



Valoriser la chaleur nucléaire

Vers une utilisation plus efficiente des centrales nucléaires ?

Martin Laurent et Henri Safa^(*) henri.safa@cea.fr

* CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)

La récupération d'une partie de l'énergie perdue des centrales nucléaires pour des usages industriels ou de chaleur urbaine offre des perspectives très intéressantes en termes de réduction des gaz à effet de serre (GES).

La lutte contre le réchauffement climatique nous impose de trouver des sources décarbonées pour nos usages énergétiques. À l'inverse de la production d'électricité, la production de chaleur en France génère beaucoup d'émissions de CO₂, car elle utilise la combustion de gaz naturel comme principale source d'énergie. Dans le même temps, l'on doit refroidir nos centrales nucléaires de puissance avec des prélèvements massifs d'eau à une source froide, car la production d'électricité génère de grandes quantités de chaleur. Le rendement thermodynamique de conversion de la chaleur en électricité est relativement faible : il varie de 35 % pour le nucléaire à 58 % pour les centrales à gaz à cycle combiné. Ne serait-il pas envisageable de récupérer ne serait-ce qu'une partie de la chaleur perdue des centrales électriques pour nos usages de chaleur ?

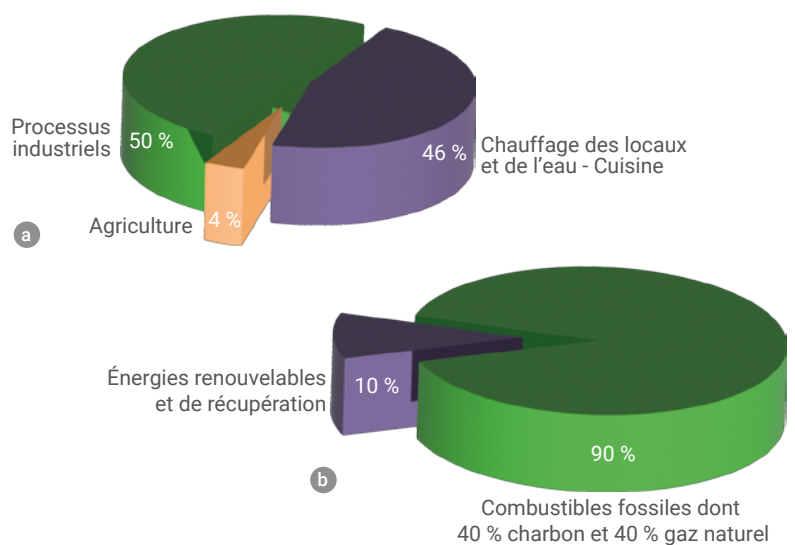
L'énergie sous forme de chaleur

En 2018, 50 % de l'énergie finale dans le monde était consommée sous forme de chaleur et contribuait à 40 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone [1]. La production de chaleur, principalement à

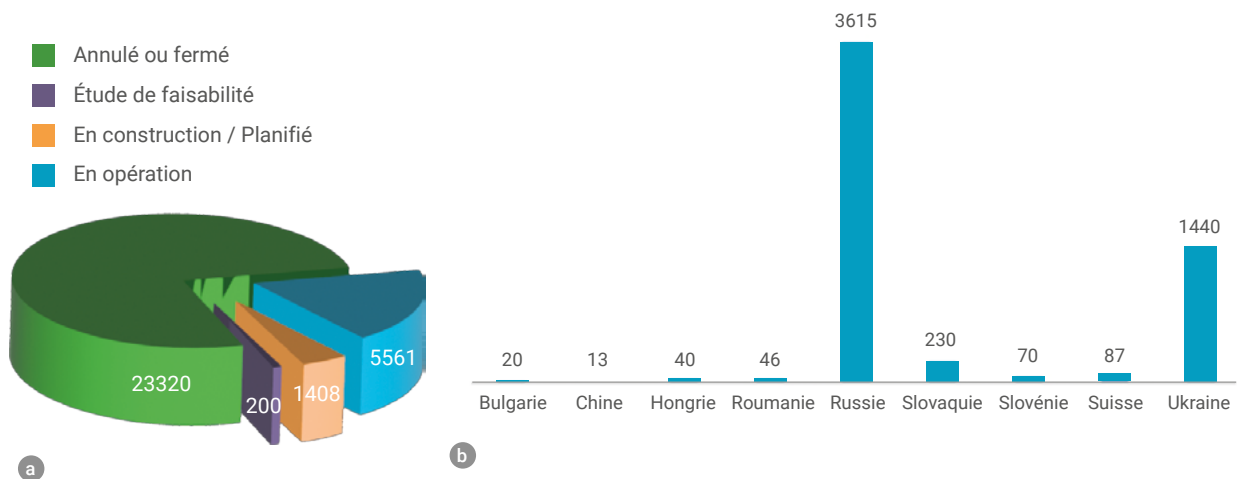
destination du chauffage résidentiel ou tertiaire et des procédés industriels, repose en grande majorité sur des combustibles fossiles (fig. 1).

