

UTILISATION DE L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE POUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

Dans de nombreux pays, les ressources hydrauliques ne sont pas assez importantes pour satisfaire la demande créée par la poussée démographique, le relèvement des niveaux de vie et les besoins croissants de l'industrie; c'est pourquoi les possibilités de dessalement de l'eau de mer à l'échelle industrielle suscitent un intérêt grandissant. L'AIEA étudie en ce moment le problème de l'utilisation de l'énergie d'origine nucléaire pour le dessalement de l'eau de mer, en tenant compte notamment des besoins des pays en voie de développement.

Le Président des Etats-Unis, M. Johnson, a déclaré récemment que les Etats-Unis souhaitaient coopérer avec d'autres pays soucieux de remédier à l'insuffisance des ressources hydrauliques, dans le cadre d'un programme général visant à mettre en commun les données d'expérience et les connaissances dans ce domaine important. L'Agence internationale de l'énergie atomique devrait jouer un rôle de premier plan dans ce programme, a déclaré le Président.

Différentes études techniques et économiques ont été entreprises dans plusieurs pays par d'autres organisations. Le dessalement des eaux saumâtres, par distillation ou au moyen d'autres procédés, est connu de longue date, mais il n'est généralement pratiqué qu'à petite échelle et son prix de revient est relativement élevé. A l'heure actuelle, la principale question qui se pose est de savoir s'il serait possible d'obtenir des résultats beaucoup plus économiques en développant considérablement l'échelle des opérations et en faisant appel aux techniques les plus modernes.

La question revêt une urgence particulière pour les régions arides. C'est à la suite d'une demande présentée par la Tunisie, après la session de 1962 de la Conférence générale, que l'Agence a entrepris une série d'études. En mars 1963, un groupe d'experts s'est réuni à Vienne sous la présidence de M. J. K. Carr, Sous-Secrétaire au Ministère de l'intérieur des Etats-Unis, pour étudier comment l'Agence pourrait le mieux aider les pays en voie de développement à utiliser l'énergie d'origine nucléaire pour le dessalement de l'eau de mer. A la suite de cette réunion, un fonctionnaire de l'Agence s'est rendu en Tunisie avec une mission de l'ONU et un autre groupe d'étude a été convoqué en septembre 1963. Cette deux-

ième réunion a été présidée par M. Carr et M. J. T. Ramey, membres de la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis. Des experts appartenant à onze pays, ainsi qu'à l'Organisation des Nations Unies et à l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture y ont participé. Le groupe a examiné les données techniques du problème, en particulier les méthodes de traitement de l'eau et les types de réacteurs.

