée à une étude spécifique de site pour La Skhira, Tunisie, dans le projet TUNDESAL [13].

Les résultats préliminaires [2] montrent que le ROph peut conduire un gain de 7 à 15 % sur le coût de dessalement par rapport au procédé RO conventionnel.

Vérification de sûreté

La sûreté d'un système intégré de dessalement nucléaire dépend principalement de la sûreté du réacteur nucléaire et de l'interface reliant ce réacteur au procédé.

Lorsqu'un réacteur nucléaire est couplé à un système RO sur le même site (système contigu), le couplage entre le réacteur et le procédé est très faible. La seule vérification à faire portera donc sur la perte totale d'alimentation électrique.

Dans le cas d'un procédé tel que le MED, le couplage, essentiellement thermique, est très fort. Les transitoires d'exploitation soit au niveau du réacteur, soit au niveau de l'usine de dessalement, peuvent théoriquement avoir un effet direct sur le fonctionnement et la sûreté de l'un ou de l'autre système. Il est nécessaire de vérifier que ce n'est le cas dans aucune situation incidente ou accidentelle.

La difficulté potentielle dans l'exploitation d'un réacteur en mode co-génération provient du fait que la production d'électricité dépend du débit vapeur. Un système de dessalement thermique ne répond pas de manière satisfaisante aux variations soudaines de charge. En effet, une telle variation peut conduire à une réduction du débit de saumure au-dessous des valeurs acceptables pour le fonctionnement du procédé. Cette difficulté peut être contournée par l'adoption d'une configuration qui favorise la connexion des évaporateurs en parallèle.

Naturellement, l'exigence de sûreté la plus fondamentale dans les couplages avec les procédés thermiques est la prévention de toute contamination radioactive de l'eau produite. C'est pourquoi au moins deux barrières mécaniques sont exigées entre le circuit primaire du réacteur et le circuit de l'eau de mer. Pour le REP, le générateur de vapeur est considéré comme la première barrière. Le condenseur ou un échangeur intermédiaire entre la vapeur sortant de la turbine et le procédé de dessalement constitueront ainsi la deuxième barrière.

Le principe de l'inversion des pressions (pression plus élevée côté procédé), ainsi que les provisions pour la surveillance de la radioactivité sont une partie essen-

tielle du système intégré. C'est la raison principale pour la présence d'un deuxième condenseur (figure 10). Ces mesures doivent, dans tout les cas, assurer un niveau zéro de radioactivité dans le circuit de l'eau produite.

EURODESAL [11] était donc le premier projet donnant les résultats des investigations détaillées concernant l'impact possible du couplage d'un procédé de dessalement sur la sûreté du réacteur nucléaire.

L'étude de sûreté dans EURODESAL a été basée sur l'estimation probabiliste de la fréquence d'apparition de certains transitoires clés tels que la perte de la source froide (perte de l'installation MED), la perte de charge électrique dans l'installation RO, et la rupture du tube transportant la vapeur extraite de la turbine vers le circuit intermédiaire du système.

Les résultats de cette analyse ont conduit aux conclusions suivantes :

- Le couplage d'une installation de dessalement à un réacteur nucléaire ne change pas le nombre de barrières statiques de confinement de la radioactivité.
- Cependant, le couplage doit prévoir un circuit intermédiaire. Ce circuit, comprenant un échangeur de chaleur et un flash tank pour faire évaporer l'eau chaude, doit maintenir une barrière dynamique de pression (pression du côté du procédé plus élevée que du côté du réacteur) et autoriser l'isolement immédiat du circuit de dessalement par l'action d'une vanne rapide.
- L'eau dessalée doit être surveillée en permanence afin d'éviter toute contamination éventuelle.
- L'installation de dessalement nucléaire intégrée doit être modulaire, chaque module ayant son propre circuit intermédiaire. Les réservoirs flash de ces modules doivent être localisés à côté de l'installation de dessalement.
- La perte de charge électrique due à l'arrêt de plusieurs modules RO (ou MED) est négligeable, comparée à un incident de perte de charge étudié dans le contexte de la sécurité du réacteur.
- De la même façon, il peut être montré que la rupture du tube d'alimentation de vapeur peut être équivalente à une petite fuite dans le circuit secondaire. Cela est largement étudié par les études des transitoires dans le contexte de la sûreté du réacteur correspondant à des fuites plus importantes dans d'autres parties du circuit secondaire.

