

Les applications de la chaleur nucléaire dans le monde

par Juergen Kupitz et Milan Podest

Il y a déjà longtemps que l'énergie nucléaire contribue largement à la production d'électricité dans de bonnes conditions de sûreté et de fiabilité et elle offre aujourd'hui d'excellentes perspectives pour l'approvisionnement général en énergie dans l'avenir.

La plus grande partie de l'énergie primaire est actuellement consommée dans le monde sous forme de chaleur utilisée par les différentes branches de l'industrie ou pour le chauffage urbain. Les pays industrialisés consomment aujourd'hui environ 70% de leur énergie primaire sous forme de chaleur et 30% seulement sous forme d'électricité.

Les réacteurs nucléaires pourraient fournir de l'énergie thermique et aider ainsi à remplacer les combustibles fossiles, ce qui est une nécessité vu les pénuries probables, la hausse des prix et l'incertitude des approvisionnements à longue échéance.

D'une façon générale, la chaleur est utilisée à deux niveaux de température:

- la chaleur à basse température, sous forme d'eau chaude ou de vapeur de basse qualité pour le chauffage urbain, le dessalement, et d'autres fins;
- la chaleur à haute température, comprenant la vapeur utilisée à des fins industrielles (production de l'aluminium, industrie chimique) ou la chaleur à haute température utilisée pour la conversion des combustibles fossiles, la production d'hydrogène, etc.

Divers types de réacteurs sont capables de produire de la chaleur à ces niveaux de température. Les réacteurs refroidis à l'eau (eau légère et eau lourde) peuvent produire de l'eau chaude ou de la vapeur atteignant 300°C. Les réacteurs refroidis par un gaz — hélium ou anhydride carbonique — peuvent produire de la vapeur jusqu'à 540°C et les réacteurs à haute température refroidis par un gaz et ralentis au graphite peuvent produire de la chaleur industrielle atteignant 950°C*.

La chaleur à basse température: applications actuelles

Le chauffage à l'aide de chaleur nucléaire à basse température est techniquement réalisable dans la pratique et pourrait être offert au public, soit à l'aide de réacteurs de puissance produisant de l'électricité et de la vapeur, soit à l'aide de centrales nucléaires spéciales produisant de la chaleur à basse température.

M. Kupitz et M. Podest sont des fonctionnaires de l'Agence, membres de la Division de l'énergie d'origine nucléaire.

* On trouvera dans le compte rendu de la réunion du Comité technique sur les applications de la chaleur nucléaire, Cracovie, 5-9 décembre 1983 — publié par l'AIEA en septembre 1984 — une description détaillée de la technologie actuelle des réacteurs nucléaires produisant de la chaleur industrielle et des applications de celle-ci.

Les études économiques sur l'utilisation de la chaleur des réacteurs à eau légère ont montré que les centrales nucléaires peuvent servir, en principe, à la production de chaleur à basse température pour des usages industriels ou pour le chauffage urbain. Ces centrales présentent néanmoins un inconvénient, à savoir que, pour des raisons de sûreté, elles doivent être situées suffisamment loin des zones densément peuplées, ce qui augmente les coûts de distribution.

En Tchécoslovaquie et en Finlande il existe un système très étudié pour extraire et distribuer aux fins de chauffage urbain la chaleur produite par les centrales nucléaires (en exploitation, en construction ou en projet) équipées des réacteurs à eau sous pression WWER-440 ou WWER-1000 de fabrication soviétique. Des plans pour l'utilisation de la chaleur extraite de ce type de réacteur sont à l'étude en Hongrie, en République démocratique allemande et en Yougoslavie. L'extraction de la chaleur pour le chauffage urbain a été réalisée en Union Soviétique avec de bons résultats à la centrale mixte de Bilibino; cette installation est en exploitation depuis près de 10 ans.

Comme on vient de le dire, l'implantation de centrales nucléaires assez loin des grandes agglomérations, motivée par des considérations de sûreté, peut avoir un effet négatif sur l'économie de l'approvisionnement en chaleur. Cela dit, plusieurs projets montrent que des distances de l'ordre de 30 à 40 kilomètres sont tout à fait satisfaisantes. On relève une exception en Finlande où une étude est en cours sur l'utilisation éventuelle du futur réacteur WWER-1000 de Loviisa pour produire de la chaleur qui sera transportée sur 80 kilomètres. Les calculs ont montré que cette solution serait encore économiquement compétitive par rapport à la production de chaleur par une centrale au charbon.