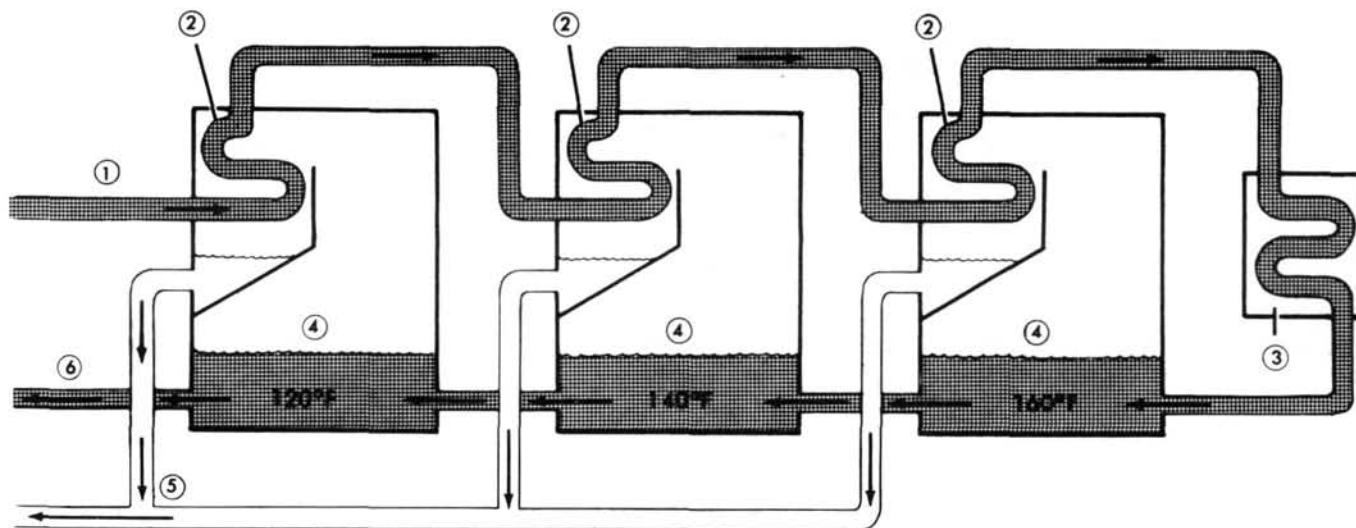
Procédés de purification

L'énergie atomique n'est évidemment que l'une des différentes sources de chaleur ou d'électricité qui peuvent être utilisées pour faire fonctionner des usines de dessalement de l'eau de mer. Le choix de la source est surtout une question d'ordre économique. Quant à l'usine de dessalement proprement dite, elle peut appartenir à diverses catégories, dont certaines utilisent l'énergie thermique et d'autres l'énergie électrique.

Le procédé de purification le plus courant est la distillation au moyen de vapeur. Deux procédés sont déjà appliqués dans de grandes installations industrielles, mais on leur apporte actuellement des améliorations techniques considérables qui réduiront le prix de revient de l'eau traitée. Par distillation, on obtient de l'eau titrant quelques dizaines de ppm en sels. Cette eau est utilisable dans l'industrie sans autre traitement. Par exemple, dans le cas d'une usine qui produira 5 millions de gallons d'eau par jour en utilisant le procédé par évaporation "flash", les dépenses d'investissement sont actuellement évaluées à 80 cents par gallon; si le combustible coûte 35 cents par million de BTU, le prix de revient de l'eau sera d'environ 65 cents pour 1 000 gallons.

Un autre procédé d'évaporation important est la distillation à effets multiples, au moyen de longs tubes verticaux. Les installations utilisant ce procédé sont plus sensibles aux effets de la corrosion, ce qui limite les températures maxima auxquelles elles peuvent fonctionner, et par conséquent leur capacité de production.

Dans le procédé par compression de vapeur, l'eau de mer est d'abord portée à ébullition. La vapeur obtenue est comprimée, ce qui élève légèrement sa température; en se reconduisant, elle dégage de



DISTILLATION « FLASH »

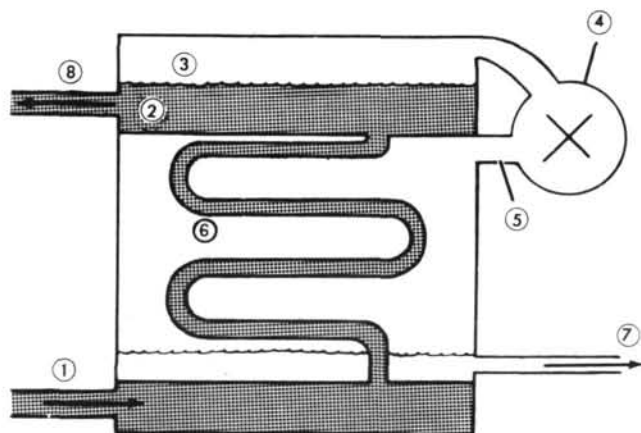
1. Eau salée; 2. Condenseur; 3. Echauffeur; 4. Vapeur « flash »; 5. Eau douce; 6. Saumure.

De l'eau à une température et une pression données passe dans une chambre où la pression est légèrement inférieure; il se produit une évaporation instantanée et la vapeur est ensuite condensée. Une installation de dessalement sous vide à plusieurs étages fonctionne selon le principe suivant: de l'eau salée est portée progressivement à une température d'environ 82° C; elle passe ensuite successivement dans plusieurs chambres dont chacune accuse un vide légèrement plus poussé que la précédente. La vapeur qui se forme à chaque étage se condense au contact des tubes où circule l'eau salée d'alimentation et s'écoule sous forme d'eau douce.

COMPRESSION DE VAPEUR

1. Eau salée; 2. Eau salée en ébullition; 3. Vapeur à 100° C; 4. Compresseur; 5. Vapeur sous pression à 105° C; 6. Vapeur en voie de condensation; 7. Eau douce; 8. Saumure.

