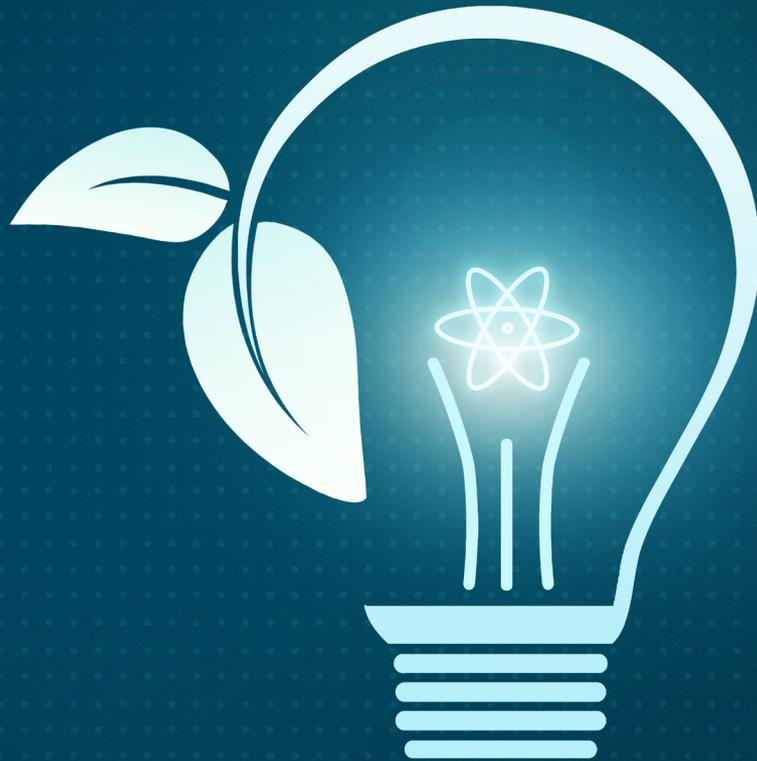


# IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

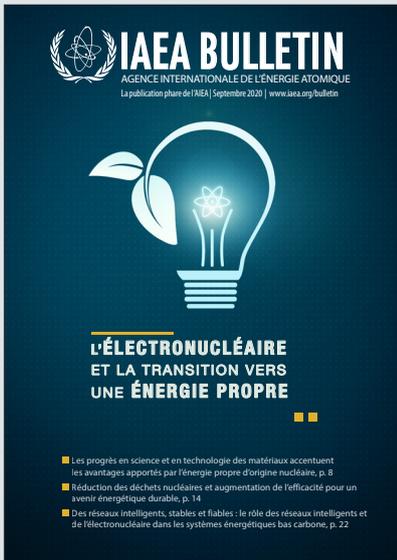
La publication phare de l'AIEA | Septembre 2020 | [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)



## L'ÉLECTRONUCLÉAIRE ET LA TRANSITION VERS UNE ÉNERGIE PROPRE



- Les progrès en science et en technologie des matériaux accentuent les avantages apportés par l'énergie propre d'origine nucléaire, p. 8
- Réduction des déchets nucléaires et augmentation de l'efficacité pour un avenir énergétique durable, p. 14
- Des réseaux intelligents, stables et fiables : le rôle des réseaux intelligents et de l'électronucléaire dans les systèmes énergétiques bas carbone, p. 22



### Le Bulletin de l'AIEA

est produit par  
le Bureau de l'information  
et de la communication (OPIC)  
Agence internationale de l'énergie atomique  
Centre international de Vienne  
B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)  
Téléphone : (43-1) 2600-0  
iaeabulletin@iaea.org

Direction de la rédaction : Nicole Jawerth  
Rédaction : Miklos Gaspar  
Conception et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'AIEA est consultable en ligne  
à l'adresse suivante :  
**[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)**

Des extraits des articles du Bulletin peuvent être  
utilisés librement à condition que la source soit  
mentionnée. Lorsqu'il est indiqué que l'auteur n'est pas  
fonctionnaire de l'AIEA, l'autorisation de reproduction,  
sauf à des fins de recension, doit être sollicitée auprès  
de l'auteur ou de l'organisation d'origine.

Les opinions exprimées dans le Bulletin ne  
représentent pas nécessairement celles de l'AIEA, et  
cette dernière décline toute responsabilité à cet égard.

Couverture : AIEA

Suivez-nous sur :



L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a pour mission de prévenir la dissémination des armes nucléaires et d'aider tous les pays – en particulier ceux du monde en développement – à tirer parti de l'utilisation pacifique, sûre et sécurisée de la science et de la technologie nucléaires.

Créée en 1957 en tant qu'organe autonome, l'AIEA est le seul organisme du système des Nations Unies à être spécialisé dans les technologies nucléaires. Ses laboratoires spécialisés uniques au monde aident au transfert de connaissances et de compétences à ses États Membres dans des domaines comme la santé humaine, l'alimentation, l'eau, l'industrie et l'environnement.

L'AIEA sert aussi de plateforme mondiale pour le renforcement de la sécurité nucléaire. Elle a créé la collection Sécurité nucléaire, dans laquelle sont publiées des orientations sur la sécurité nucléaire faisant l'objet d'un consensus international. Ses travaux visent en outre à réduire le risque que des matières nucléaires et d'autres matières radioactives tombent entre les mains de terroristes ou de criminels, ou que des installations nucléaires soient la cible d'actes malveillants.

Les normes de sûreté de l'AIEA définissent un système de principes fondamentaux de sûreté et sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un degré élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements ionisants. Elles ont été élaborées pour tous les types d'installations et d'activités nucléaires destinées à des fins pacifiques ainsi que pour les mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants.

En outre, l'AIEA vérifie, au moyen de son système d'inspections, que les États Membres respectent l'engagement qu'ils ont pris, au titre du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires et d'autres accords de non-prolifération, de n'utiliser les matières et installations nucléaires qu'à des fins pacifiques.

Les tâches de l'AIEA sont multiples et font intervenir un large éventail de partenaires aux niveaux national, régional et international. Les programmes et les budgets de l'AIEA sont établis sur la base des décisions de ses organes directeurs – le Conseil des gouverneurs, qui compte 35 membres, et la Conférence générale, qui réunit tous les États Membres.

L'AIEA a son siège au Centre international de Vienne. Elle a des bureaux locaux et des bureaux de liaison à Genève, à New York, à Tokyo et à Toronto. Elle exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, à Seibersdorf et à Vienne. En outre, elle apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique de Trieste (Italie).

# Vers un avenir énergétiquement propre

Par Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

L'électronucléaire a un rôle vital à jouer dans la lutte contre l'urgence climatique mondiale.

Il est déjà la source d'un tiers de toute l'électricité bas carbone produite dans le monde et, grâce à l'énergie qu'il fournit de manière continue et fiable, il peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en répondant aux besoins d'une population mondiale en expansion, surtout dans les pays en développement.

