

Les applications thermiques de l'énergie nucléaire

L'avenir de la cogénération d'électricité et de chaleur

Comme l'a fait observer le Conseil mondial de l'énergie, il faut que l'offre d'énergie augmente au cours des prochaines années, en particulier dans le secteur de l'électricité, pour répondre aux besoins d'une population mondiale toujours croissante. Cela dit, les problèmes d'environnement, notamment l'effet de serre associé aux émissions d'anhydride carbonique et autres gaz dues à l'emploi des combustibles fossiles, sont loin d'être résolus, comme le pensent divers organismes, notamment le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat.

L'énergie nucléaire peut contribuer à la solution de ces problèmes. Elle est déjà une précieuse source d'énergie et présente de grands avantages sur le plan écologique. Elle assure actuellement 17% environ de la production mondiale d'électricité.

Or, toutes ses possibilités ne sont pas encore exploitées. La technologie n'a pas encore dit son dernier mot et garantira un approvisionnement suffisant en énergie grâce à la fourniture conjointe d'électricité et de chaleur pour le chauffage urbain, l'industrie, et autres usages.

La consommation d'énergie: ses particularités

Environ 30% de la quantité totale d'énergie primaire disponible dans le monde sert à produire de l'électricité. Les 70% restants servent essentiellement au transport ou à la production d'eau chaude, de vapeur et de chaleur. Le secteur non électrique, plus spécialement celui de l'eau chaude et de la vapeur, est donc relativement important.

A l'heure actuelle, au moins 24 pays utilisent l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité. Plus de 420 centrales nucléaires sont actuellement en exploitation, représentant une puissance globale de quelque 324 gigawatts électriques (GW(e)), et un peu plus de 80 installations d'une puissance totale d'environ 80 GW(e) sont en chantier. Quelques-unes

seulement de ces centrales, situées pour la plupart au Canada et en URSS, fournissent également de l'eau chaude et de la vapeur; la puissance totale utilisée à cette fin n'atteint pas 5 gigawatts thermiques (GW(th)).

Nombreuses sont les raisons de cette disparité entre l'électricité et la chaleur industrielle d'origine nucléaire: caractère fragmentaire du marché, dimension des réseaux électriques, faible coût de la production thermique par d'autres moyens et coûts élevés du transport et de la distribution.

Dans le secteur chaleur, les températures spécifiques exigées varient considérablement (*voir le graphique*) entre les basses températures voisines de la température ambiante pour l'eau chaude et la vapeur destinées aux agroindustries, au chauffage urbain et au dessalement de l'eau de mer, et les températures de l'ordre de 1000°C de la vapeur et de la chaleur destinées à l'industrie chimique, à la récupération assistée du pétrole par injection à haute pression, au traitement des schistes et des sables bitumineux, aux opérations de raffinage du pétrole, et à la production d'oléfiniques et à l'affinage du charbon et du lignite. La dissociation de la molécule d'eau pour obtenir de l'hydrogène se situe à l'extrême pointe des températures. Jusqu'à 550°C environ, la chaleur peut être fournie sous forme de vapeur; au-delà, la chaleur du réacteur doit intervenir directement car les pressions de vapeur augmentent alors considérablement. La limite supérieure de 1000°C pour la chaleur industrielle d'origine nucléaire a été fixée en fonction de la résistance des structures métalliques des réacteurs.

Pour les opérations industrielles, telle la production des aciers, qui exigent des températures supérieures à 1000°C, l'énergie nucléaire ne peut être utilisée que par l'intermédiaire d'un vecteur secondaire comme l'électricité, l'hydrogène et les gaz de synthèse.