De l'eau salée est portée à ébullition sur un côté d'une barrière de transfert de chaleur du type tubulaire, par exemple. La vapeur passe dans un compresseur qui augmente sa pression d'environ 0,21 kg/cm² et sa température d'environ 5° C. La vapeur surchauffée passe alors sur l'extérieur du tube d'eau où sa chaleur latente de condensation fait évaporer une quantité supplémentaire d'eau dans le tube. La vapeur condensée est évacuée de l'échangeur de chaleur sous forme d'eau distillée.



la chaleur qui permet d'évaporer une plus grande quantité d'eau de mer. Ce procédé semble prometteur, mais il faudra attendre encore quelque temps avant de pouvoir en évaluer toutes les possibilités. Il en est de même du procédé par congélation, qui a été mis à l'épreuve avec succès dans de nombreuses installations pilotes et fera l'objet d'autres essais dans une usine de démonstration, en cours de construction en Caroline du Nord.

Le principal procédé utilisant l'énergie électrique est l'électrodialyse, dans lequel les sels sont séparés à l'aide de membranes semi-perméables sous l'effet d'un courant électrique. Ce procédé a déjà fait ses preuves, mais la demande de membranes est encore faible et leur prix est donc élevé. Le coût du dessalement de l'eau par ce procédé dépend de la quantité de sels contenue dans l'eau et de leur nature. La conductibilité des eaux salées devient très faible lorsque la teneur en sels est inférieure à 500 ppm et il serait très coûteux d'obtenir avec ce procédé de l'eau ayant une moindre teneur en sels. En outre, l'électrodialyse n'élimine pas les matières organiques souvent présentes dans l'eau. Elle a pour avantage de pouvoir être utilisée avec des courants

d'intensité variable, ce qui permet une grande souplesse d'application.

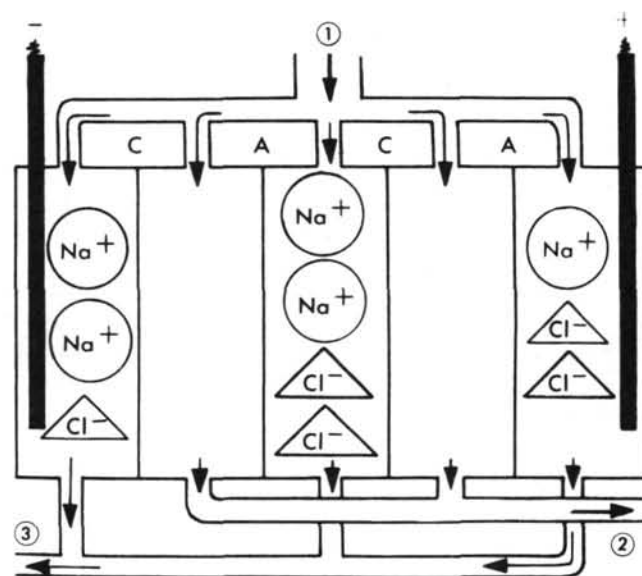
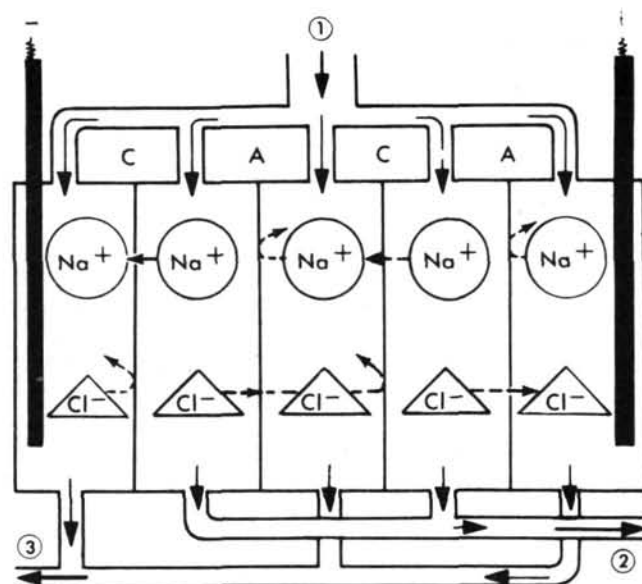
Utilisation des réacteurs

Parmi ces différents procédés, celui de l'évaporation "flash" a été développé de façon plus intense que les autres et donne actuellement les meilleurs résultats. Il permet en outre de retirer un avantage économique important des capacités élevées imposées par l'emploi de réacteurs nucléaires. Le prix de revient unitaire de l'énergie d'origine nucléaire baisse à mesure que l'échelle des opérations augmente; aussi la tendance est-elle vers les grandes installations de dessalement.