Les centrales nucléaires en service n'émettent quasiment pas de gaz à effet de serre ou de polluants atmosphériques et leurs émissions tout au long de leur cycle de vie sont très faibles. Elles constituent un complément essentiel aux sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le solaire, qui sont intermittentes.

La contribution remarquable de l'électronucléaire – qui a par exemple déjà permis d'éviter l'émission de 55 gigatonnes de dioxyde de carbone au cours des 50 dernières années – et le potentiel considérable des technologies innovantes en cours de développement méritent d'être mieux connus.

C'est pourquoi j'ai décidé que le premier forum scientifique de mon mandat en tant que Directeur général de l'AIEA aurait pour thème « L'électronucléaire et la transition vers une énergie propre ». Des scientifiques et des experts renommés du monde entier se réuniront pendant deux jours pour examiner le rôle crucial que les solutions scientifiques offertes par l'électronucléaire peuvent jouer dans l'instauration d'un avenir durable.

Dans la présente édition du *Bulletin de l'AIEA*, vous en apprendrez davantage sur la transition vers une énergie propre et la place qu'y occupe l'électronucléaire (page 4) ainsi que sur la façon dont, grâce à leur robustesse, les centrales nucléaires peuvent contribuer à la fourniture ininterrompue d'énergie lors d'événements extrêmes, comme des pandémies ou des conditions météorologiques extrêmes résultant du changement climatique (page 6).

Vous aurez un aperçu des innovations qui guideront l'avenir de l'énergie nucléaire. Les progrès en science des matériaux, par exemple, permettent d'exploiter les centrales nucléaires de manière sûre, durable et économique beaucoup plus longtemps que prévu (page 8). Grâce en

partie à des concepts, des technologies et des matériaux nouveaux, les réacteurs à neutrons rapides se prêteront à une production d'énergie plus efficace en générant nettement moins de déchets (page 14). De même, les modèles et dispositifs de sûreté améliorés des grands réacteurs nucléaires avancés (page 11) et des petits réacteurs modulaires et des microréacteurs (page 16) offrent aux pays un large éventail d'options à même de répondre à leurs besoins énergétiques et climatiques grâce à l'électronucléaire.

Les bienfaits de l'innovation ne se limitent pas à la production d'énergie d'origine nucléaire. Des politiques de financement tournées vers l'avenir aident à surmonter les difficultés économiques liées aux nouveaux projets électronucléaires (page 24). Les technologies « intelligentes », comme l'intelligence artificielle et l'« Internet des objets », associées à l'électronucléaire, améliorent l'efficacité, la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques dans lesquels les sources d'énergie renouvelable occupent une large place (page 22). Les applications non électriques des installations électronucléaires, comme la production d'hydrogène, font profiter des secteurs tels que l'industrie et le transport des avantages de l'énergie nucléaire bas carbone (page 18).

Les avancées de la technologie électronucléaire doivent s'accompagner de progrès en matière de sûreté, de sécurité et de garanties nucléaires. Un nouveau cadre réglementant la neutralité technologique destiné à permettre l'utilisation de technologies nucléaires innovantes sans porter atteinte à la sûreté est en cours d'élaboration (page 26). En ce qui concerne les garanties, des réseaux neuronaux actuellement mis au point devraient aider les analystes à examiner de manière plus efficace et rationnelle les données de surveillance recueillies dans le cadre des activités de vérification afin de favoriser la non-propagation des armes nucléaires (page 28).

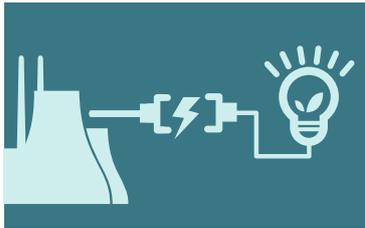
La réalisation des objectifs de développement durable et des objectifs climatiques est un défi colossal. L'électronucléaire, technologie mature et éprouvée, peut apporter une formidable contribution à cet égard. L'AIEA continuera de faire tout son possible pour faciliter la transition mondiale vers un avenir énergétiquement propre grâce à la technologie nucléaire.



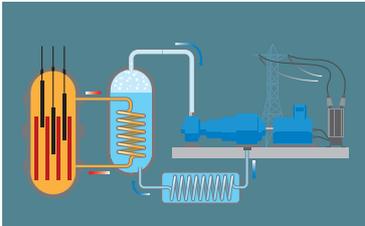
**« L'AIEA continuera de faire tout son possible pour faciliter la transition mondiale vers un futur énergétiquement propre grâce à la technologie nucléaire. »**

— Rafael Mariano Grossi,  
Directeur général de l'AIEA





**1 Vers un avenir énergétiquement propre**



**4 Qu'est-ce que la transition vers une énergie propre et quelle place y occupe l'électronucléaire ?**



**6 Résilience et sûreté de l'électronucléaire face aux événements extrêmes**



**8 Les progrès en science et en technologie des matériaux accentuent les avantages apportés par l'énergie propre d'origine nucléaire**



**11 Les réacteurs avancés, le nouvel atout de l'électronucléaire au service des objectifs climatiques**



**14 Réduction des déchets nucléaires et augmentation de l'efficacité pour un avenir énergétique durable**



**16 Petits réacteurs, grand potentiel**



## 18 Bien plus qu'une source d'électricité

La production nucléaire d'hydrogène au service d'un avenir bas carbone



## 22 Des réseaux intelligents, stables et fiables

Le rôle des réseaux intelligents et de l'électronucléaire dans les systèmes énergétiques bas carbone



## 24 Investir dans la transition vers une énergie propre

Financement de l'électronucléaire et aide économique



## 26 Sûreté et autorisation des petits réacteurs modulaires

Une approche technologiquement neutre



## 28 Évoluer pour l'avenir

Les garanties et l'électronucléaire

Dans le monde

## 30 Intensifier la décarbonisation grâce à l'énergie nucléaire

— Par Kirsty Gogan et Eric Ingersoll

Infos AIEA

## 32 Actualités

## 36 Publications

# Qu'est-ce que la transition vers une énergie propre et quelle place y occupe l'électronucléaire ?

Par Nicole Jawerth

L'énergie est un élément essentiel aux activités quotidiennes et au développement humain et économique. En 2019, plus de 26 000 térawatts-heures d'électricité ont été produits à l'échelle mondiale, principalement à partir de combustibles fossiles mais aussi de l'énergie nucléaire et de sources d'énergie renouvelables, comme les énergies solaire, hydraulique et éolienne.

La production et la consommation d'énergie sont les principales sources des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Ces gaz étant une des principales causes des changements climatiques, les pays du monde entier s'efforcent activement d'amorcer une transition vers une énergie propre en modifiant leur mode de production énergétique.