Centrales nucléo-thermiques

Une autre solution du problème de l'approvisionnement en chaleur nucléaire, en particulier pour le chauffage urbain, consiste à recourir à des centrales nucléo-thermiques spécialisées. Si l'on considère le rendement et l'économie, il faut implanter ces centrales aussi près que possible des centres de peuplement, mais il faut aussi, bien entendu, prendre par ailleurs toutes mesures possibles pour assurer la sûreté. C'est pourquoi la formule de la sûreté intrinsèque des réacteurs présente un intérêt tout particulier pour cette application. Au niveau de la conception, la condition essentielle de cette sûreté intrinsèque est de faire en sorte qu'il soit techniquement impossible que le cœur du réacteur fonde, quelles que puissent être les conditions d'exploitation.

C'est à partir de ces principes que la centrale nucléo-thermique AST-500 a été mise au point en Union Soviétique; ce type de centrale est actuellement en construction

à Gorki et à Voronej. Les diverses unités sont d'assez grande taille et peuvent répondre à la demande de chaleur de plusieurs régions de l'Union Soviétique. L'étude estimative de la quantité de chaleur nécessaire à l'ensemble de l'économie soviétique a mené à la conclusion que 600 centrales nucléo-thermiques de 1000 mégawatts chacune suffiraient à répondre aux besoins du pays. La construction de centrales du type AST-300 (dérivé du type soviétique AST-500) est prévue pour assurer le chauffage urbain de deux villes de Tchécoslovaquie vers 1995.

Une étude entreprise en Suède a abouti au réacteur Secure prévu pour fonctionner à faible densité de puissance, à faible température et à basse pression. L'arrêt du réacteur dans des conditions de sûreté et un refroidissement fiable du cœur sont les caractéristiques essentielles de ce prototype en ce qui concerne la sûreté. Ces fonctions sont assurées selon un principe spécial appelé PIUS.

En France, on envisage d'utiliser un réacteur à eau sous pression, le CAS-300, pour la production de chaleur, mais il n'a pas encore été décidé de passer à la réalisation pratique de cette application.

Au Canada, l'Energie atomique du Canada a mis au point, pour le chauffage urbain, un petit réacteur piscine de 2 à 20 mégawatts thermiques, baptisé Slowpoke-3, dérivé du réacteur expérimental Slowpoke-2. Six unités de ce dernier type sont installées dans des villes canadiennes; ils sont autorisés pour fonctionner par télé-commande, sans surveillance directe. La formule à basse température a l'avantage de la simplicité, de la sûreté et d'un faible coût, et les unités de petite taille sont mieux adaptables au marché vaste mais dispersé du chauffage urbain.

Un excellent exemple d'application de la chaleur nucléaire à des fins industrielles est le système canadien de distribution de vapeur de Bruce. Depuis plus de 10 ans, de la vapeur à moyenne pression destinée à l'usine d'eau lourde voisine est fournie par les réacteurs Candu. En 1988, huit réacteurs de ce type seront en exploitation sur le site, chacun pouvant produire 800 mégawatts électriques et de la vapeur industrielle jusqu'à 13% de sa puissance nominale totale.