Des réacteurs de puissance, du type de ceux qui servent déjà à produire de l'électricité, pourraient être utilisés par les procédés de purification décrits ci-dessus, mais l'expérience acquise à ce jour montre que ces réacteurs sont d'un prix de revient trop élevé. Pour les procédés de distillation - qui conviennent le mieux pour le traitement de l'eau de mer - il suffit de disposer de vapeur à basse pression. On pourrait mettre au point des réacteurs d'un fonctionnement plus économique spécialement destinés à fournir cette vapeur à basse pression, mais on aurait à résoudre de grands problèmes d'échanges thermiques. Les économies réalisées grâce à ces réacteurs ne seraient pas suffisantes pour justifier les dépenses de mise au point, en particulier dans la gamme de puissances qui intéresse les pays en voie de développement.

La vapeur basse pression la plus économique est obtenue par détente de vapeur haute pression dans une turbine; ceci explique l'intérêt d'installations mixtes produisant à la fois de l'énergie électrique et de l'eau douce. La Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis, par exemple, a étudié le prix de revient de la chaleur fournie à une usine de dessalement par un réacteur à eau légère et uranium enrichi. Pour un réacteur de 1 500 MWt utilisé seulement pour le dessalement de l'eau, ce prix de revient est évalué à 33 cents par million de BTU. Si le réacteur produit également de l'électricité, ce prix de revient tombera vraisemblablement à 20 cents.

On peut associer à toute turbine à condensateur une installation de traitement des eaux salées utilisant de la vapeur basse pression. Une certaine quantité d'eau dessalée peut être ainsi produite sans modifier sensiblement les caractéristiques initiales de l'installation. Cette eau est obtenue au meilleur prix possible, l'énergie pouvant être considérée comme fournie gratuitement. La quantité d'eau produite dans ces conditions est toutefois limitée et dépend de la température d'entrée de la vapeur dans la turbine.



ELECTRODIALYSE

1. Eau salée; 2. Eau douce; 3. Saumure.

Lorsqu'un courant électrique traverse une solution saline, les cations se déplacent vers la cathode et les anions vers l'anode. Des membranes composées de feuilles en matière échangeuse de cations ou d'anions laissent passer les cations ou les anions respectivement. Lorsqu'on intercale entre les électrodes une série alternée de membranes perméables aux cations et aux anions, les anions traversent la membrane qui les laisse passer mais sont arrêtés par la suivante qui n'est perméable qu'aux cations. Il en sera de même pour les cations qui se déplacent dans le sens opposé. Ainsi, les anions et les cations se rassemblent et se combinent dans un compartiment sur deux où l'eau s'enrichit en sel tandis que dans les autres compartiments la salinité diminue. (Le présent schéma et les deux schémas précédents sont extraits de McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology. Copyright 1960 McGraw-Hill Book Co. Ils sont reproduits avec l'autorisation de l'auteur.)

Pour une installation mixte utilisant le procédé par évaporation "flash", le rapport optimum de production est de l'ordre de 1 gallon pour 1 kWh. Les dépenses d'investissements de la centrale initiale ne sont alors augmentées que de 8 % pour une capacité de plusieurs millions de gallons par jour.