Intéressons-nous de plus près à cette transition et au rôle de l'électronucléaire.

## Qu'est-ce que la « transition vers une énergie propre » ?

La transition vers une énergie propre suppose de transformer notre mode de production énergétique en délaissant les sources qui émettent de grandes quantités de gaz à effet de serre, comme les combustibles fossiles, au profit des sources qui en génèrent peu ou pas, comme l'électronucléaire et les énergies hydraulique, éolienne et solaire.

La décision de s'engager sur cette voie a été prise dans l'Accord de Paris, accord international adopté par plus de 180 pays parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), afin de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels en encourageant l'utilisation de sources d'énergie bas carbone pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Alors que près des deux tiers de l'électricité mondiale sont encore produits à partir de combustibles fossiles, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime qu'il faudra qu'au moins 80 % de l'électricité provienne de sources bas carbone pour atteindre les objectifs climatiques d'ici à 2050.

## Que sont les gaz à effet de serre, le réchauffement climatique et les changements climatiques ?

Les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, le méthane, la vapeur d'eau, le protoxyde d'azote et l'ozone, absorbent la chaleur dans l'atmosphère et la réémettent vers la Terre, augmentant ainsi la température moyenne de la planète.

Si certains de ces gaz sont d'origine naturelle, la plupart sont aujourd'hui générés par l'homme. Depuis la révolution industrielle à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté comme suite à la hausse de l'activité humaine et en particulier de l'utilisation de combustibles fossiles, notamment pour les carburants des automobiles et la production de chaleur à partir du charbon. En brûlant, ces combustibles rejettent du dioxyde de carbone.

Depuis plus d'un siècle, les gaz à effet de serre s'accumulent plus vite qu'ils ne se dissipent, ce qui, d'après les théories scientifiques les plus admises, accélère l'élévation de la température moyenne de la planète. C'est ce qu'on appelle le « réchauffement climatique ».

Ce phénomène entraîne des changements environnementaux, comme des conditions météorologiques plus extrêmes, des précipitations irrégulières, des périodes de sécheresse et des changements saisonniers imprévisibles, qui sont désignés collectivement sous le terme de « changements climatiques ». Au rythme actuel du réchauffement climatique, on s'attend à ce que les changements climatiques et leurs effets s'intensifient et rendent la vie sur Terre plus difficile.

## Quelle est la place de l'électronucléaire dans la transition vers une énergie propre ?

L'électronucléaire est la deuxième source d'énergie bas carbone la plus utilisée actuellement pour produire de l'électricité, après l'énergie hydraulique. Les centrales nucléaires n'émettent presque pas de gaz à effet de serre pendant l'exploitation. D'après l'AIE, l'utilisation de l'électronucléaire a permis de réduire les émissions de dioxyde de carbone de plus de 60 gigatonnes au cours des 50 dernières années, soit l'équivalent de près de deux ans d'émissions par le secteur énergétique mondial.

L'électronucléaire représente environ 10 % de l'électricité mondiale et près d'un tiers de l'électricité bas carbone produite dans le monde. À l'heure actuelle, 440 réacteurs nucléaires de puissance sont en exploitation dans 30 pays, et 54 sont en construction dans 19 pays, dont 4 n'en ayant pas encore.

Du fait qu'elles peuvent fonctionner à pleine capacité de manière quasi ininterrompue, les centrales nucléaires peuvent assurer un approvisionnement énergétique continu et fiable. À l'inverse, les sources d'énergie renouvelables intermittentes, comme les énergies solaire et éolienne, doivent être complétées par d'autres sources lors des périodes d'interruption de production, par exemple lorsque le soleil est couché ou que le vent cesse de souffler.

Les centrales nucléaires peuvent aussi fonctionner en régime flexible pour s'adapter aux fluctuations de la demande énergétique et assurer la stabilité des réseaux électriques, en particulier ceux dans lesquels les sources d'énergie renouvelables intermittentes occupent une large place (voir page 22). Certaines centrales nucléaires sont maintenant conçues pour fournir également des services non électriques, par exemple produire de l'hydrogène, ce qui peut favoriser la décarbonisation d'autres secteurs (voir page 18).

L'évolution des technologies électronucléaires a conduit à la conception de réacteurs avancés et innovants de la prochaine génération qui, en améliorant l'efficacité de l'électronucléaire et en réduisant son coût, renforcent son attrait pour la décarbonisation (voir page 11). Les nouveaux modèles de réacteurs plus petits, plus flexibles et, dans certains cas, transportables devraient aussi améliorer l'accessibilité et le rapport coût-performance de l'électronucléaire et de ses applications non électriques, en particulier pour les régions reculées et difficilement accessibles de la planète (voir page 16).

## Comment fonctionne l'électronucléaire ?

L'électronucléaire est l'électricité produite par la libération contrôlée d'énergie nucléaire, c'est-à-dire l'énergie qui assure la cohésion du centre (noyau) des atomes. Cette énergie est libérée sous forme de chaleur lors de la fission nucléaire, qui consiste à scinder le noyau de matières spécifiques. La matière la plus couramment utilisée est l'uranium, métal lourd faiblement radioactif présent naturellement dans la croûte terrestre.

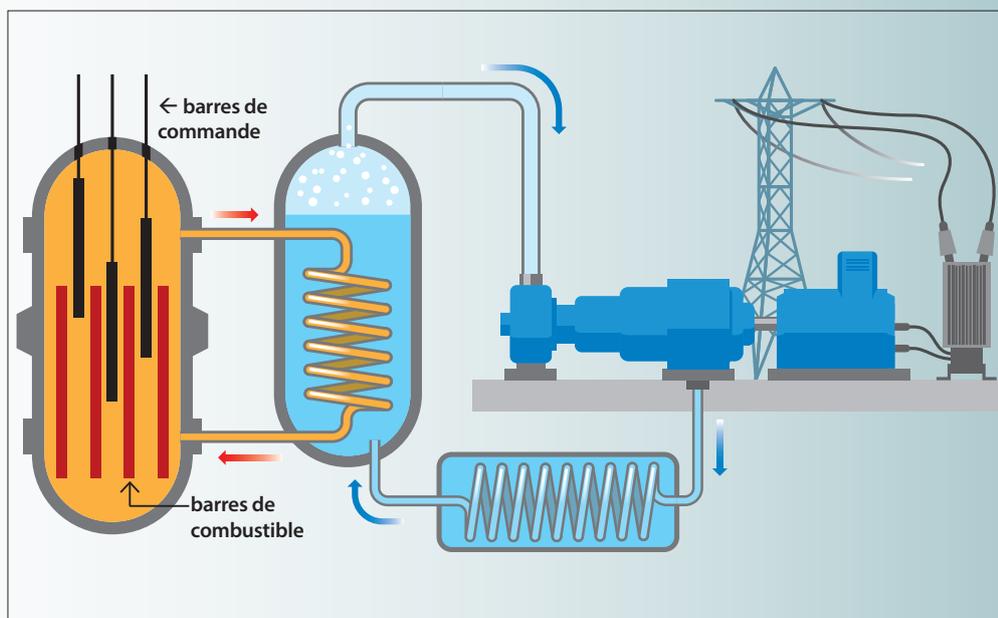


Schéma simplifié d'un réacteur à eau sous pression.