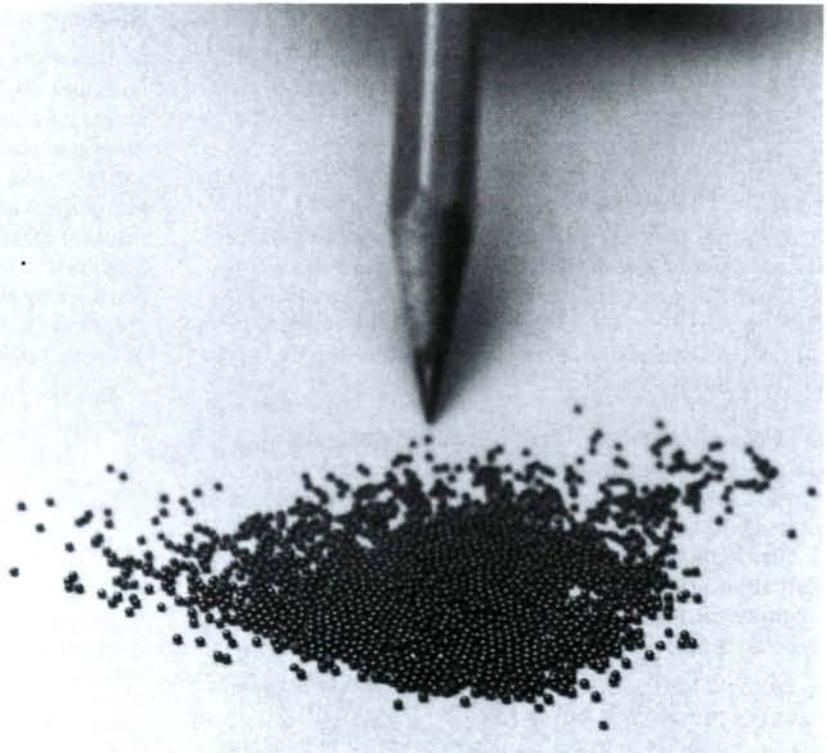
En République fédérale d'Allemagne, la centrale nucléaire Stade, de la Nordwestdeutsche Kraftwerke AG, fournit depuis la fin de 1963 60 tonnes/heure de vapeur à 270°C sous une pression de 8 bars. Environ 95% de la vapeur, qui est transportée par une conduite sur un circuit d'environ 1,5 kilomètre, revient à la centrale sous forme de condensat. Cette vapeur est plus économique que celle qui serait fournie par une installation classique au mazout.

Le seul exemple de réacteur rapide utilisé pour produire de l'électricité et de la chaleur industrielle est le réacteur BN-350 de Chevtchenko, en Union Soviétique. Ce réacteur produit 120 mégawatts électriques, tandis que la plus grande partie de sa chaleur est extraite du troisième circuit pour alimenter une installation de dessalement de l'eau de mer qui fournit 50 000 mètres cubes d'eau distillée par jour.

Applications actuelles des hautes températures

Les applications de la chaleur nucléaire à haute température relèvent de deux techniques fondamentalement différentes: l'utilisation de la vapeur jusqu'à des températures de l'ordre de 540°C et l'utilisation directe de la chaleur transmise par un échangeur, jusqu'à des températures de l'ordre de 950°C.

Pour que les approvisionnements en chaleur et en énergie soient moins dépendants des combustibles fossiles, on met au point des réacteurs à haute température refroidis par un gaz, destinés à produire de l'électricité et de la chaleur industrielle jusqu'à 950°C à partir de grains combustibles à l'uranium/thorium enrobés. A droite, les grains combustibles; ci-dessous, leur fabrication. (Photos GA Technologies, Inc.)



La vapeur industrielle. Les réacteurs refroidis par un gaz dont le circuit primaire de refroidissement atteint des températures de 650°C, dans les réacteurs poussés, à 750°C dans les réacteurs à haute température, et même plus, peuvent produire de la vapeur industrielle de qualité comparable à celle que l'on obtient des générateurs chauffés au mazout, soit, par exemple, de la vapeur à 540°C sous une pression de 180 bars. Cette vapeur de haute qualité convient parfaitement à un certain nombre d'opérations industrielles et chimiques. Parmi ces applications, on peut citer les suivantes:

- production d'aluminium
- fabrication d'aciers
- industrie chimique
- récupération d'hydrocarbures
- traitement des schistes bitumineux
- traitement des sables bitumineux
- gazéification du charbon par les procédés Lurgi ou Exxon.

Ces procédés, fondés sur la technologie actuellement en usage, sont alimentés en vapeur par des générateurs à combustible fossile. La plupart de ces procédés à forte consommation d'énergie exigent des quantités considérables de vapeur et d'énergie électrique; la production mixte de vapeur et d'électricité devient économique lorsqu'il s'agit de répondre à une telle demande.