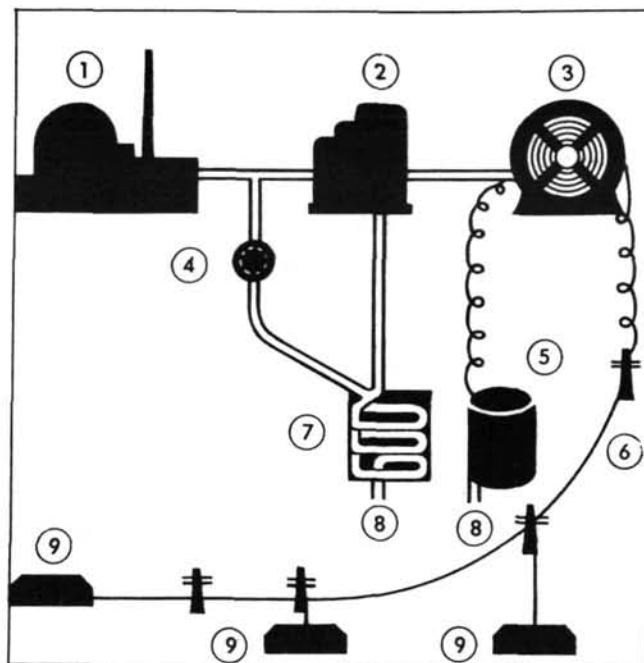
Installations mixtes

Lorsque les productions d'eau et d'électricité sont indépendantes des fluctuations saisonnières ou journalières de la demande, le problème de l'optimisation d'une installation mixte est relativement simple. Les réacteurs nucléaires étant favorisés par des facteurs de charge et des capacités de production élevés, leur emploi dans les installations mixtes dépendra étroitement de la flexibilité de ces installations, c'est-à-dire de la possibilité offerte par les divers procédés de dessalement de compenser les fluctuations de la demande de courant électrique et de maintenir ou accroître le facteur de charge de l'usine productrice de vapeur. Les combinaisons de divers procédés de dessalement consommant des énergies différentes sont nombreuses. Leur nombre augmente encore si l'on tient compte des possibilités de stockage de l'eau et de transport de l'énergie électrique.

Pour augmenter la flexibilité, il faut accroître les investissements; en effet, certains organes de l'installation ne fonctionnent à plein rendement que pendant une partie du temps. Pour ces installations, il faut donc envisager les procédés nécessitant les investissements les plus bas. Même les installations mixtes utilisant une seule catégorie de procédé offrent déjà une certaine souplesse; selon la catégorie, on cherche à assurer une demande continue de vapeur ou d'électricité.

Le schéma représente une installation utilisant le procédé par évaporation "flash". Lorsque la demande d'électricité diminue, une partie de la vapeur haute pression peut être envoyée directement à l'usine de dessalement après passage dans un clapet de détente. Moyennant une construction appropriée, la production journalière d'eau pourrait être adaptée à la demande et on pourrait assurer une charge pratiquement constante à la source d'énergie thermique.

L'électrodialyse offre la possibilité d'une mise en route très rapide de l'usine de dessalement. Pouvant fonctionner avec des densités de courant variées, elle permet une utilisation très souple de la puissance disponible. En outre, étant donné que ce procédé utilise, non pas la chaleur, mais de l'électricité - énergie facilement transportable - l'usine de dessalement peut être placée géographiquement au point qui présente pour l'eau les conditions de distribution les plus économiques. On pourrait envisager plusieurs usines de traitement dispersées selon les be-



- 1 REACTEUR OU CHAUDIERE
- 2 TURBINE
- 3 ALTERNATEUR
- 4 VANNE DE DILATATION
- 5 ELECTROLYSE OU COMPRESSION DE LA VAPEUR

- 6 RESEAU D'ALIMENTATION
- 7 INSTALLATION DE DISTILLATION
- 8 EAU DOUCE
- 9 INSTALLATIONS DE DESSALEMENT DE L'EAU

soins de la région; cependant, dans ce cas, on renoncera à l'avantage économique que présente les installations de forte capacité.

D'autres procédés pourront offrir diverses possibilités dans le domaine de la flexibilité des installations mixtes; cependant, une grande flexibilité entraîne des investissements supplémentaires et une baisse de rendement de certaines parties de l'installation. Il faudra donc étudier chaque cas particulier.

Types de réacteurs

Dans les installations mixtes, on utilisera des réacteurs de puissance de types éprouvés. A l'heure actuelle, le choix devrait porter sur l'une des filières suivantes : eau légère/uranium enrichi, eau lourde/uranium naturel et gaz-graphite/uranium naturel. Il ressort des études entreprises dans plusieurs pays que les réacteurs à eau légère sont les seuls qui puissent rivaliser avec les centrales thermiques classiques pour des puissances de l'ordre de 100 MWt. Les deux autres filières - eau lourde/uranium naturel et gaz-graphite/uranium naturel - ne peuvent être envisagées que pour des installations de capacité nettement supérieure.