(Source : iStock.com/jack0m)

L'uranium, souvent enrichi pour augmenter sa capacité de fission, est généralement assemblé en barres de combustible qui sont placées à l'intérieur d'un réacteur nucléaire.

Dans le cas d'un réacteur à eau sous pression – le type de réacteur de puissance le plus utilisé dans le monde à l'heure actuelle – les barres de combustible sont placées dans la cuve du réacteur remplie d'eau. Elles sont alors bombardées de neutrons, particules nucléaires initialement générées par un dispositif (source neutronique) à l'intérieur du réacteur. Sous l'action de ces neutrons, les noyaux d'uranium dans les barres de combustible se scindent, libérant de l'énergie et des neutrons, lesquels provoquent à leur tour la fission d'autres noyaux d'uranium, et ainsi de suite, créant une réaction de fission nucléaire en chaîne.

Dans les réacteurs à eau sous pression, l'énergie libérée lors de la fission chauffe les barres de combustible et l'eau qui les entoure, qui est maintenue sous pression pour empêcher l'ébullition. La chaleur est extraite pour faire bouillir l'eau dans une autre cuve et produire de la vapeur, qui fait tourner une turbine géante à très grande vitesse. Cette turbine est connectée à un générateur qui se met également en mouvement, produisant de l'électricité. L'électricité alimente alors un réseau électrique interconnecté, qui assure l'acheminement de l'électricité des producteurs aux consommateurs.

La fission nucléaire se poursuit jusqu'à ce que les barres de commande soient insérées entre les barres de combustible. Ces barres de commande sont faites de matières telles que le cadmium, qui absorbent les neutrons sans provoquer de nouvelle fission, ce qui arrête la réaction en chaîne.

# Résilience et sûreté de l'électronucléaire face aux événements extrêmes

Par Matt Fisher

Les centrales nucléaires sont construites pour durer. Néanmoins, face à l'augmentation de la probabilité d'événements extrêmes mondiaux – susceptibles de toucher les centrales, comme les catastrophes naturelles et les conditions météorologiques intensifiées par les changements climatiques, ou leur personnel, comme l'augmentation du nombre de maladies infectieuses – la résilience et la contribution des centrales à la réduction des émissions de carbone dépendront de la flexibilité de leur personnel et de la solidité de leur conception.

Pour Loreta Stankeviciute, analyste des systèmes énergétiques à l'AIEA, la transformation fondamentale du secteur énergétique en un système d'approvisionnement en énergie bas carbone est nécessaire pour atténuer les changements climatiques au cours des 20 à 30 prochaines années. « Néanmoins, pour cela, il faut aussi que ce secteur puisse résister aux événements extrêmes et aux changements environnementaux et s'y adapter », précise-t-elle. « De par sa résilience et sa sûreté, l'électronucléaire est bien placé pour aider la communauté internationale à surmonter ces difficultés. »

## Pandémies

La résilience des centrales a été testée récemment lors de la pandémie inédite de COVID-19.

La propagation du virus de la COVID-19 sur l'ensemble du globe, au début de l'année 2020, a bouleversé les sociétés et les économies. De nombreuses restrictions, dont des mesures de confinement, ont été mises en place pour limiter cette propagation.

« Malgré ces contraintes mondiales, les centrales nucléaires ont continué de fonctionner en toute sûreté partout dans le monde. Les exploitants ont appliqué des plans d'urgence

en douceur et pris toute une série de mesures pour assurer le maintien des opérations et la sûreté du personnel. Ils ont pris les précautions nécessaires et effectué des modifications opérationnelles et organisationnelles judicieuses tout en continuant d'assurer la sûreté et la sécurité des centrales », déclare le Directeur de la Division de la sûreté des installations nucléaires de l'AIEA, Greg Zrentkowski.

Les rapports des exploitants montrent que, si aucun pays n'a signalé avoir dû mettre à l'arrêt un réacteur de puissance en raison des effets de la COVID-19, certains arrêts de maintenance programmés ont dû être raccourcis ou reportés avec l'accord des organismes de réglementation, conformément aux mesures de protection sanitaire qui ont entraîné une réduction temporaire des activités non essentielles. De plus, les perturbations de la chaîne d'approvisionnement liées à la pandémie, notamment les retards dans la fourniture de services et l'arrêt momentané des activités des fabricants, pourraient retarder la mise en œuvre des projets de construction et de rénovation majeure.

« On ne sait pas encore exactement quel impact les perturbations liées à la pandémie auront sur le secteur industriel », explique le Directeur de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA, Dohee Hahn. « Les informations que nous continuons de recevoir nous donnent des indications précieuses sur les répercussions de la pandémie sur l'industrie nucléaire et aideront les exploitants et les responsables de la réglementation à tirer des enseignements de leurs expériences respectives. »

Non seulement l'électronucléaire a prouvé sa résilience pendant la pandémie, mais il a aussi montré qu'il était sûr et adapté pour répondre à l'évolution des besoins énergétiques. Sa part dans le bouquet énergétique de certains pays a augmenté depuis le début de la pandémie, notamment au Brésil, en Corée du Sud et en Inde. Au Royaume-Uni, par

(photo : G. Desjardis/Reveis)

exemple, il a grandement contribué à la réduction spectaculaire de la consommation de charbon à des fins de production électrique : en effet, la baisse de la demande d'électricité provoquée par la pandémie a permis au Royaume-Uni de fermer temporairement des centrales au charbon pour recourir davantage à l'électronucléaire.

## Changements climatiques

La résilience du personnel des centrales n'a pas seulement été nécessaire à la poursuite harmonieuse de l'exploitation pendant la pandémie ; avec la conception robuste des centrales, elle est aussi indispensable pour faire face aux phénomènes météorologiques extrêmes, notamment ceux découlant des changements climatiques.

Provoqués par l'élévation de la température moyenne de la planète, les changements climatiques influent sur la gravité et la fréquence des événements météorologiques tels que les périodes de températures extrêmes ou de fortes précipitations, la violence des vents et les fortes hausses du niveau des mers. Ces changements devraient encore s'intensifier à court comme à long terme.