Les réacteurs refroidis par un gaz conviennent bien à cette production mixte, car ils peuvent fournir une vapeur de haute qualité qui peut, soit être utilisée directement dans un procédé industriel, soit être détendue dans un turbo-alternateur, avec soutirage de vapeur industrielle.

Au Royaume-Uni, plusieurs réacteurs poussés refroidis par un gaz, destinés à la production d'électricité, sont en exploitation ou à un stade avancé de leur construction, tandis qu'aux Etats-Unis d'Amérique et en République fédérale d'Allemagne les réacteurs à haute température refroidis par un gaz sont sur le point d'apparaître sur le marché.

Aux Etats-Unis, le prototype de Fort St. Vrain destiné à la production d'électricité fonctionne depuis 1976, alors qu'en République fédérale d'Allemagne le réacteur à haute température au thorium, également destiné à la production d'électricité, fera ses premiers essais en puissance au début de 1985.

Dans ces deux pays, les réacteurs à haute température refroidis par un gaz ont été conçus pour produire à la fois de la vapeur industrielle et de l'électricité. Aux Etats-Unis, par exemple, on a fait plusieurs études qui indiquent un vaste marché potentiel pour la coproduction de vapeur industrielle et d'électricité.*

La chaleur industrielle. Les progrès de l'étude des réacteurs à haute température refroidis par un gaz ont mené, dans plusieurs pays — notamment l'Autriche, les Etats-Unis, la France, le Japon, la République fédérale d'Allemagne et l'Union Soviétique — à des recherches sur l'application de la chaleur à haute température produite par ces réacteurs à la gazéification du lignite et des charbons durs.

La gazéification directe du charbon exige de la chaleur à des températures de 800 à 950°C. L'emploi de la chaleur nucléaire pour cette opération réduit la consom-

Incidences comparées, sur l'environnement, des centrales au charbon et des usines de gazéification

Installation	Chaleur résiduelle (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (%)	NO _x (%)	Poussières (%)
Centrale au charbon	100	100	100	100	100
Gazéification					
Autothermique	53	57	20	25	20
Vapeur industrielle nucléaire	63	31	0	0	0
Chaleur industrielle nucléaire	37	31	0	0	0

mation de charbon dans une proportion de 1,6 à 1,7 par rapport aux procédés classiques, améliore le rendement, abaisse le coût du produit final et nuit beaucoup moins à l'environnement. En particulier, la pollution par l'anhydride sulfureux, par les oxydes d'azote et par les cendres est totalement éliminée, ainsi que le montre le tableau qui accompagne cet article.

Plusieurs procédés de conversion du charbon sont envisagés. Des usines de gazéification du charbon semi-industrielles ou pilotes et traitant jusqu'à 200 tonnes de charbon par jour sont en construction ou déjà en exploitation.*

Ces opérations donnent, soit un gaz de remplacement du gaz naturel qui peut être directement distribué par le réseau du gaz en place, ou un gaz de synthèse composé d'un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz synthétique est un produit très utile pour divers procédés industriels, tels la réduction directe du minerai de fer et la production d'ammoniaque ou de carburant liquide pouvant remplacer l'essence.

Une autre application possible de la chaleur industrielle nucléaire est le transport d'énergie à longue distance par un gaz. Le principe de cette application consiste à combiner une réaction chimique endothermique (conversion par la vapeur du méthane en oxyde de carbone et hydrogène) effectuée au départ sur le site du réacteur, avec la réaction exothermique inverse (méthanation) au point de distribution de l'énergie et de la chaleur à consommer. Ainsi, l'énergie du réacteur à haute température refroidi par un gaz est transportée sous forme d'énergie chimique jusqu'au consommateur.

Des températures atteignant 600°C peuvent être obtenues par la recombinaison de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène en méthane et eau. La plupart des travaux sur ce procédé sont effectués aux Etats-Unis, en République fédérale d'Allemagne et en Union Soviétique.**

* Voir *Status of and Prospects for Gas-Cooled Reactors*, Collection Rapports techniques de l'AIEA, n° 235, avril 1984.