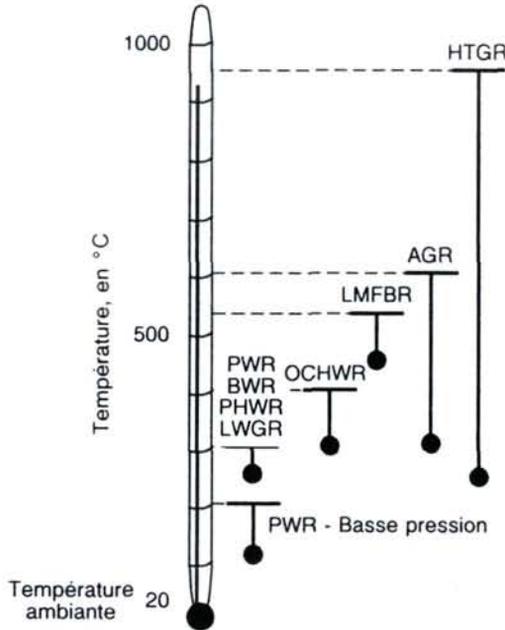
Les réacteurs: possibilités

Dans toutes les centrales nucléaires, la fonction primaire du cœur du réacteur est la conversion de l'énergie nucléaire en chaleur. Tous les réacteurs peuvent donc, en principe, fournir de

par
H. Barnert,
V. Krett
et **J. Kupitz**

M. Barnert travaille pour le Centre de recherche de Juliers, en Allemagne, et M. Krett et M. Kupitz sont membres de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA.

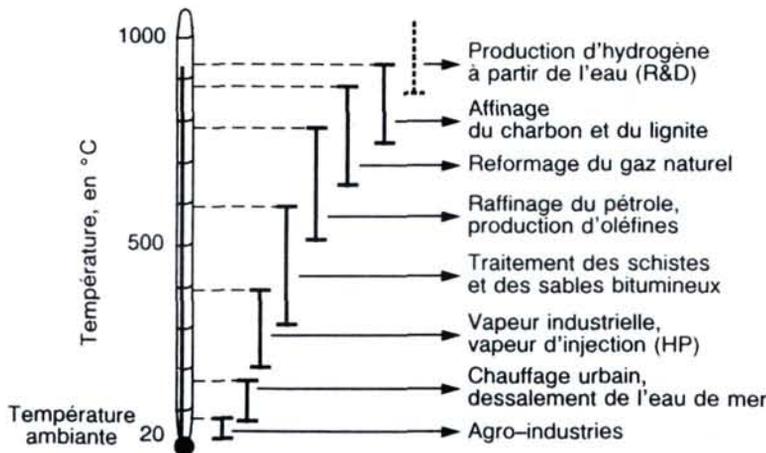
Domaines de température de la chaleur consommée par diverses opérations industrielles



la chaleur industrielle. Toutefois, dans la pratique, deux critères interviennent de façon décisive: la température (celle du fluide de refroidissement primaire) et la pression de la vapeur (dans certains cas).

En ce qui concerne la température, les réacteurs refroidis à l'eau offrent jusqu'à 300°C. A cette filière appartiennent les réacteurs à eau sous pression, les réacteurs à eau bouillante, les réacteurs à eau lourde sous pression et les réacteurs refroidis à l'eau légère et ralentis au graphite. Les réacteurs à eau lourde refroidis par un fluide organique atteignent 400°C, tandis que les réacteurs surgénérateurs à métal liquide montent jusqu'à 540°C. Des températures plus élevées encore peuvent être obtenues avec les réacteurs refroidis par un gaz et modérés au graphite: environ 650°C avec le modèle avancé et 950°C avec le modèle à haute température (voir le graphique).

Température de travail des divers types de réacteurs



En plus de la température maximale du fluide de refroidissement primaire, il faut considérer la différence de température entre l'entrée et la sortie de ce fluide.

La pression de la vapeur produite devient un facteur important lorsqu'il s'agit de l'extraction assistée du pétrole: plus le gisement est profond, plus forte doit être la pression de la vapeur à injecter. Les réacteurs dont le caloporteur primaire est autre que l'eau prennent ici l'avantage. Ils peuvent facilement produire de la vapeur destinée à l'injection à des pressions plus élevées (par exemple, 10 MPa) pour un gisement situé à quelque 500 m de profondeur. Avec les réacteurs refroidis à l'eau, on ne peut atteindre de telles pressions que par l'adjonction d'un compresseur.