L'économie de dessalement nucléaire

■ L'impact sur l'environnement ; les coûts externes

L'objectif principal de toute étude économique est de permettre le choix d'une option technique par rapport à une autre, les deux ayant des performances techniques semblables.

Dans le cas particulier du dessalement nucléaire, ce choix devrait être affiné davantage en prenant en compte

les coûts externes liés à l'énergie nucléaire et aux énergies utilisant les combustibles d'origine fossile.

Par définition, une externalité est créée lorsque les activités sociales et/ou économiques d'un groupe de personnes ont un impact sur un autre groupe, et que cet impact n'est pas payé par le premier groupe. Il est maintenant universellement admis que la production d'énergie (électrique) est étroitement liée à de nombreux problèmes tels que la pollution de l'air, de l'eau et de la terre, et l'émission de gaz à effet de serre (GHG), etc., produisant des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'écosystème dans lequel nous vivons.

L'étude externe de la Commission européenne permet de quantifier ces dommages dans les divers pays de l'Union européenne (UE). Ces coûts sont présentés dans le tableau 2.

A titre d'illustration, la figure 14 (planche II) montre les coûts externes pour diverses centrales, en Allemagne, utilisant les technologies 2010. La méthodologie d'évaluation est fondée sur l'«*Impact Pathways Analysis*».

On constate que, pour les centrales de production utilisant les combustibles fossiles, l'impact sur la santé humaine (émissions de particules et aérosols toxiques), l'acidification (GHG), et l'effet de réchauffement climatiques (GHG) sont les principales sources des coûts externes. On constate également que les coûts externes du cycle nucléaire sont très faibles.

Les coûts externes des cycles à énergies renouvelables proviennent du fait qu'on utilise des combustibles fossiles pour la production et la fourniture des matériaux de base et pendant la phase de construction.

Il est intéressant de noter que les coûts externes des technologies photovoltaïques courantes sont très supérieurs à ceux du cycle nucléaire.

Les impacts les plus faibles sont ceux des cycles éoliens et hydro.

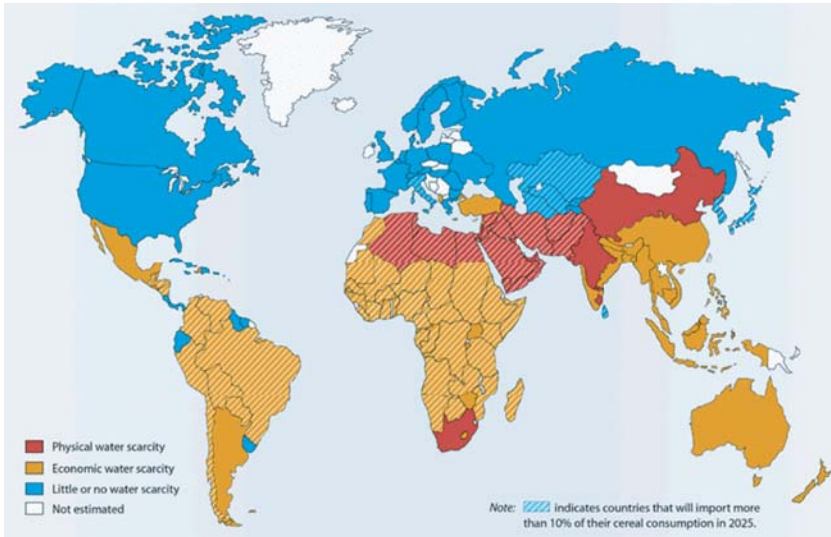
■ L'internalisation des coûts

Une manière logique, qui serait compatible avec le développement durable, permettant le choix entre les diverses technologiques serait d'internaliser (c'est-à-dire d'ajouter) les coûts externes correspondants dans les coûts de production.