Différencier la chaleur selon la température est primordial, les usages à des températures inférieures à 250 °C^(a) pouvant être fortement optimisés par des pratiques d'efficience énergétique (utiliser la chaleur produite en excès par les *data centers*, les centrales thermiques, les usines, dans d'autres applications comme le

chauffage urbain ou de procédés, etc.). En France, la consommation énergétique à des fins de chauffage en deçà de 250 °C (chauffage des locaux, de l'eau, des procédés industriels) représente 30 % des émissions de gaz à effet de serre. Malgré le fait que la loi oblige formellement certaines industries intensives en énergie à étudier la possibilité d'alimenter les réseaux de chaleur voisins [2], les symbioses énergétiques de ce type restent rares. >>>



1. Répartition de la production de chaleur dans le monde en 2018 (en pourcents), selon l'utilisation (a) et selon le type de combustible (b).



2. Quantité de chaleur (MW_{th}) fournie par des centrales nucléaires à des réseaux de chaleur dans le monde.

(a) Distribution par statut.

(b) Distribution par pays (réseaux en opération). En Europe, les centrales nucléaires représentent 0,15 % de la chaleur distribuée par des réseaux de chaleur.

Source des données utilisées : M. Lipka et A. Rajewski [7].

>>>

La production de chaleur des centrales nucléaires

Un exemple de système pertinent – pourtant rarement mentionné – est la valorisation de la chaleur produite par les centrales nucléaires. Dans un réacteur nucléaire, la chaleur thermique issue de la fission est convertie en électricité dans une turbine à vapeur avec un rendement thermodynamique de l'ordre de 35 %^(b). Les deux tiers de la chaleur produite sont donc rejetés dans l'environnement, dans l'eau de mer, dans les rivières ou dans l'atmosphère (tours aéroréfrigérantes). Il existe en France quelques valorisations des eaux rejetées à 40°C dites « eaux tièdes », comme la pisciculture, le chauffage de serres maraichères ou horticoles, de piscines avoisinantes ou l'élevage de crocodiles, mais ces applications restent marginales. De fait, la chaleur des réacteurs nucléaires pourrait être largement et plus efficacement valorisée [3].

Les réacteurs à eau pressurisée (REP, le type de réacteur nucléaire le plus couramment utilisé aujourd'hui et qui devrait le rester au moins jusqu'en 2050), peuvent pourtant être conçus pour fournir simultanément de l'électricité et de la chaleur (voire exclusivement de la chaleur), sans compromettre la sûreté de

l'installation [4]. La chaleur à la sortie du générateur de vapeur d'un réacteur à eau pressurisée est disponible jusqu'à une température de 280°C, couvrant le tiers des besoins industriels et l'intégralité des besoins résidentiels et tertiaires en chaleur, correspondant à 30 % des émissions totales de gaz à effet de serre de la France. Techniquement, une partie ou même l'intégralité de la chaleur peut être facilement récupérée dans un échangeur thermique et transportée vers le site d'utilisation dans des caloducs. S'il s'agit de chaleur récupérée à basse température (< 120°C), elle peut être acheminée sur de longues distances avec de très faibles pertes (< 2 % sur 100 km) [3, 5].

À la recherche de politiques territoriales ambitieuses

À travers le monde, au moins 55 réacteurs ont été utilisés comme solution de chauffage depuis les années 1970 (5561 MW_{th} de puissance en opération pour les réseaux de chaleur, dont 65 % en Russie et 26 % en Ukraine ; voir la figure 2). Une revue des différents types de réacteurs alimentant des réseaux de chaleur est proposée par J. Leppänen [6].

À l'aide d'experts de l'OCDE, nous avons identifié quinze zones

urbaines en Europe pour lesquelles le chauffage et l'eau chaude sanitaire pourraient être distribués sous la forme d'eau chaude circulant dans des réseaux de chaleur alimentés en partie par une centrale nucléaire voisine. Sept de ces quinze systèmes présentent un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre à cout compétitif [8], la condition principale étant d'avoir des réseaux de chaleur suffisamment importants en taille. Aujourd'hui, plusieurs pays, à commencer par la Chine et la Finlande, mais aussi le Royaume-Uni et la Pologne, envisagent l'option du chauffage urbain basé sur une production thermique nucléaire. Le projet EcoSMR ("Ecosystem for Small Modular Reactors", voir aussi p. 97) est à suivre de près puisqu'il rassemble des acteurs industriels et politiques finlandais, anglais et lettons.

La production de vapeur pour des éco-parcs industriels a également été étudiée pour la France [8]. Des projets prometteurs ont été identifiés à Gravelines (usine de parapharmacie à 0,5 km de la centrale) et au Bugey (deux usines à 1,8 km). Le potentiel global est toutefois limité du fait de la distance qui sépare souvent les usines des sites nucléaires. À l'avenir, des politiques territoriales ambitieuses visant à inciter les industries pertinentes à s'implanter dans des

“ Les réacteurs à eau pressurisée (REP)... peuvent être conçus pour fournir simultanément de l'électricité et de la chaleur... sans compromettre la sûreté de l'installation.”

zones contiguës aux centrales nucléaires pourraient avoir des retombées économiques (réduction de 10 à 20 % des coûts annuels de production de chaleur) et environnementales importantes (entre 1 % et 4 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre de la France) [8].