« Si l'élévation du niveau des mers et de la température de l'air peut poser problème pour la continuité de l'exploitation d'un réacteur en limitant sa capacité de refroidissement, ce sont les fortes inondations et les vents violents qui, en menaçant la conception de l'installation, risquent de compromettre la sûreté de cette dernière », explique Greg Rzentkowski. « Un des problèmes avec les changements climatiques, c'est que plus ils gagnent du terrain et accentuent les événements extrêmes, moins les observations passées et les modèles prédictifs sont fiables. C'est pourquoi nous devrions commencer à anticiper ces événements et réévaluer périodiquement les risques pertinents pour veiller à ce que les mesures de prévention et d'atténuation des accidents restent adaptées. »

## Événements naturels

Les centrales nucléaires peuvent aussi être affectées par les événements naturels extrêmes tels que les séismes, les tornades, les épisodes d'activité volcanique, les tempêtes de verglas et les inondations. Dans de rares circonstances, ces événements peuvent être tellement extrêmes qu'ils dépassent la base de conception des centrales.

On peut citer comme exemple l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (Japon) le 11 mars 2011, provoqué par un tsunami faisant suite à un violent tremblement de terre. Si la centrale nucléaire a été endommagée par ces événements et les explosions d'hydrogène qui s'en sont suivies, aucun décès n'a été à déplorer.

Au lendemain de l'accident, des mesures concrètes ont été prises pour renforcer la sûreté des centrales nucléaires existantes et concevoir des nouvelles centrales plus résistantes aux événements extrêmes. Ces mesures comprennent notamment des options de refroidissement alternatives, des générateurs de secours certifiés au niveau environnemental, des boucliers et des scellés de protection face au vent, et des digues et autres barrages destinés à protéger contre les inondations.

Tous les types d'événements externes susceptibles de toucher un site nucléaire ou de compromettre la sûreté des installations nucléaires sont couverts dans les normes de sûreté de l'AIEA, notamment celles concernant l'évaluation du site et l'évaluation de la conception et de la sûreté. Ces normes correspondent à la pratique actuelle et servent à garantir la sûreté des centrales tout au long de leur durée de vie utile. L'AIEA fournit également des orientations dans ses publications de la collection Énergie nucléaire et d'autres publications techniques, notamment celle consacrée à l'adaptation du secteur énergétique aux changements climatiques.



# Les progrès en science et en technologie des matériaux accentuent les avantages apportés par l'énergie propre d'origine nucléaire

Par Carley Willis

Les progrès de la science et de la technologie des matériaux aident à prolonger la durée de vie des centrales nucléaires, ce qui permet aux pays exploitants de continuer à recueillir les bienfaits de l'énergie propre qu'elles produisent.

« Le coût de la rénovation d'une centrale nucléaire pour une exploitation à long terme est très inférieur à celui de la construction d'une nouvelle centrale nucléaire », explique Ed Bradley, chef d'équipe chargé de l'appui à l'ingénierie et à l'exploitation des centrales nucléaires à l'AIEA.

« L'exploitation à long terme d'une centrale nucléaire constitue une excellente occasion de pérenniser la génération actuelle de ces installations, une des sources les plus rentables d'électricité bas carbone. Grâce aux matériaux et ressources dont nous disposons aujourd'hui et que nous n'avions pas auparavant, cette option est devenue attrayante et compétitive pour de nombreux pays qui cherchent à réduire leurs émissions de carbone. »

La plupart des réacteurs de centrales nucléaires ont été construits initialement pour avoir une durée de vie utile comprise entre 30 et 40 ans. Pour prolonger la durée de vie d'une centrale nucléaire, il faut notamment déterminer si, du point de vue de la sûreté, de la sécurité et de la rentabilité, elle peut continuer de fonctionner après sa date supposée de mise à l'arrêt. Quand sa durée de vie est prolongée, elle peut souvent continuer à être exploitée 20 à 40 ans de plus.

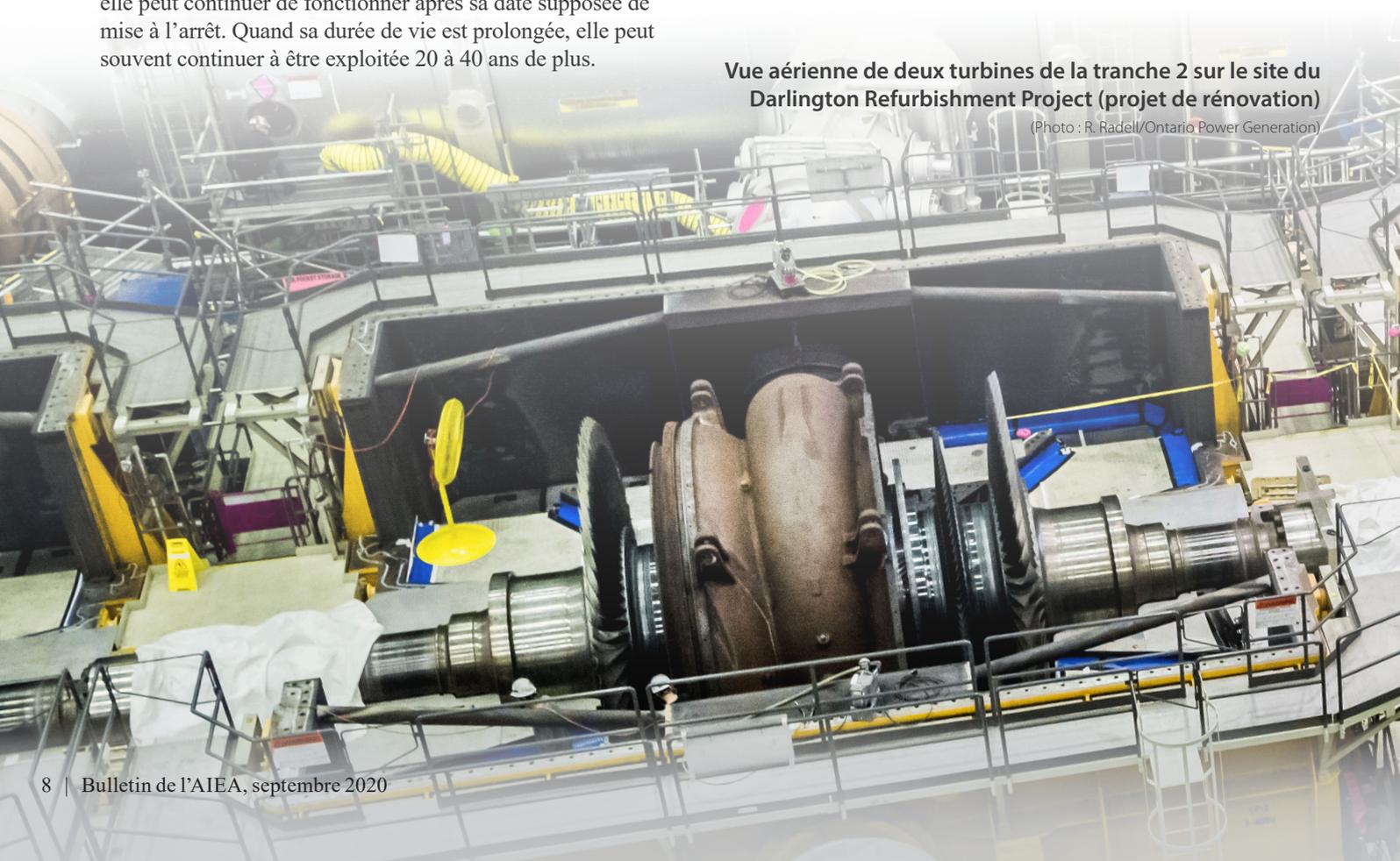
« Compte tenu du travail approfondi et rigoureux mené lors du choix initial du site, de la conception et de la construction d'une centrale nucléaire, ainsi que de la gestion du vieillissement assurée tout au long de son exploitation, assortie de certaines mises à niveau et rénovations, nombre de ces installations peuvent continuer à fonctionner en toute sûreté bien après la date de leur mise à l'arrêt prévue au départ. », déclare Robert Krivanek, spécialiste principal de la sûreté à l'AIEA. « Cependant, leurs composants et leur conception étant parfois tels qu'il est impossible de les rénover facilement ou à moindres coûts, certaines d'entre elles ne sont pas adaptées à une exploitation à long terme », ajoute-t-il.