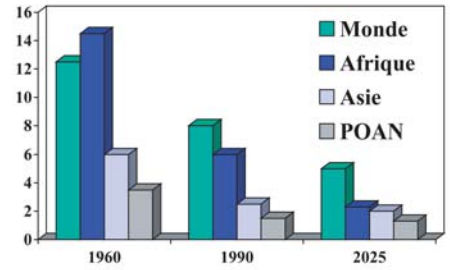
Les résultats d'une telle internalisation sont présentés sur la figure 15 (planche II) pour le cas de l'Allemagne, où des efforts sérieux sont déployés pour rendre les plus propres possible les technologies utilisant des combustibles fossiles.

On peut immédiatement observer que les coûts de production par les énergies renouvelables, en particulier par le solaire photovoltaïque, sont beaucoup plus élevés que les coûts de production par l'énergie nucléaire ou même par les énergies d'origine fossile.

Il est ainsi évident que l'intégration totale des coûts externes du cycle nucléaire rend cette option la plus économique.

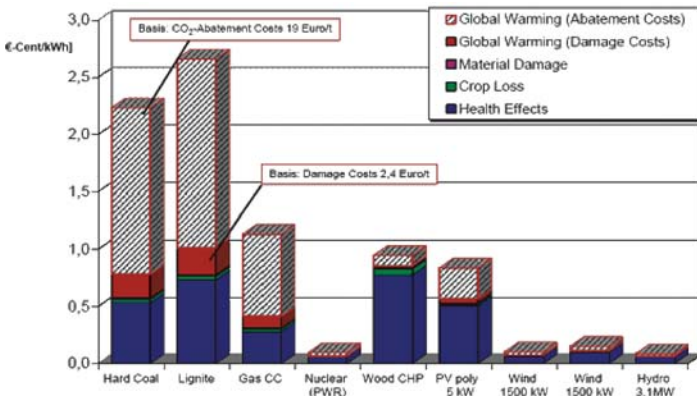
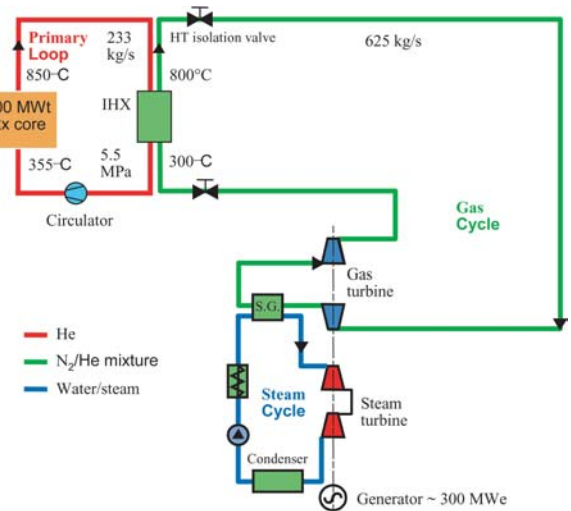


S. Nisan - Fig. 1 : Régions du monde en pénurie d'eau

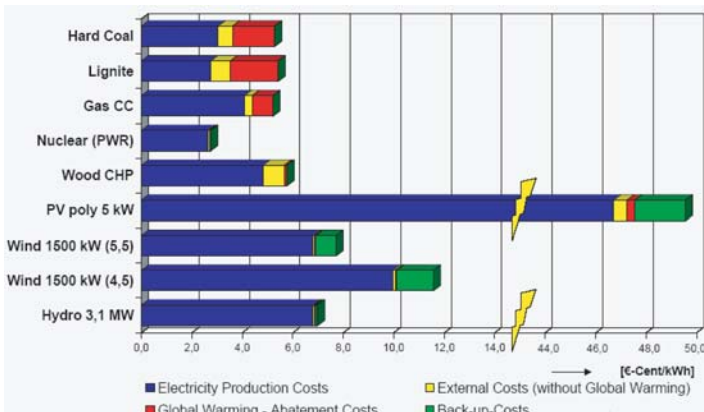


S. Nisan - Fig. 2 : Les ressources renouvelables d'eau (en 1 000 m³/habitant/an) sont rares, fragiles et sont en train de diminuer [1]. POAN : Proche et Moyen-Orient et Afrique du Nord

S. Nisan - Fig. 6 : Principe du fonctionnement d'ANTARES avec cycle combiné



S. Nisan - Fig. 14 : Coûts externes des centrales allemandes (taxe CO₂ = 19 €/t, 1 année de vie perdue = 50 000 €)



S. Nisan - Fig. 15 : Coût total de production d'électricité en Allemagne

Tableau 2 : Coûts externes de production d'électricité dans l'Union européenne (unités : 10^{-2} \$/kW.h*)