** On trouvera dans le rapport technique *Status of and Prospects for Gas-Cooled Reactors* une description de l'installation de démonstration EVA II/ADAM II (30 MW) à circuit fermé, pour le transport à longue distance d'énergie d'origine nucléaire, qui fonctionne au Centre d'études nucléaires de Juliers, en République fédérale d'Allemagne.

La chaleur industrielle à haute température ouvre aussi des perspectives d'application énergétique nouvelles, tel le système énergétique à intégration horizontale, fondé sur le principe de la décomposition de l'hydrocarbure d'alimentation avant la combustion. Ce procédé donne trois produits principaux (oxyde de carbone, hydrogène et oxygène) qui peuvent être recombinés dans diverses proportions pour répondre aux besoins du consommateur. L'avantage du système est que la pollution de l'environnement est négligeable, même si l'alimentation se fait en combustible fossile de basse qualité.

A long terme, on peut envisager la production d'hydrogène par la décomposition thermochimique de l'eau; la chaleur industrielle nucléaire à haute température fournit l'énergie thermique nécessaire. L'adoption à grande échelle de ce procédé, qui est étudié et expérimenté dans plusieurs laboratoires des Etats-Unis, d'Italie*, du Japon et de la République fédérale d'Allemagne, permettra de disposer d'une source d'énergie pratiquement illimitée, car l'eau et l'uranium existent en abondance.

La démonstration de la production de chaleur industrielle à haute température a été faite avec succès à l'aide du réacteur AVR, réacteur à haute température refroidi par un gaz et à lit de boulets, d'une puissance de 45 MW thermiques, qui fonctionne depuis 1967 sur le site du Centre d'études nucléaires de Juliers. Les échangeurs de chaleur nécessaires au découplage de l'hélium chaud du réacteur doivent encore être étudiés et perfectionnés avant de pouvoir être commercialisés.

Les programmes internationaux insistent maintenant davantage sur l'amélioration des matériaux métalliques pour haute température et sur la conception, la fabrication et l'épreuve des conduites et des échangeurs de chaleur des grandes boucles expérimentales à l'hélium. Des progrès remarquables ont été accomplis dans ces domaines au cours des dernières années. Des matériaux ont été mis

au point pour résister à des contraintes thermiques de 950°C. Des programmes d'essai de matériaux exécutés en République fédérale d'Allemagne en sont au point où l'on peut prévoir, pour les composants, des durées utiles de 70 000 à 100 000 heures. Des échangeurs de chaleur intermédiaires hélium/hélium de 10 MW et des régénérateurs de vapeur de 5 MW en sont à un stade avancé de construction et seront mis à l'essai en 1985.

Les résultats permettront de se prononcer sur le type et la taille des futurs prototypes d'installation à adopter pour produire de la chaleur industrielle nucléaire. En ce qui concerne la technologie de conversion du charbon, il semble qu'elle sera prête à faire son apparition sur le marché dans les années 1990.

Perspectives du recyclage

Il y a 10 ans, la crainte de voir se raréfier les ressources en pétrole et en gaz à bon marché a fortement motivé l'adoption de nouvelles techniques visant à remplacer ou à économiser ces vecteurs énergétiques. Depuis lors, le ralentissement de la croissance économique et les efforts de conservation de l'énergie ont abouti à une réduction de la demande d'énergie plus forte qu'on ne l'avait pensé. Aussi semble-t-il qu'il y ait actuellement abondance d'énergie et que la nécessité de recourir à de nouvelles techniques soit moins pressante qu'auparavant.

Il ne faut cependant pas penser seulement au présent, ou au proche avenir. Lorsque l'économie reprendra son essor, on se trouvera confronté avec une demande croissante et des pénuries possibles d'énergie. Contrairement aux hypothèses que l'on peut faire sur les ressources physiques, il est pratiquement impossible de prévoir les événements qui pourraient nuire à l'approvisionnement en énergie. Il importe donc, pour toutes les nations, de rechercher des sources d'énergie de remplacement. En ce qui concerne la sûreté des approvisionnements en énergie à l'échelon des pays et sur le plan mondial, la chaleur d'origine nucléaire pourra commencer à jouer un rôle capital à partir des années 1990.

* Au centre de recherches d'Ispra-Euratom, à Varese (Italie).