

# Applications de l'énergie nucléaire: chauffage domestique et production de chaleur industrielle

*De plus en plus de pays envisagent d'utiliser des petits réacteurs nucléaires pour la production de chaleur industrielle et le chauffage urbain*

Lorsque le premier réacteur nucléaire a été mis en exploitation commerciale à Calder Hall (Royaume-Uni), en octobre 1956, il fournissait de l'électricité au réseau et de la chaleur à une usine voisine de retraitement du combustible. Après plus de 40 ans, les quatre tranches de 50 mégawatts électriques (MWe) de Calder Hall sont toujours en exploitation. En Suède, le réacteur Agesta a fourni de l'eau chaude pour le chauffage urbain d'une banlieue de Stockholm de 1963 à 1973.

Ces exemples montrent un aspect de l'énergie nucléaire que de nombreuses personnes ignorent: sa capacité de fournir de la chaleur pour des processus industriels et le chauffage urbain. De telles applications ont débuté très tôt, pratiquement au même moment où on a commencé à utiliser des réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité.

Depuis les débuts de l'énergie nucléaire, l'utilisation directe de la chaleur produite par les réacteurs n'a fait que s'accroître. Des pays comme l'Allemagne, la Bulgarie, le Canada, la Chine, la Fédération de Russie, la Hongrie, l'Inde, le Japon, le Kazakhstan, la République tchèque, la Slovaquie, la Suède, la Suisse et l'Ukraine ont découvert l'intérêt de l'énergie nucléaire pour le chauffage urbain ou la production de chaleur industrielle, ou les deux, en plus de la production d'électricité. Bien que moins de 1 % de la chaleur produite dans les réacteurs nucléaires dans le monde soit actuellement utilisée pour le chauffage urbain et les processus industriels, certaines indications montrent que ces applications soulèvent de plus en plus d'intérêt.

L'utilisation directe de la chaleur d'origine nucléaire n'a rien de nouveau. Après tout, la fission nucléaire a pour résultat la production de chaleur dans le réacteur. Cette chaleur est évacuée par le réfrigérant qui circule dans le cœur et peut servir à produire de l'électricité ou à fournir de l'eau

chaude ou de la vapeur à des fins industrielles ou de chauffage. Il existe toutefois des différences importantes tant entre les propriétés et les applications de l'électricité et de la chaleur qu'entre les débouchés de ces différentes formes d'énergie. Ces différences et les caractéristiques intrinsèques des réacteurs nucléaires expliquent pourquoi l'énergie nucléaire a pu pénétrer largement le marché de l'électricité, mais n'est utilisée que de façon marginale comme source directe de chaleur.

par Bela J. Csik  
et  
Juergen Kupitz

## Le marché de l'énergie

Actuellement, la production d'électricité représente environ 33 % de la consommation mondiale totale d'énergie. Ce pourcentage augmente progressivement et devrait atteindre 40 % d'ici à 2015. La production de chaleur à des fins domestiques ou industrielles et les transports représentent les deux autres composantes majeures, la production de chaleur représentant un pourcentage légèrement plus important. La quasi-totalité de la chaleur produite l'est à partir du charbon, du pétrole, du gaz et du bois.

La consommation totale d'énergie augmente graduellement et cette tendance devrait se poursuivre pendant une bonne partie du siècle prochain. Les mesures d'économie et d'amélioration du rendement ont permis d'une manière générale de ralentir l'augmentation de la consommation d'énergie, mais leur effet n'est pas suffisant pour stabiliser la consommation aux valeurs actuelles.

Une augmentation modeste de la production électronucléaire est prévue au cours des deux prochaines décennies. Dans le secteur des transports, on ne prévoit pratiquement aucune application de l'énergie nucléaire, sauf indirectement à cause de l'utilisation accrue d'énergie.

Le marché de la chaleur est un enjeu ouvert. Bien que l'énergie nucléaire soit utilisée pour produire de la chaleur, elle n'a pas encore réussi à jouer un rôle important dans ce domaine. Les parts de marché qu'elle pourrait conquérir et la rapidité

M. Csik occupe un poste de haut niveau à la Section du développement de la technologie électronucléaire de l'AIEA; M. Kupitz est chef de cette section.

avec laquelle elle pourrait le faire dépendront principalement de la mesure dans laquelle les caractéristiques des réacteurs nucléaires pourront être adaptées aux caractéristiques du marché de la chaleur afin de pouvoir concurrencer avec succès les autres sources d'énergie.