Pays	Charbon	Fuel	Gaz	Nucléaire	Biomasse	Hydro	Solaire PV	Eolien
Autriche			1,3 à 3,8		2,5 à 3,8	0,13		
Belgique	5,1 à 19		1,3 à 2,5	0,64				
Danemark	5,1 à 8,9		2,5 à 3,8		1,3			0,13
Finlande	2,5 à 5,1				1,3			
France	8,9 à 12,7	10,2 à 14	2,5 à 5,1	0,38	1,3	1,3		
Allemagne	3,8 à 7,6	6,4 à 10,2	1,3 à 2,5	0,25	3,81		0,76	0,063
Grèce	6,4 à 10,2	3,8 à 6,4	1,3		0 à 1,01	1,3		0,32
Irlande	7,6 à 10,2							
Italie		3,8 à 7,6	3,8 à 7,6			0,38		
Pays-Bas	3,8 à 5,1		1,3 à 2,5	0,89	0,64			
Portugal	5,1 à 8,9		1,3 à 2,5		1,3 à 2,5	0,038		
Espagne	6,4 à 10,2		1,3 à 2,5		3,8 à 6,4			0,25
Suède	2,5 à 5,1				0,38	0 à 0,89		
Grande-Bretagne	5,1 à 8,9	3,8 à 6,4	1,3 à 2,5	0,32	1,3			0,19

* Sous-total quantifiable des externalités (réchauffement climatique, santé publique, dommages matériels) ; 1 € = 1,26959 \$.

■ Evaluation économique

Les évaluations économiques du dessalement par les réacteurs nucléaires et par les sources fossiles ont été initialement réalisées dans le cadre des projets EURODESAL et TUNDESAL (projet franco-tunisien pour le site de la Skhira). Les calculs ont ensuite été réactualisés avec des méthodes plus précises.

Ces évaluations portent sur diverses combinaisons de réacteurs nucléaires (REP-900, AP-600, GT-MHR et PBMR). Pour les besoins de comparaison, nous avons également retenu les centrales conventionnelles telles que le charbon (CFB-900, à lit fluide circulant), le fuel (OIL-500) et la turbine à gaz, cycle combiné (CC-900). L'ensemble de ces centrales a été couplé aux procédés MED et RO.

Hypothèses de calculs

Compte tenu de la date probable du déploiement des centrales nucléaires, nous avons supposé que toute centrale sera mise en œuvre en 2015, avec les performances attendues à cette époque.

Les données économiques des centrales classiques sont dérivées des coûts de référence DIGEC- 2001, actualisés pour 2006.

Les prix des combustibles fossiles ont été déterminés à partir des données publiées sur www.wtrg.com/daily/oilandgasspot.html (pour fuel et gaz) et www.cbs.nl/en-GB/menu/themas/bedrijfsleven/energie-water/publicaties, pour le charbon.

L'ensemble des hypothèses de calculs est présenté dans le tableau 3.

Dans ce tableau, E1 est la limite basse et E2 la limite haute des coûts externes évalués pour la France et l'Allemagne.

■ Coûts de dessalement

Les résultats portant sur les coûts de dessalement (avec et sans externalités) pour toutes les centrales couplées aux procédés MED et RO sont présentés dans [5].

Afin de simplifier la comparaison, nous présentons, dans les tableaux 4 et 5, les valeurs des coûts de dessalement pour un taux d'actualisation de 8 % et pour les prix de combustibles fossiles moyennés sur 2006.

Les valeurs entre parenthèses donnent les écarts par rapport au coût des dessalements par le système charbon CFB-900 pris comme référence. Parmi les systèmes utilisant les combustibles fossiles, c'est le système le moins cher.

Ainsi, l'écart pour un système donné est :

$$\Delta = 100 \times \left[\frac{\text{Coût de dessalement (réacteur - CFB-900)}}{\text{Coût de dessalement CFB-900}} \right]$$

Discussion

Les tableaux 4 et 5 montrent que :

- Comparé au système CFB-900 + MED, le coût de dessalement avec les réacteurs nucléaires est de 7 à 32 % plus faible dans les conditions nominales, de 27 à 47 % moindre avec la prise en compte des externalités E1, et de 52 à 65 % plus faible avec le scénario E2.