L'un des problèmes majeurs posés par un réacteur nucléaire de puissance vieillissant est celui de la dégradation. En cours d'exploitation, ses structures et composants doivent résister à des températures élevées, à des conditions difficiles et à un fonctionnement en continu qui peuvent les user au fil du temps.

« Des évaluations régulières et le remplacement d'éléments peuvent atténuer le phénomène de dégradation mais, sur le long terme, ce n'est peut-être pas l'approche la plus rentable, surtout en vue d'une exploitation destinée à durer », déclare Ed Bradley.

**Vue aérienne de deux turbines de la tranche 2 sur le site du Darlington Refurbishment Project (projet de rénovation)**

(Photo : R. Radell/Ontario Power Generation)



## Des techniques et matériaux nouveaux

Grâce à la mise au point de nouvelles techniques, comme le soudage laser et le soudage par friction-malaxage, et de nouveaux matériaux, comme l'acier duplex, qui résiste mieux à la corrosion, certains composants peuvent maintenant durer plus longtemps en toute sûreté et, partant, l'exploitation prolongée d'une centrale nucléaire est plus aisée d'un point de vue économique.

Par ailleurs, des chercheurs comprennent maintenant mieux comment les différences de conditions d'exploitation entre centrales nucléaires peuvent affecter leurs composants et structures. Par exemple, dans le cas des réacteurs CANDU, qui ont été mis en service entre 1970 et 1993 en Ontario (Canada), la recherche en science des matériaux et l'inspection des composants ont permis à certains de ces derniers de fonctionner de manière sûre dix ans de plus que les 30 ans prévus. Un programme de rénovation s'élevant à 18,5 milliards de dollars É-U prolongera encore l'exploitation de ces réacteurs pour un second cycle d'une durée maximale de quarante ans. Ainsi, certains réacteurs construits dans les années 1980 seront encore en service dans les années 2060, dans de bonnes conditions de sûreté.

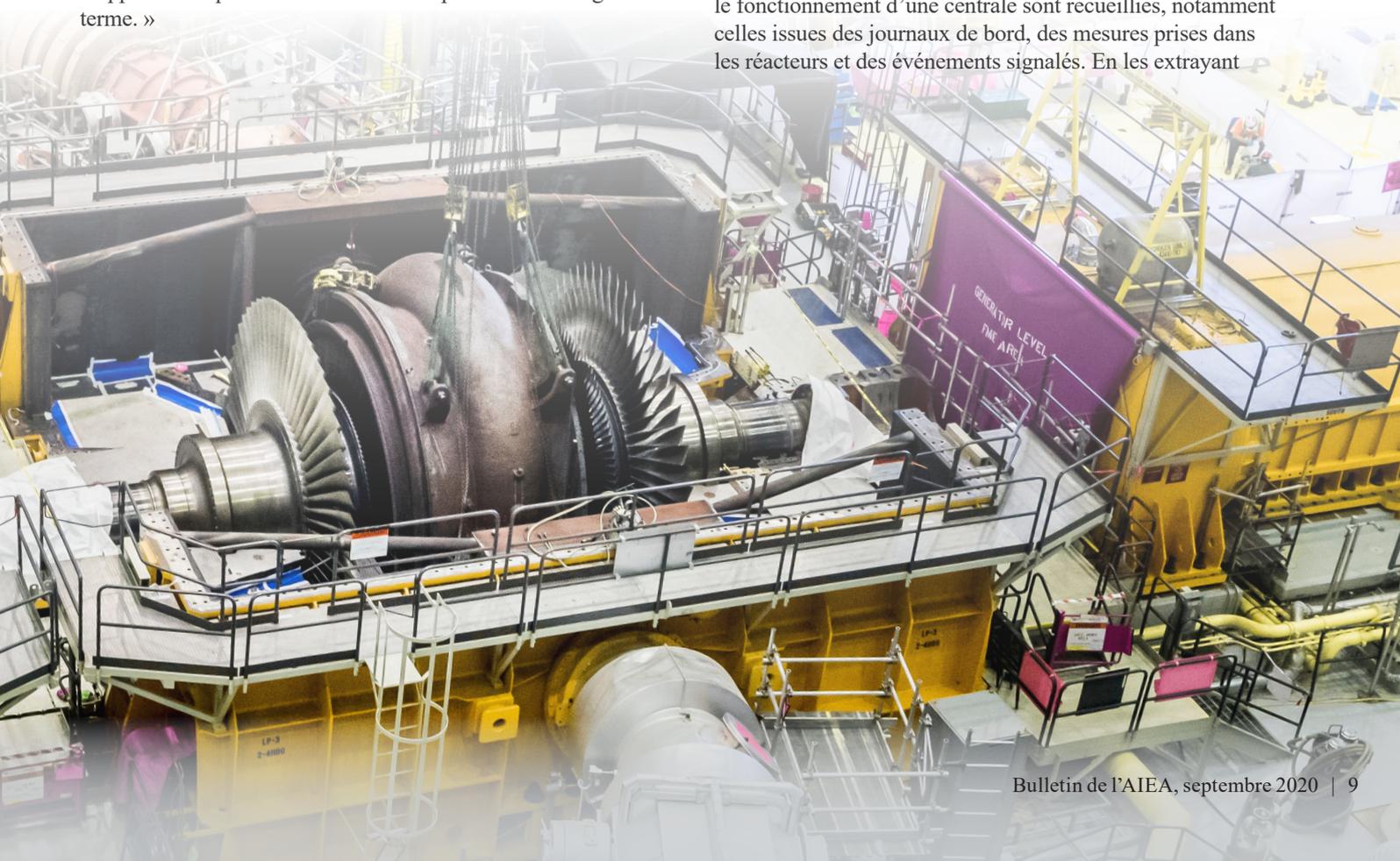
« Nos réacteurs ont été construits à une époque où nous étions peu familiarisés avec les centrales nucléaires, et la durée de vie de nos modèles prévue au départ était prudemment estimée à 30 ans », déclare Fred Demarkar, Président-directeur général du Groupe de propriétaires de CANDU, groupe d'exploitants de centrales nucléaires présent dans sept pays dotés de réacteurs CANDU. « C'est en exploitant ces appareils, en apprenant à les connaître et à comprendre leur processus de vieillissement que nous nous rendons compte de l'avantage inappréciable que nous retirons à les exploiter sur le long terme. »