### Caractéristiques du marché de la chaleur

Le transport de la chaleur est difficile et coûteux. Plusieurs facteurs (nécessité d'investir dans des conduites, des travaux d'isolation thermique et des dispositifs de pompage, pertes de chaleur, maintenance et énergie nécessaire au pompage) font qu'il est peu pratique de transporter la chaleur sur des distances supérieures à quelques kilomètres ou, au plus, à quelques dizaines de kilomètres. Les coûts spécifiques du transport de la chaleur augmentent très rapidement à proportion que la quantité de chaleur à transporter diminue. Par rapport à la chaleur, le transport de l'électricité du lieu de production à l'utilisateur est facile et peu coûteux, même à des centaines de kilomètres.

Les secteurs domestiques et industriels composent les deux principaux éléments du marché de la chaleur. Dans le secteur domestique, la chaleur nécessaire pour la cuisine doit être produite directement sur place, mais le chauffage des locaux peut être et est souvent assuré par un système centralisé, situé à une certaine distance, dont la chaleur est acheminée par un réseau de transmission et de distribution desservant un nombre assez important de clients.

**Chauffage urbain.** La puissance installée des réseaux de chauffage urbain est généralement comprise entre 600 et 1 200 mégawatts thermiques (MWth) dans les grandes agglomérations, mais elle tombe à un niveau approximativement compris entre 10 et 50 MWth dans les localités plus petites. On trouve exceptionnellement des puissances de 3 000 à 4 000 MWth. Evidemment, le chauffage urbain n'a des débouchés que dans les zones climatiques où les hivers sont longs et rigoureux. En Europe occidentale, par exemple, le chauffage urbain est utilisé à grande échelle en Finlande, en Suède et au Danemark et dans une bien moindre mesure en Allemagne, en Autriche, en Belgique, en France, en Italie, en Norvège, aux Pays Bas et en Suisse. Les taux de charge annuels des systèmes de chauffage urbain, qui dépendent de la durée pendant laquelle il faut chauffer les locaux, peuvent atteindre environ 50 %, ce qui demeure bien en deçà de ce qui est nécessaire pour un fonctionnement en centrale de base. En outre, pour assurer un approvisionnement fiable en chaleur aux foyers desservis par le réseau de chauffage urbain, il faut disposer de capacités de production de chaleur excédentaires. Autrement dit, il faut prévoir des systèmes redondants et des centrales dont la taille ne correspond qu'à une fraction de la charge

de pointe totale. Les températures nécessaires pour les systèmes de chauffage urbain vont de 100 à 150 °C.

En général, on s'attend que le marché du chauffage urbain connaisse un grand essor, non seulement parce qu'il peut être concurrentiel par rapport au chauffage individuel dans les régions très densément peuplées, mais aussi parce qu'il offre la possibilité de réduire la pollution atmosphérique dans les zones urbaines. Alors que les émissions peuvent être maîtrisées et réduites jusqu'à un certain point dans des usines assez importantes, cela n'est pas facile dans le cas de petites installations individuelles de chauffage fonctionnant au gaz, au fuel, au charbon ou au bois.

**Processus industriels.** La chaleur industrielle sert à une grande variété d'applications dont les besoins en chaleur sont différents et qui se situent dans un éventail de températures très large. Alors que l'énergie représente une part considérable du coût de production final dans les industries qui en consomment beaucoup, elle ne représente qu'un faible pourcentage de ce coût dans la plupart des autres secteurs. Néanmoins, l'approvisionnement en énergie est essentiel. Sans énergie, la production s'interromprait. Autrement dit, pratiquement tous les utilisateurs industriels, en particulier les grandes installations et les processus industriels qui consomment beaucoup d'énergie, doivent pouvoir compter sur un approvisionnement ayant un niveau de fiabilité et de disponibilité proche de 100 %.