Tableau 3 : Principales hypothèses de calculs (valeurs actualisées en US \$ 2006)

Paramètres	Unités	Centrale						
		REP-900	AP-600	GT-MHR	PBMR	CC-900	CFB-900	OIL-500
Année de référence		2006						
Intérêt/actualisation	%	5, 8 et 10						
Puissance/unité	MWe	951	610	286,2	114,9	900	900	500
Nombre sur site	-	1	1	2	5	1	1	1
Rendement	%	33	33	48,3	43,2	59,1	47,1	34,7
Disponibilité	%	91,2	91,2	91,2	91,2	94,5	90,2	90,2
Durée de construction	mois	60	48	48	24	30	36	36
Durée de vie	ans	40	40	40	40	25	35	25
Coût spécifique de construction	\$/kWe	1763	2194	1055	1530	685	1500	368,6
Coûts additionnels et aléas	\$/kWe	0	0	0	0	20	60	8,4
Coût d'exploitation et maintenance	\$/MW.h	10,4	10,4	3,25	3,1	5,9	7,8	4,44
Prix combustible	\$/Mbtu (\$/t)	N/A	N/A	N/A	N/A	3,8, 7,4 et 11	(25, 45 et 65)	3,8, 7,4 et 11
Augmentation annuelle	%/an	N/A	N/A	N/A	N/A	2	2	2
Coût cycle nucléaire	\$/MW.h	7,2		8,01	5,1	S/O	S/O	S/O
Coût externe, E1	\$/kW.h	0,0025				0,013	0,038	0,064
Coût externe, E2	\$/kW.h	0,0038				0,051	0,127	0,14

Tableau 4 : Coûts de dessalement, avec MED avec et sans externalités (taux d'actualisation de 8 %)

	CFB-900	CC-900	OIL-500	PWR-900	AP-600	GT-MHR	PBMR
Coût de dessalement (\$/m ³)	0,9487	1,3777	1,5713	0,84505	0,8795	0,6418	0,6942
Δ (%)		+45	+66	-10	-7	-32	-27
Coût de dessalement avec E1 (\$/m ³)	1,2378	1,4766	2,0581	0,86447	0,8989	0,6490	0,7021
Δ (%)		+19	+66	-30	-27	-48	-43
Coût de dessalement avec E2 (\$/m ³)	1,9147	1,7656	2,6361	0,87458	0,9090	0,6528	0,7062
Δ (%)		-7.8	+38	-54	-52	-65	-63

Tableau 5 : Coûts de dessalement avec RO, avec et sans externalités (taux d'actualisation de 8 %)

	CFB-900	CC-900	OIL-500	PWR-900	AP-600
Coût de dessalement (\$/m ³)	0,6928	0,8896	0,9539	0,63084	0,6451
Δ (%)		+28	+38	-8,9	-6,9
Coût de dessalement avec E1 (\$/m ³)	0,8140	0,93276	1,1581	0,63891	0,6532
Δ (%)		+14,6	+42	-22	-20
Coût de dessalement avec E2 (\$/m ³)	1,0979	1,05976	1,4005	0,6431	0,6574
Δ (%)		-3	+28	-41	-40

- Les coûts de dessalement les plus faibles sont obtenus avec les réacteurs GT-MHR et PBMR utilisant la chaleur, virtuellement gratuite et normalement perdue à la source froide.
- De même, comparé au système CFB-900 + RO, les coûts de dessalement correspondants par REP-900 + RO et par AP-600 + RO sont respectivement 8,9 et 6,9 % plus faibles. Dans le scénario E1, ces coûts sont 22 à 20 % inférieurs. Cette différence s'élève à 40 à 41 % dans le scénario E2.
- Le coût de dessalement avec la centrale charbon + MED est 45% moindre par rapport à la centrale CC-900 dans les conditions normales. Ce même coût est 19 % moindre dans le scénario E1. Toutefois, cette tendance est inversée dans le scénario E2 puisque le coût de dessalement par le système CC-900 + MED est alors 7,8 % moindre. Pour les systèmes correspondants avec RO, ces écarts sont respectivement de +28, +14,6 et - 3 %.
- Pour toutes les combinaisons, les coûts de dessalement par RO sont de 25 à 40 % plus faibles que ceux par les systèmes correspondant avec MED.
- Le coût de dessalement par les réacteurs nucléaires serait de 10 à 80 % inférieur à celui de l'option conventionnelle la plus économique : la centrale à charbon avec lit fluidisé circulant.
- L'internalisation des coûts externes fait très fortement augmenter l'écart en faveur de l'énergie nucléaire.