Thermodynamique de la production électrique et thermique

Comme on l'a déjà vu, le processus primaire, dans un réacteur nucléaire, est la conversion de l'énergie nucléaire en chaleur.

Si l'on opte pour le mode d'exploitation simple, la chaleur peut être directement utilisée à des fins de chauffage, auquel cas il n'y a pas production d'électricité.

Quant au mode d'exploitation mixte, il consiste à fournir de l'électricité et de la chaleur, laquelle est obtenue en soutirant de la vapeur du circuit secondaire du générateur de vapeur avant son arrivée aux turbines. L'extraction peut aussi se faire en série, c'est-à-dire en prélevant la vapeur à divers stades de sa détente dans la turbine, selon la température dont on a besoin pour l'application envisagée. Dans ce cas, la vapeur prélevée a déjà servi à produire de l'électricité. Cette extraction en série est parfaitement adaptée aux besoins du chauffage urbain, du dessalement et de l'agriculture.

Quelques applications actuelles

Plusieurs pays utilisent déjà des centrales nucléaires pour fournir de l'eau chaude et de la vapeur. Leur puissance totale n'atteint pas 5 GW(th).

Ces pays ont déjà une assez longue expérience de la cogénération d'électricité et de chaleur, notamment l'URSS avec ses réacteurs de Belyarski, Kursk, Novovoronezh, Rovno et Kol'skaya, la Chine à l'Université Tsinghua, le Canada dans le cadre du projet nucléo-énergétique de Bruce, la Tchécoslovaquie avec son réacteur de Bohunice, la Suisse avec ceux de Gösgen et de Beznau, et l'Allemagne à la centrale de Stade.

Voici brièvement ce dont il s'agit.

Réacteur thermogène de Chine. A l'Institut de technologie nucléo-énergétique de l'Univer-

sité Tsinghua, à Pékin, un réacteur thermogène de 5 MW(th) a été mis en service pendant l'hiver 1989-1990 pour fournir de la chaleur au complexe de l'Institut; il a donné entière satisfaction. Dans son principe, c'est un réacteur à eau sous pression. La pression nominale du circuit primaire est de 1,5 MPa (soit environ dix fois moindre que dans un réacteur à eau sous pression de type courant) et la température du circuit est de 186/146°C. Le circuit intermédiaire travaille à 160/110°C sous une pression de 1,7 MPa; dans le circuit de chauffage, la température se situe entre 90 et 60°C.

Vapeur et chaleur industrielles au Canada. L'installation de Bruce, dans l'Ontario, pour le développement de l'énergétique nucléaire, est un des exemples d'utilisation à grande échelle de la vapeur industrielle. Son groupe de réacteurs Candu à eau lourde sous pression peut alimenter une batterie de turbo-alternateurs de 6000 MW(e) et fournir en plus de la vapeur et de la chaleur à Ontario Hydro et au complexe énergétique industriel voisin.

La centrale Bruce-A est équipée de quatre unités électrogènes de 825 MW qui alimentent en outre en vapeur un transformateur de vapeur qui, à son tour, fournit 720 MW(th) de chaleur et de vapeur de procédé pour des réacteurs à eau lourde, 70 MW(th) au centre énergétique de Bruce et 3 MW(th) à des services auxiliaires.

C'est le cas type de la cogénération en parallèle. La chaleur nucléaire produite par le réacteur est transportée jusqu'aux générateurs de vapeur par le circuit primaire. La vapeur soutirée du circuit secondaire des générateurs de vapeur, en parallèle avec l'alimentation des turbines, va directement au transformateur de vapeur. Elle ne sert pas à la production d'électricité.