Les deux principales questions qui se posent lorsque l'on considère la production de chaleur à partir de centrales nucléaires sont les suivantes :

- 1• quelle est, en MWth, la puissance optimale du réacteur ?
- 2• quel type de réacteur serait le plus à même de répondre aux besoins du marché ?

Concernant la puissance, il faudra bien entendu s'adapter au marché. Plus le réacteur est petit, plus il pourra correspondre aux attentes d'un grand nombre d'utilisateurs en termes de besoins thermiques, de risque financier et de temps de construction. En revanche, le coût du MWh thermique extrait sera d'autant plus faible que l'énergie délivrée sera grande (économie d'échelle). Enfin, l'éloignement entre le site nucléaire et le client final est un facteur qui influera sur le coût du transport de la chaleur.

Quant au choix du type de réacteur, il dépendra de l'usage et notamment de la température d'utilisation souhaitée. Pour du chauffage urbain à

basse température, un petit réacteur de type piscine, non pressurisé, avec une sécurité passive renforcée pourrait suffire. En revanche, pour des applications industrielles, un réacteur à eau pressurisée standard fournira de la chaleur jusqu'à 280°C. Parmi les secteurs industriels potentiellement intéressés, on peut citer la chimie, la pharmacie ou la fabrication d'amidon, de malt ou encore de plastique.

Préparer l'évolution des systèmes énergétiques

Si une centrale est prévue sur un site possédant un potentiel pour la fourniture de chaleur à proximité d'agglomérations ou de sites industriels (e.g. Gravelines, Le Bugey, Nogent-sur-Seine [8, 9]), elle devrait être construite de façon à être facilement modifiable ultérieurement pour pouvoir fonctionner en mode cogénération d'électricité et de chaleur. Pour un coût additionnel relativement modeste (prévision d'un espace suffisant à l'implémentation d'équipements tels que des échangeurs de chaleur [10]), cela garantirait la possibilité future d'utiliser l'énergie thermique actuellement perdue. Parallèlement, le développement des réseaux de chaleur et des éco-parcs industriels devrait être fortement soutenu par tous les canaux, en particulier locaux et régionaux.

Par ailleurs, la quantité de chaleur générée par les REP de grande puissance dépasse souvent et de loin les besoins thermiques environnants. Il serait alors pertinent d'explorer la possibilité de concevoir des réacteurs nucléaires de plus faibles puissances, comme les SMR (Small and Modular Reactors, voir p. 97 et p. 103) pour une production de chaleur plus adaptée.

Plus généralement, il est essentiel d'intégrer les systèmes énergétiques dans un ensemble cohérent présentant une efficacité énergétique globale et offrant des choix technologiques nouveaux aux industriels. La transition énergétique se fera dans la complémentarité des énergies et des technologies, dans la recherche de synergies, et non pas dans une opposition entre les différents modes de production ou d'économie d'énergie. ■



- 1• IEA (International Energy Agency). Renewables 2019. Report extract Heat. <https://cutt.ly/iea-renewables-2019>
- 2• Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, « Application de l'article 14.5 de la Directive 2012/27/UE concernant la connexion aux réseaux de chaleur des producteurs générant un excès de chaleur », Décret n° 2014-1363 du 14 novembre 2014.
- 3• H. Safa, "Heat Recovery From Nuclear Power Plants", *Electrical Power & Energy Systems*, **42** (2012) 553-559.
- 4• STUK (Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority), "Preliminary Safety Assessment of the Fennovoima Oy Nuclear Power Plant Project" (2009).
- 5• Q. Ma et al., "A review on transportation of heat energy over long distance: Exploratory development", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13** (2009), 1532–1540.
- 6• J. Leppänen, "A Review of District Heating Reactor Technology", *VTT Technical Research Center of Finland*. <https://cutt.ly/cris-vtt-pdf>
- 7• M. Lipka et A. Rajewski, "Regress in nuclear district heating: The need for rethinking cogeneration", *Progress in Nuclear Energy*, **130** (2020) 103518.
- 8• M. Leurent et al., "Cost-benefit analysis of district heating systems using heat from nuclear plants in seven European countries", *Energy*, **149** (2018) 454-472.
- 9• M. Leurent et al., "Cost and climate savings through nuclear district heating in a French urban area", *Energy Policy* **115(C)** (2018) 616-630.
- 10• ETI (Energy Technology Institute). "System Requirements for Alternative Nuclear Technologies – Phase 3. Technical assessment of SMR heat extraction for district heat networks" (2016). <https://cutt.ly/eti-phase-3>

(a) La température maximale de l'eau du circuit secondaire d'un réacteur nucléaire ne dépasse guère 300°C.

(b) Le rendement de Carnot est d'autant plus élevé que la température maximale du fluide calorifique l'est.