Références

- 1 MACOUN A., *Alleviating Water Shortages - Lessons from the Middle East*, The International Desalination and Water Reuse Quarterly, Vol. 10/2 (2000).
- 2 International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC, *Economics of Nuclear Desalination - New Developments and Site Specific Studies*, (en cours de publication)
- 3 International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-N°1186, *Examining the Economics of Seawater Desalination, using the DEEP code*, (2000).
- 4 International Atomic Energy Agency, *AP-600 reactor System Description and Development Status*, IAEA-TECDOC N° 881 (1996).
- 5 International GT-MHR Project Design Review, St Germain-en-Laye (France), June 28-30 (1999).
- 6 LECOMTE M., GAUTHIER J.-C., BILLOT PH., *The FRAMATOME-ANP Near Term Concept and its Longer Term Development Perspective*, 13th ICONE Conference, Beijing, China (2005).
- 7 KHAN A.H., *Desalination Processes and Multistage Flash Distillation Practice*, Elsevier (1986).
- 8 BUROS O.K., *The Desalting ABC's*, Research Department, Saline Water Conversion Corporation of Riyadh, Saudi Arabia (1990).
- 9 DARDOUR S., NISAN S., *Utilisation of Waste Heat from the GT-MHR and the PBMR for Seawater Desalination*, *Desalination*, 205, 254-268, (2007).
- 10 HUMPHRIES J.R., DAVIES K., ACKERT J., *An Advanced Reverse Osmosis Technology for Applications in Nuclear Installations*, ICAPP Meeting, Hollywood, Florida, USA, June 10-13 (2002).
- 11 NISAN S., COMMERÇON B., DARDOUR S., *A New Method for the Treatment of a Reverse Osmosis Process with Preheating of the Feedwater*, *Desalination*, 182, 485-49 (2005).
- 12 NISAN S., CARUSO G., HUMPHRIES J.R., MINI G., NAVIGLIO A., BIELAK B., ASUAR ALONSO O., MARTINS N., VOLPI L., *Seawater desalination with nuclear and other energy sources*, *Nuclear Engineering & Design*, 221, 251-275 (2003).
- 13 NISAN S., DARDOUR S., DUMONT Y., REGUIGUI N., *Inter-regional Collaborative Nuclear Desalination Studies by France and Tunisia*, *Int. J. Nuclear desalination*, Vol 1, 308-324, (2004).

Simon Nisan

CEA, DER/SESI, CEN Cadarache, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France

Conclusions

Dans les pays en voie de développement, les demandes en électricité sont et seront presque 2,5 fois plus fortes que dans les pays développés.

Il s'avère que la plupart des pays en voie de développement souffrent également d'une pénurie d'eau. C'est pourquoi il est fort probable que les systèmes intégrés de dessalement de l'eau de mer (produisant simultanément l'électricité et eau) soient intensivement déployés dans ces pays.

Une stratégie future de dessalement fondée sur l'utilisation des énergies d'origine fossile ne peut pas être durable, non seulement parce que les réserves en combustibles fossiles sont limitées, mais également parce que l'utilisation de ces combustibles conduirait à une production massive de gaz à effet de serre, et donc à des catastrophes environnementales inacceptables.

Dans ce contexte, l'utilisation de l'énergie nucléaire et, pour des productions décentralisées et en plus faibles quantités, des énergies renouvelables devient une condition *sine qua non* pour un développement durable.

Le retour d'expérience des réacteurs nucléaires, couplés aux procédés de dessalement, ainsi que les résultats de plusieurs études technico-économiques indiquent que :

- Il n'y a aucune contrainte technique à l'utilisation de réacteurs nucléaires pour le dessalement de l'eau de mer.