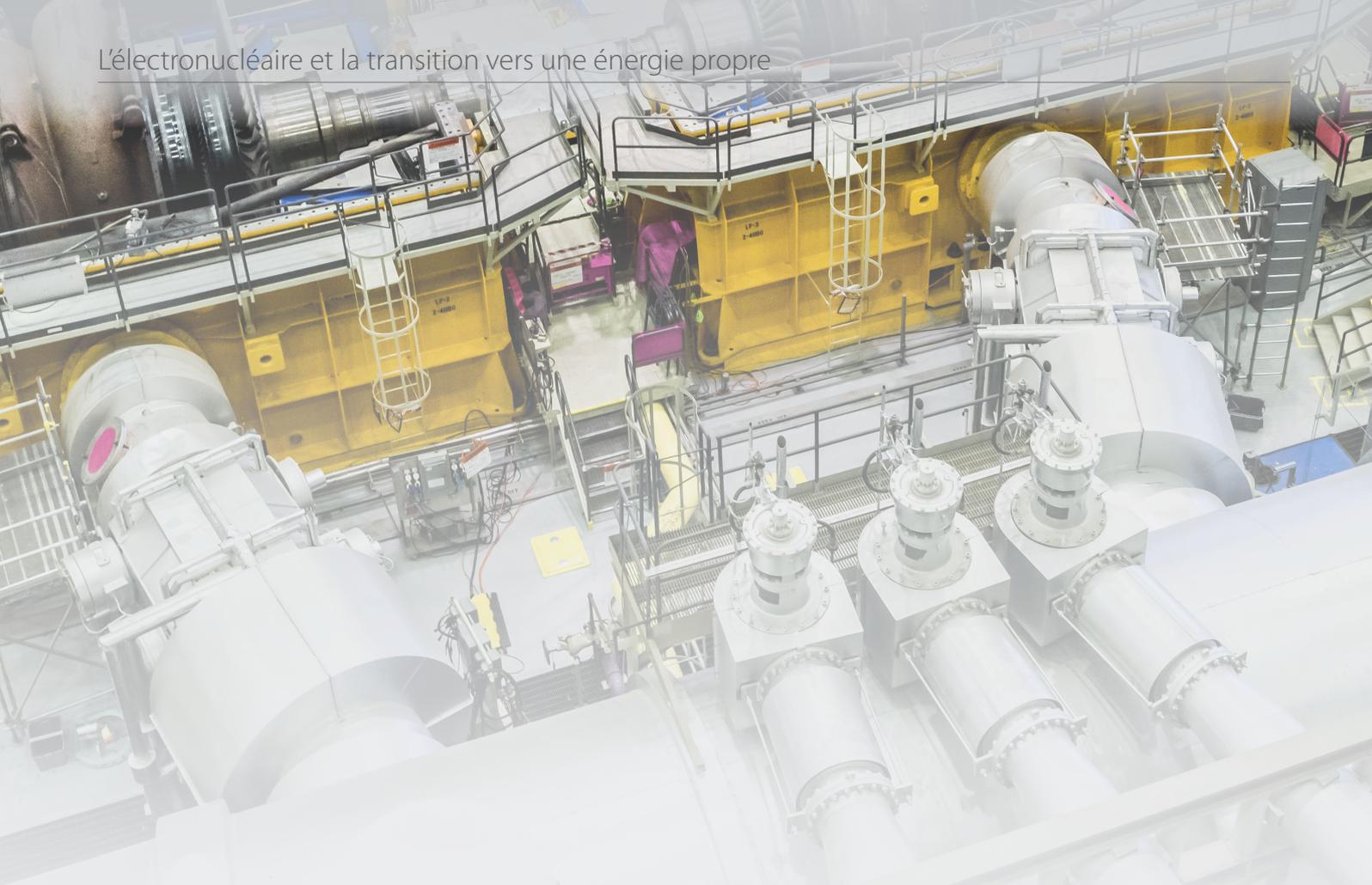
Fred Demarkar explique comment s'appuyer sur la recherche de pointe menée en science des matériaux pour prédire le comportement de ceux-ci plusieurs années à l'avance. « Les réacteurs CANDU sont dotés de composants appelés tubes de force pour refroidir le combustible. Dans l'enceinte de ces réacteurs, les propriétés de ces derniers évoluent avec le temps, en raison de l'intensité des flux de neutrons et de la pression et des températures élevées, ainsi que de la corrosion due à l'eau de refroidissement. Pour anticiper les changements dus à la corrosion, par exemple, nous commençons par examiner les tubes de force irradiés ayant été extraits des réacteurs en service. Nous leur appliquons ensuite des techniques d'accélération artificielle de la corrosion, puis nous soumettons ces composants vieilliss artificiellement à des tests poussés afin de déterminer les propriétés de leurs matériaux. Nous sommes ainsi à même d'établir la durée pendant laquelle nous pouvons les utiliser. C'est en ayant une longueur d'avance en laboratoire que nous pouvons nous assurer que ces composants continueront de fonctionner de manière sûre et fiable jusqu'à leur date prévue de rénovation », explique-t-il.

## Mégadonnées et électronucléaire

Par ailleurs, des chercheurs étudient en ce moment comment mesurer et établir la possibilité d'exploiter une centrale nucléaire à long terme à partir de mégadonnées. Ce terme « mégadonnées » fait référence à l'analyse de quantités considérables et extrêmement complexes de données recueillies très rapidement et souvent en temps réel qui permet de dégager des tendances et des schémas et de prédire des effets et des comportements.

Dans le cadre de l'exploitation à long terme d'une centrale nucléaire, des millions de données sur le fonctionnement d'une centrale sont recueillies, notamment celles issues des journaux de bord, des mesures prises dans les réacteurs et des événements signalés. En les extrayant





à l'aide de logiciels dédiés, les chercheurs peuvent prédire, grâce à des outils de simulation, la manière dont les systèmes, structures et composants d'une centrale vont probablement vieillir dans différentes conditions, déterminer ceux qui auront besoin d'être remplacés et estimer à peu près le moment où cette opération devrait intervenir.