S'agissant des gammes de puissance requises, elles se répartissent à peu près de la même façon dans la plupart des pays industrialisés. En général, environ la moitié des utilisateurs ont besoin de moins de 10 MWth et 40 % de 10 à 50 MWth. Le nombre d'utilisateurs diminue progressivement à mesure que la puissance augmente. Environ 99 % des utilisateurs représentant à peu près 80 % de la consommation totale se situent dans la gamme de puissance comprise entre 1 et 300 MWth. Les utilisateurs exploitant des processus industriels qui consomment beaucoup d'énergie représentent le reste du marché de la chaleur industrielle; leurs besoins peuvent atteindre 1 000 MWth, voire davantage dans certains cas exceptionnels. Ceci montre bien que le marché de la chaleur industrielle est très fragmenté.

La mise en place à grande échelle de systèmes de distribution de chaleur alimentés par une source centralisée — qui approvisionnerait plusieurs utilisateurs regroupés dans des zones industrielles — ne semble guère possible pour le moment, mais elle pourrait être envisageable à long terme. Contrairement au chauffage urbain, l'utilisation de la chaleur industrielle ne dépend pas des conditions climatiques. Habituellement, la demande des utilisateurs industriels importants présente les caractéristiques de la charge de base.

Les températures requises dépendent du type d'industrie et couvrent une gamme étendue pouvant aller jusqu'à 1 500 °C environ. Au-delà de 1 000 °C,

le principal utilisateur est l'industrie sidérurgique. Au bas de l'échelle, jusqu'à 200 à 300 °C environ, on trouve des industries comme le dessalement de l'eau de mer, la fabrication de pâte et de papier ou le textile. L'industrie chimique, le raffinage du pétrole, le traitement des schistes bitumineux et des sables pétrolifères, ainsi que la gazéification du charbon sont des exemples d'applications nécessitant des températures allant jusqu'à 500 ou 600 °C. L'industrie des métaux non ferreux, le raffinage du charbon et du lignite, ainsi que la production d'hydrogène par décomposition de l'eau figurent parmi les applications nécessitant des températures comprises entre 600 et 1 000 °C.

Tous les utilisateurs industriels qui ont besoin de chaleur consomment aussi de l'électricité. Les proportions varient selon le type de processus où la chaleur ou l'électricité peut jouer un rôle prédominant. La demande d'électricité peut être satisfaite par le réseau électrique ou par une centrale électrique spécialement consacrée à cette tâche. La cogénération (production combinée d'électricité et de chaleur) est une option intéressante qui permet d'accroître le rendement énergétique global et offre donc des avantages économiques. Des centrales produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur pour alimenter des complexes industriels importants peuvent être facilement intégrées à un réseau électrique auquel elles fournissent tout excédent d'énergie. De leur côté, elles peuvent servir de système d'alimentation électrique de secours du réseau. De telles dispositions s'avèrent souvent souhaitables.

### **Caractéristiques des sources nucléaires de chaleur**

Du point de vue technique, les réacteurs nucléaires sont avant tout des dispositifs calogènes. L'expérience de l'application de la chaleur d'origine nucléaire au chauffage urbain et aux processus industriels est si vaste que l'on peut considérer que cette option a entièrement fait ses preuves sur le plan technique. Il n'existe aucun obstacle technique à l'utilisation des réacteurs nucléaires comme source de chaleur pour le chauffage urbain ou les processus industriels. En principe, tout réacteur nucléaire, indépendamment de son type ou de sa taille, peut être utilisé à ces fins.

La possibilité d'une contamination radioactive des réseaux de chauffage urbain ou des produits de l'exploitation des processus industriels est évitée par des mesures appropriées, comme l'installation d'échangeurs de chaleur intermédiaires dont les gradients de pression constituent une barrière efficace. Aucun cas de contamination radioactive concernant l'un quelconque des réacteurs utilisés à cet effet n'a jamais été signalé.

Quant aux gammes de températures que l'on peut obtenir, elles vont jusqu'à environ 300 °C dans le cas

des réacteurs à eau ordinaire et à eau lourde, jusqu'à 540 °C dans le cas des réacteurs rapides refroidis par métal liquide, jusqu'à 650 °C dans le cas des réacteurs avancés refroidis par gaz, et jusqu'à environ 1 000 °C dans le cas des réacteurs à haute température refroidis par gaz.