Eau chaude pour le chauffage urbain en Tchécoslovaquie. La centrale nucléaire de Bohunice est équipée de deux réacteurs VVER-440/230 et deux VVER-440/213, de fabrication soviétique, et tous en service. Chaque réacteur, d'une puissance de 1375 MW(th), alimente une batterie de 6 générateurs de vapeur horizontaux et deux turbines à condensation. L'installation fournit de l'électricité et de la chaleur à basse température pour le chauffage urbain et divers usages industriels et agricoles dans la région de Trnava.

Avec le système de soutirage en série, l'eau est réchauffée à des températures de 70 et 150°C; les turbines peuvent fournir 60 MW(th) sous forme de chaleur (voir le schéma).

Chaleur pour le dessalement de l'eau de mer en URSS. L'exploitation des ressources naturelles des régions arides du Kazakhstan occidental n'est devenue possible qu'une fois résolus les problèmes d'approvisionnement en électricité et en eau. Le complexe de Tchevchenko y est pour beaucoup. Il comporte un réacteur surgénérateur rapide du type BN-350, trois unités thermiques et une installation de dessalement par distillation. C'est la première, et pour le moment la seule, installation de

démonstration utilisant un réacteur pour le dessalement de l'eau de mer.

La vapeur produite par les générateurs de vapeur du réacteur et par une des chaudières alimente plusieurs turbines de types différents. La vapeur produite par les générateurs à 450°C sous une pression de 4,5 MPa est dirigée vers les turbines à contre-pression et vers la turbine à condensation. La vapeur soutirée des turbines à contre-pression est destinée à l'installation de dessalement et aux établissements industriels de la ville.

Le complexe de Tchevchenko est la plus grande installation industrielle de dessalement par la chaleur en URSS. Ses 12 unités de dessalement, toutes en service, peuvent produire 140 000 mètres cubes de distillat par jour.

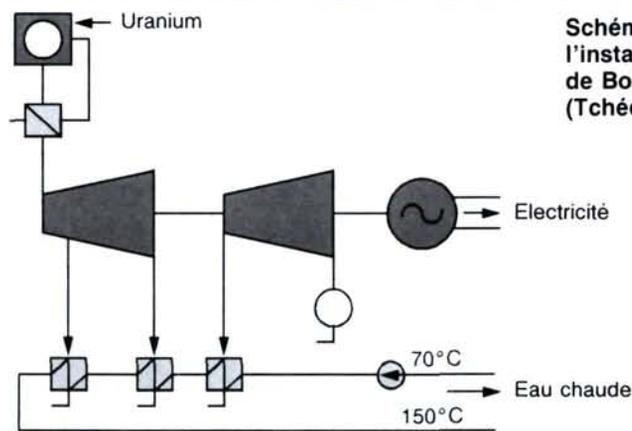


Schéma de l'installation mixte de Bohunice (Tchécoslovaquie)

Economie de la cogénération nucléaire

La production d'électricité d'origine nucléaire et l'infrastructure nécessaire au transport et à la distribution de l'eau chaude et de la vapeur exigent de gros investissements. Les centrales nucléaires se sont avérées rentables pour la seule production d'électricité, mais divers facteurs entrent en jeu lorsqu'il s'agit de cogénération et de production de chaleur industrielle.

On peut appliquer une règle simple: le coût de la chaleur en mode de production mixte est égal au prix de revient de l'électricité divisé par le coefficient de performance de l'installation, lequel dépend du type de réacteur utilisé et d'autres paramètres*.

Cette règle a été appliquée, par exemple, au calcul des coûts de production mixte pour un réacteur modulaire à haute température refroidi par gaz, en Allemagne. Dans ce cas, le coût de l'électricité est de 5 cents de dollar des Etats-Unis par kilowattheure, et le coût de la chaleur

* Le coefficient de performance est défini par la formule $c = H_p / \Delta E$, dans laquelle H_p est la chaleur produite et ΔE la différence entre l'électricité produite en mode d'exploitation simple et l'électricité produite en mode mixte.

est de 1,7 cent pour la vapeur et de 0,5 cent pour l'eau chaude, par kilowattheure thermique. Ces coûts sont actualisés pour une durée utile du réacteur de 40 ans.