Le ralentisseur des réacteurs à eau lourde est généralement refroidi par circulation dans un échangeur; le plus souvent, l'énergie ainsi évacuée n'est

pas récupérée. Une légère pressurisation du ralentisseur permet à celui-ci d'atteindre une température suffisamment élevée pour qu'il puisse être utilisé comme source d'énergie d'une usine de distillation. La récupération de quelques pour cent de la puissance thermique du réacteur constitue un avantage appréciable.

Des études sur les réacteurs gaz-graphite/uranium naturel semblent indiquer qu'une installation mixte utilisant un réacteur de 1 000 MWt pourrait avoir une puissance électrique nette de 200 MW et une production d'eau de 80 millions de gallons par jour; dans ce cas, le coût du kWh serait de 6,4 mills et le coût de l'eau dessalée de 0,41 mill le gallon.

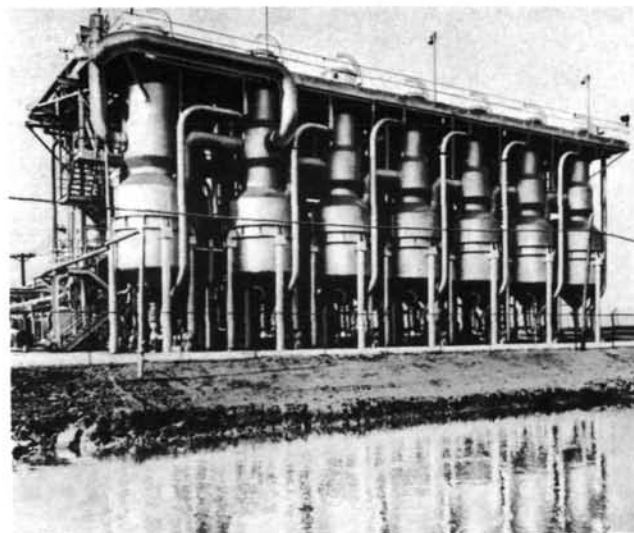
La plus grande génératrice nucléaire actuellement en construction a une puissance de 3 000 MWt; cette installation pourrait produire de l'eau à des fins domestiques et industrielles à un prix qui lui permettrait de soutenir la concurrence de nouvelles sources d'approvisionnement dans des régions où une pénurie d'eau commence à se faire sentir: Paris ou Manchester. On a pu établir par extrapolation des estimations de coût très intéressantes pour des réacteurs beaucoup plus puissants, mais on ne saurait en faire état tant qu'elles n'auront pas été étayées par l'expérience. De toute façon, ce qui intéresse actuellement les pays en voie de développement, ce sont les réacteurs dans la gamme de 200 à 1 000 MWt.

Etudes nécessaires

Les réacteurs mentionnés appartiennent à des filières bien établies. Cependant, dans chaque filière, la puissance thermique, les caractéristiques thermodynamiques, les conceptions technologiques et les combustibles nucléaires changent avec chaque réacteur. Des économies considérables pourront être réalisées le jour où une certaine normalisation des réacteurs et de leurs combustibles permettra de répartir les frais d'étude et d'équipement.

Il y aurait lieu d'entreprendre des études techniques et économiques sur les installations à double fin, en vue de déterminer les meilleures possibilités d'installations et de régimes de marche. Il faudrait notamment procéder à une étude complète des installations mixtes, classiques et nucléaires, qui porterait sur le bilan thermodynamique de ces installations, leur flexibilité et leur "optimisation" économique. Il faudrait ensuite construire des usines de démonstration de dimension moyenne, car c'est là le seul moyen d'obtenir une base économique sûre pour l'avenir. Une installation mixte de démonstration de plus grande taille pourrait faire l'objet d'un projet international.