Pour le chauffage urbain et les processus industriels, il y a deux options principales: la cogénération et l'utilisation de réacteurs exclusivement calogènes. La première option a été largement appliquée, mais pas la seconde. En principe, toute quantité de chaleur peut être extraite des réacteurs de cogénération, dans les limites de leur puissance nominale. Comme les excédents de chaleur éventuels peuvent être utilisés pour produire de l'électricité, la cogénération offre un haut niveau de souplesse. Tel n'est pas le cas bien sûr des réacteurs uniquement calogènes.

Les taux de disponibilité des réacteurs nucléaires sont comparables en général à ceux des centrales électriques à combustible fossile. L'expérience montre que ces taux peuvent atteindre 70 à 80 %, voire 90 %. La fréquence et la durée des arrêts non programmés peuvent être maintenues à un niveau très bas grâce à une bonne maintenance préventive et prévisionnelle. Toutefois, les taux de disponibilité et de fiabilité d'un réacteur ne peuvent jamais atteindre les niveaux proches de 100 % exigés par la plupart des grands utilisateurs de chaleur. En conséquence, des systèmes redondants sont nécessaires, comme dans le cas des sources fossiles de chaleur. Les centrales de cogénération à tranches multiples, les concepts modulaires ou les sources de chaleur de secours figurent parmi les solutions envisageables.

Les réacteurs nucléaires nécessitent des capitaux importants. Les charges fixes jouent un rôle prédominant dans le coût final de l'énergie. Il est donc nécessaire de les exploiter en charge de base avec des taux de charge aussi élevés que possible pour concurrencer les autres sources d'énergie. Cela n'est possible que si la demande de chaleur est relativement constante ou si la demande combinée d'électricité et de chaleur permet d'exploiter la centrale de cogénération en centrale de base.

Même s'ils sont reconnus techniquement comme des sources d'énergie sûres, fiables et non polluantes, les réacteurs nucléaires doivent également se montrer compétitifs avant que leur mise en service commerciale puisse être envisagée. Par rapport aux sources à combustibles fossiles, ils se caractérisent par des dépenses d'investissement supérieures que compensent des coûts de combustible moindres. L'énergie nucléaire n'aurait pas pu pénétrer le marché de l'électricité si elle ne s'était pas révélée compétitive. Bien que les prix des combustibles fossiles soient actuellement peu élevés, l'énergie nucléaire demeure concurrentielle presque partout dans le monde. Si comme on s'y attend le prix des combustibles fossiles venait à augmenter,

la compétitivité de l'énergie nucléaire s'en trouverait renforcée tant sur le marché de l'électricité que sur celui de la chaleur.

En raison d'un effet de taille, la rentabilité est généralement meilleure dans le cas des tranches les plus importantes. C'est ce qui a incité les pays industrialisés ayant d'importants réseaux électriques interconnectés à développer et à mettre en service des réacteurs de grande taille. Néanmoins, il y a eu et il y a toujours un marché pour les réacteurs de faible et moyenne puissance (RFMP). Les modèles actuels de RFMP ne sont pas des versions à échelle réduite de grands réacteurs commerciaux et ils sont conçus pour être compétitifs.

Le choix des sites des centrales nucléaires est devenu une question importante, même dans les pays qui lancent de nouveaux projets nucléaires. La construction de tranches supplémentaires sur des sites nucléaires existants est devenue pratique courante depuis quelque temps et l'ouverture de nouveaux sites est rare. Les considérations économiques encouragent le choix de sites le plus près possible des centres de consommation, même dans le cas des centrales électriques. Dans le cas des réacteurs de cogénération ou des réacteurs exclusivement calogènes, cela est pratiquement obligatoire. Le syndrome de rejet «pas de ça chez moi» joue toutefois un rôle important dans la sélection des sites en incitant à sélectionner des endroits reculés, mais accessibles, afin d'éviter les possibilités de conflit et d'opposition. Le choix de sites éloignés des régions très peuplées permet de se conformer plus facilement aux prescriptions réglementaires qui deviennent de plus en plus strictes. Le choix d'un site rapproché pourrait être jugé acceptable par le public dans le cas de modèles avancés, en particulier de RFMP dotés de caractéristiques de sûreté améliorées. Il permettrait de satisfaire plus facilement aux prescriptions réglementaires et de maintenir les coûts de transmission de la chaleur à un niveau raisonnable.