Combinaison des énergies nucléaire et fossile

Plus de 80% de l'énergie consommée dans le monde provient de sources fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz. On sait que la combustion de ces produits cause de graves problèmes écologiques dus aux émissions d'oxydes de soufre, d'oxydes d'azote et d'anhydride carbonique.

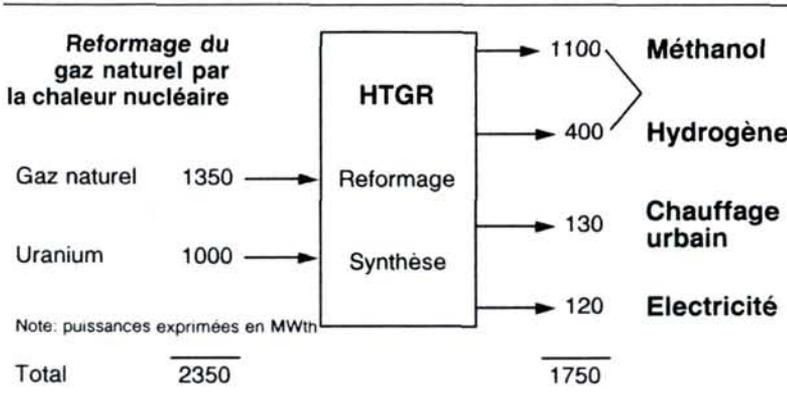
Un avenir prometteur

Maintes raisons militent en faveur de l'exploitation de la capacité qu'ont la plupart des centrales nucléaires de produire de la vapeur et de la chaleur pour le chauffage urbain et divers usages industriels.

Dans plusieurs pays, des réacteurs sont déjà effectivement utilisés pour produire simultanément diverses formes d'énergie. Les possibilités de généraliser cette pratique semblent bonnes et, une fois encore, retiennent l'intérêt sur le plan international étant donné les problèmes écologiques et autres que soulève l'emploi des combustibles fossiles.

L'AIEA a organisé en 1990 une réunion d'experts pour faire le point de la situation en ce qui concerne les réacteurs cogénérateurs et les systèmes de production de chaleur. Un document technique sur les applications de l'énergie nucléaire à la production de vapeur et d'eau chaude, dont l'intention est de faciliter l'échange d'informations dans ce domaine, est en cours de publication.

A mesure que les besoins d'énergie augmentent, cette technologie, parmi d'autres, mérite sans doute que l'on s'y intéresse davantage.



Pour aider à les résoudre, plusieurs formules ont été proposées, dont l'intégration des systèmes énergétiques. On pourrait par exemple utiliser la chaleur nucléaire pour reformer le gaz naturel (voir la figure). Les gaz de synthèse, le méthanol, l'hydrogène, la chaleur et l'électricité seraient produits à partir du gaz naturel et de l'uranium en utilisant la technique dite de reformage du réacteur à haute température. Dans ce procédé, le gaz naturel est décomposé essentiellement en hydrogène et en oxyde de carbone. Les produits principaux sont le méthanol, hydrocarbure liquide, et l'hydrogène. Les sous-produits sont la chaleur et l'électricité.

Un autre exemple de cette approche intégrée concerne l'industrie du pétrole. Plusieurs études ont été faites sur l'emploi de l'énergie nucléaire comme source de chaleur pour l'exploitation des pétroles lourds. Elles ont montré que, lorsque la conjoncture est favorable sur le marché du pétrole, l'option nucléaire présente des avantages économiques et écologiques par rapport aux options classiques.

Un troisième exemple est celui de l'utilisation conjointe du charbon et de l'énergie nucléaire en sidérurgie. Du point de vue technologique, c'est le projet le plus ambitieux. Il envisage la gazéification des anthracites par l'hélium à haute température provenant du réacteur. Les produits intermédiaires sont le gaz de synthèse et le coke, ce dernier servant à la réduction des minerais de fer. Les produits finaux sont le méthanol et la fonte.