Lorsqu'on envisage des usines de dessalement de l'eau pour des régions arides ou semi-arides, il est manifestement préférable d'étudier le problème



A Freeport, Texas (Etats-Unis), cette installation pilote transforme l'eau de mer en eau douce au rythme de 1 million de gallons par jour. Elle utilise de l'énergie de source classique et applique le procédé de distillation à effets multiples. Il s'agit de l'une des installations pilotes utilisant plusieurs systèmes; elle a été construite dans le cadre d'un programme à long terme pour la conversion de l'eau salée, patronné par le Gouvernement des Etats-Unis. (Photo U.S. Information Service)

pour une vaste zone, et non pour tel ou tel centre de population considéré isolément. Si la région aride considérée est partagée entre plusieurs pays, les Etats intéressés auraient intérêt à rechercher en commun la solution de leurs problèmes d'énergie et d'eau.

Pour ce qui est des zones arides des pays en voie de développement, il semble ressortir des études préliminaires faites par l'Agence que l'électricité actuellement produite par des centrales à diesel revient relativement cher et que les installations mixtes électricité/eau fourniraient probablement de l'électricité à meilleur compte. Il semble raisonnable de supposer que le prix de l'électricité ainsi produite pourrait être suffisamment inférieur au prix actuel pour justifier un développement de l'électrification, alors même qu'une certaine proportion de ce prix servirait à subventionner l'eau. Il faut aussi considérer que cette combinaison électricité/eau produirait de l'eau moins cher, ce qui permettrait aux gouvernements de distribuer plus d'eau pour la même subvention.

Applications futures

Les perspectives immédiates d'utilisation d'eau dessalée pour l'agriculture ne sont pas très encourageantes. Actuellement, la plupart des réseaux d'irrigation sont subventionnés; souvent les investisse-

ments sont à la charge de l'Etat, tandis que le prix payé par le cultivateur couvre à peine les frais d'exploitation. Après avoir étudié de nombreux cas dans le monde et en supposant que les gouvernements puissent subventionner à 40 % l'eau d'irrigation, l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture est arrivée à la conclusion suivante :

"Mis à part quelques cas très spéciaux, il ne sera pas possible d'envisager, sur une base économique, l'emploi d'eau dessalée pour l'irrigation tant que son coût de production, sans subvention, restera supérieur à 10 cents par 1 000 gallons. Ce ne sera que lorsque le coût de cette eau sera tombé à environ 3 cents les 1 000 gallons que l'emploi de l'eau dessalée pour l'agriculture pourra se développer à très grande échelle."

La demande d'énergie des régions agricoles est très faible et l'irrigation seule exige environ 1 kWh pour 1 000 gallons d'eau distribuée au consommateur. De plus, l'emploi d'eau dessalée pour l'agriculture nécessitera des méthodes spéciales dont la mise au point demandera sans doute beaucoup de temps. Il serait très utile que des secteurs pilotes de 10 à 20 ha soient aménagés au voisinage des premières installations mixtes. Par la suite, un secteur pilote plus important - 1 000 ha environ - constituerait une étape indispensable avant de se lancer dans des entreprises à grande échelle.

Les renseignements que l'Agence a pu recueillir sur le Sud tunisien indiquent que le dessalement de l'eau de mer par les procédés actuels y est praticable et qu'il serait possible de réaliser des économies importantes en combinant le dessalement et la production d'énergie ; il est probable que la source d'énergie pourrait être un réacteur nucléaire.

A en juger par les données dont on dispose, il ne semble pas que l'on puisse utiliser les procédés de dessalement à des fins d'irrigation - si ce n'est dans des circonstances exceptionnelles, par exemple lorsqu'il existe une forte demande d'électricité à un prix suffisamment élevé pour subventionner la production d'eau. En revanche, les possibilités d'utilisation à des fins industrielles et domestiques augmenteront certainement, surtout lorsque la distribution de courant électrique est susceptible d'une grande expansion. A l'avenir, le recours à de grandes installations jouera sans doute en faveur de l'énergie d'origine nucléaire, mais l'intégration de centrales nucléaires très puissantes dans les réseaux électriques ne sera justifiée que si le facteur de charge est suffisamment élevé. Comme on peut s'attendre à une augmentation toujours croissante de la demande d'électricité et à des progrès technologiques constants dans le domaine nucléaire, il y a tout lieu de croire que l'énergie d'origine nucléaire finira pas jouer un rôle important dans la mise en valeur des ressources hydrauliques.