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, contrairement à de nombreuses activités industrielles, la perspective à long terme est prépondérante. La planification, la conception, la préparation et l'autorisation de tout projet de réacteur prennent des années. Les réacteurs sont conçus et construits pour durer une quarantaine d'années ou plus et, pour qu'ils produisent les avantages économiques attendus, il faut que leur facteur de charge soit élevé pendant toute leur durée de vie utile. Il faut aussi des infrastructures dont la mise en place nécessite beaucoup de temps et des efforts considérables si elles n'existent pas encore. Ces travaux ne peuvent se justifier que dans une perspective à long terme.

---

### **Perspectives de la chaleur d'origine nucléaire**

Sur le plan technique, l'application de la chaleur nucléaire au chauffage urbain ou aux processus

industriels est viable depuis les tous débuts du nucléaire, mais n'a toujours pas percé de manière significative sur le marché de la chaleur. Les perspectives à cet égard dépendront de la question de savoir où et comment les caractéristiques de la demande pourront être mises en correspondance avec les capacités des réacteurs nucléaires.

**Marché du chauffage urbain.** Dans le cas du marché du chauffage urbain, les centrales nucléaires de cogénération constituent l'une des options. Dans le cas des réacteurs de moyenne et de grande puissance, comme les besoins du marché de la chaleur sont limités et que les taux de charge sont relativement faibles, l'électricité serait le principal produit et le chauffage urbain ne représenterait qu'une faible fraction de la production totale d'énergie. Ces centrales, y compris le choix de leur site, seraient optimisées en fonction des besoins du marché de l'électricité, le chauffage urbain étant en fait un sous-produit. Situées assez près de centres de population dans des régions froides, de telles centrales pourraient pourvoir aux besoins de chauffage. C'est déjà le cas en Bulgarie, en Fédération de Russie, en Hongrie, en République tchèque, en Slovaquie, en Ukraine et en Suisse où l'on produit jusqu'à 100 MWth par centrale. On peut s'attendre que des applications similaires voient le jour à l'avenir si de semblables conditions aux limites existent.

Dans le cas des petits réacteurs de cogénération correspondant à une gamme de puissance allant jusqu'à 300 MWe, la part de l'énergie thermique dévolue au chauffage urbain serait plus importante. Néanmoins, en supposant qu'ils soient exploités en centrale de base pour des raisons économiques, ces réacteurs produiraient surtout de l'électricité. Leur champ d'application serait semblable à celui des réacteurs de cogénération de moyenne et forte puissance. Toutefois, ils pourraient aussi remplir certains objectifs précis, par exemple satisfaire une demande d'énergie concentrée dans des régions reculées et froides du monde.

Les réacteurs qui ne produisent que de la chaleur destinée au chauffage urbain offrent une autre solution. Ils n'ont été utilisés que sur une très petite échelle (quelques MWth) dans le cadre de projets expérimentaux ou de démonstration. La construction de deux tranches de 500 MWth a été lancée en Russie en 1983-1985, mais a été interrompue par la suite. Plusieurs modèles sont en cours de développement et la construction d'une tranche de 200 MWth devrait bientôt commencer en Chine. De toute évidence, seuls des réacteurs calogènes de très petite taille pourraient être utilisés pour le chauffage urbain. Ces réacteurs sont conçus de manière à être construits dans des centres de population ou à proximité afin de maintenir les coûts de transmission de la chaleur au minimum. Même dans ces conditions, ils sont difficilement compétitifs étant donné que les facteurs de charge requis sont relativement faibles, sauf dans certains endroits reculés où

les combustibles fossiles coûtent très cher et où les hivers sont très froids et très longs.

En résumé, le recours à l'énergie nucléaire pour le chauffage urbain est envisageable, mais uniquement dans les cas où certaines conditions spécifiques liées tant au marché du chauffage urbain qu'aux réacteurs nucléaires peuvent être remplies. Les réacteurs de cogénération, en particulier ceux de faible et moyenne puissance, semblent avoir de meilleures perspectives que les réacteurs exclusivement calogènes, principalement pour des raisons économiques.

**Chaleur industrielle.** Le marché de la chaleur industrielle est très différent de celui du chauffage urbain, malgré certains points communs, en particulier le besoin de réduire la distance de transport de la chaleur au minimum. Toutefois, les utilisateurs de chaleur industrielle n'ont pas besoin d'être situés dans des régions très peuplées qui, par définition, constituent le marché du chauffage urbain. Un grand nombre d'entre eux, et en particulier les plus importants, sont normalement implantés en dehors des zones urbaines, souvent à des distances considérables. Le choix de sites communs pour les réacteurs nucléaires et les utilisateurs de chaleur industrielle est donc non seulement viable, mais aussi souhaitable afin de réduire radicalement ou même d'éliminer les coûts de transport de la chaleur.

Dans le cas des réacteurs de grande taille, l'approche habituelle est de construire des centrales à tranches multiples. Lorsqu'elles sont utilisées en mode de cogénération, l'électricité constitue toujours leur produit principal. Par conséquent, ces centrales doivent être intégrées au réseau électrique et optimisées pour la production d'électricité. Dans le cas des RFMP, et en particulier des réacteurs de faible et très faible puissance, la chaleur industrielle représenterait une part plus importante de l'énergie produite et pourrait même devenir le principal produit. Cela influerait sur les critères d'optimisation de la centrale et offrirait des conditions beaucoup plus alléchantes aux utilisateurs potentiels de chaleur industrielle. Par conséquent, les RFMP ont de bien meilleures perspectives que les réacteurs de grande taille pour la cogénération.

Plusieurs centrales nucléaires de cogénération fournissent déjà de la chaleur industrielle à des utilisateurs industriels. Les centrales les plus importantes sont situées à Bruce, au Canada (production d'eau lourde et applications industrielles et agricoles) et à Aktau, au Kazakhstan (dessalement de l'eau). D'autres réacteurs de puissance qui ne produisent actuellement que de l'électricité pourraient être reconvertis pour produire aussi de la chaleur. Si un utilisateur important de chaleur industrielle installé près d'une telle centrale était intéressé, la reconversion de la centrale serait techniquement faisable. Cela engendrerait toutefois des coûts supplémentaires qu'il faudrait

justifier par une analyse coûts/avantages. Certains de ces projets de reconversion pourraient être réalisés, mais cette solution n'est guère envisageable d'une manière générale.

Construire une nouvelle centrale nucléaire de cogénération près d'un utilisateur industriel intéressé serait une meilleure option. L'idéal serait un projet commun dans le cadre duquel la centrale nucléaire de coproduction et l'établissement industriel qui a besoin de chaleur industrielle seraient planifiés, conçus, construits et exploités de façon intégrée.

Les réacteurs actuels et avancés à eau ordinaire et à eau lourde produisent de la chaleur à faible température qui convient à plusieurs applications industrielles. Parmi celles-ci, le dessalement de l'eau de mer semble actuellement la plus intéressante. D'autres types de réacteurs, comme les réacteurs rapides refroidis par métal liquide et les réacteurs à haute température refroidis par gaz peuvent aussi fournir de la chaleur industrielle à faible température, tout en étant capables d'offrir des gammes de température plus élevées, ce qui étend leur champ potentiel d'application. Ces réacteurs nécessitent encore des travaux substantiels de mise au point avant d'atteindre la maturité commerciale. S'ils devenaient compétitifs comme l'on s'y attend, leurs perspectives seraient bonnes à moyenne ou longue échéance, en particulier pour des applications industrielles à haute température.

Les réacteurs exclusivement calogènes n'ont pas encore été utilisés à l'échelle industrielle pour fournir de la chaleur industrielle. Plusieurs modèles ont été mis au point et des réacteurs de démonstration ont été construits. La compétitivité semble un objectif réalisable selon de nombreuses études, mais certains aspects restent à démontrer dans la pratique. Le marché potentiel serait limité aux réacteurs de très faible puissance (inférieure à 500 MWth).

Les possibilités d'utiliser l'énergie nucléaire pour le chauffage urbain et la production de chaleur industrielle dépendront étroitement de la mesure dans laquelle des RFMP pourront être mis en service. Selon une étude de marché récente, il est prévu de construire entre 70 et 80 nouvelles tranches dans une trentaine de pays d'ici à 2015, dont un tiers environ seraient consacrées au dessalement. Il est fort possible qu'une partie importante des tranches restantes fournisse de la chaleur en plus de l'électricité, et que quelques-unes soient exclusivement calogènes.