« Les mégadonnées ne sont pas seulement l'avenir, elles s'inscrivent dans le présent et commencent à s'imposer », déclare Fred Demarkar. « Nos centrales nucléaires se modernisent ; elles sont équipées de davantage d'instruments portables et faciles à installer, ce qui nous permet de recueillir des données et d'anticiper les problèmes au plus tôt, et donc de prendre des mesures correctives sans délai. Nous constatons de réels avantages : elles fonctionnent mieux maintenant qu'à n'importe quel autre moment de leur passé. »

Aider les pays concernés à mener à bien l'exploitation à long terme de leurs centrales nucléaires est un des aspects de l'action menée par l'AIEA. Celle-ci élabore des normes de sûreté reconnues au niveau international, donne des orientations dans des publications techniques comme

celle intitulée « Ageing Management for Nuclear Power Plants : International Generic Ageing Lessons Learned » (Gestion du vieillissement des centrales nucléaires : enseignements génériques tirés au niveau international), et partage son savoir-faire dans le cadre des missions d'examen par des pairs des Questions de sûreté concernant l'exploitation à long terme (SALTO). Elle coordonne également un groupe de travail permettant à des exploitants, organismes de réglementation et décideurs des quatre coins du globe de mettre en commun leurs données d'expérience et d'échanger leurs bonnes pratiques.

« Le problème principal d'une exploitation à long terme, c'est de maintenir les normes de sûreté les plus rigoureuses tout en restant soucieux de la rentabilité », déclare Garry G Young, Directeur des services de renouvellement des licences chez Entergy Nuclear et Président du groupe de travail de l'AIEA sur l'exploitation à long terme. « Notre groupe de travail recherche sans cesse des moyens de garantir efficacité et sûreté, et de diffuser les résultats et les avancées obtenus dans le domaine, de sorte que les travaux de recherche-développement profitent à tous. »

# Les réacteurs avancés, le nouvel atout de l'électronucléaire au service des objectifs climatiques

Par Matt Fisher

Les réacteurs avancés contribuent à faire de l'électronucléaire une solution énergétique sobre en carbone plus accessible, plus durable et plus abordable. Bénéficiant de caractéristiques de sûreté améliorées et de conceptions optimisées au service de la rentabilité, ils devraient ouvrir la voie à des modèles économiques plus avantageux, à une simplification des procédures d'autorisation et à une meilleure acceptation du public, ce qui à terme amènera les pays à envisager plus facilement de faire appel à l'électronucléaire pour atteindre leurs objectifs climatiques.

« Conçus pour être exploités pendant au moins soixante ans et pour faciliter l'application de procédures d'autorisation simplifiées, les réacteurs avancés correspondent à l'objectif d'atténuation des changements climatiques, qui requiert à la fois une mise en œuvre rapide et une viabilité à long terme, explique Stefano Monti, Chef de la Section du développement de la technologie électronucléaire de l'AIEA. Le soutien et l'acceptation de la population sont cruciaux pour l'avenir de l'électronucléaire, et l'idée qu'on se fait dans le monde de cette importante source d'électricité sobre en carbone s'améliorera à mesure que les modèles de réacteurs gagneront en sûreté et en rentabilité. »

Les réacteurs avancés, leurs combustibles et les cycles de combustible associés sont à l'avant-garde de la technologie électronucléaire. Ils sont le fruit de plus de 60 ans de travaux de recherche-développement menés et de connaissances acquises dans le domaine électronucléaire.

L'AIEA aide les pays à cerner et à résoudre les difficultés associées à la mise au point des réacteurs avancés, notamment en ce qui concerne l'innovation technologique et les critères de conception de la sûreté. Ce soutien prend la forme de projets et d'activités de recherche menés en collaboration, notamment d'ateliers auxquels prennent part des experts internationaux, mais aussi d'une coopération avec le Forum international Génération IV (GIF), projet de coopération internationale qui réunit aujourd'hui 13 pays. Depuis sa création en 2000, le GIF mène des activités de recherche-développement en lien avec les systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération.

Les réacteurs avancés se différencient notamment des autres réacteurs par une efficacité thermique accrue, la minimisation des déchets, une optimisation de l'exploitation des ressources naturelles et la prise en charge d'applications non électriques, comme la production d'hydrogène (voir page 18), parallèlement à la production

d'électricité. Ces caractéristiques élargissent les possibilités d'exploitation et améliorent considérablement la rentabilité des centrales nucléaires.

## Des modèles de pointe

Il existe deux grandes catégories de réacteurs avancés : les modèles « évolutifs » et les modèles « innovants ». Les premiers proposent un moyen fiable et rapide de produire de l'énergie sobre en carbone, tandis que les seconds, modèles de demain, aideront encore davantage les pays à limiter leurs émissions de carbone, tout en permettant de réduire la quantité des déchets de haute activité et de développer les applications non électriques de l'électronucléaire.

Il existe actuellement 15 réacteurs évolutifs en service dans le monde, et d'autres doivent voir le jour dans l'avenir. L'APR1400 de la Corée du Sud et le VVER-1200 de la Russie sont tous deux des modèles de réacteurs à eau sous pression dotés d'une efficacité accrue et de caractéristiques de sûreté avancées. Parallèlement à l'implantation de l'APR1400 en Corée du Sud, il existe un autre réacteur de ce type, en cours de construction aux Émirats arabes unis, dont la première tranche devrait entrer en service en 2020.

Trois réacteurs VVER-1200 sont déjà exploités en Russie et d'autres sont actuellement construits au Bangladesh, au Bélarus, en Russie et en Turquie, la mise en service de nouvelles tranches au Bélarus étant prévue pour la fin de 2020. Le réacteur EPR de conception française, dont deux exemplaires sont en service en Chine et d'autres sont en construction en Finlande, en France et au Royaume-Uni, vise à simplifier les opérations de la centrale et à en doper la capacité de production.

D'une capacité de 1090 MWe, le réacteur HPR1000 de la Chine, aussi appelé Hualong One, est en construction sur des sites répartis sur tout le territoire national et ce pays prévoit d'en exporter le modèle, notamment en Argentine et au Royaume-Uni, les premières tranches devant entrer en service à la fin de 2020. Ce réacteur intègre des systèmes de sûreté passive et active complexes, notamment des barres de commande qui s'insèrent par la seule force de la gravité en cas de panne de courant et une nouvelle structure de confinement capable de résister à une pression plus forte, ce qui réduit les risques de fuites en cas d'accident nucléaire.

Le modèle AP1000, réacteur à eau sous pression de 1157 MWe, est déjà exploité dans deux centrales nucléaires en Chine. De conception relativement simple, il comporte moins de vannes et il est doté de

caractéristiques assumant des fonctions de sûreté qui tirent parti de forces naturelles (gaz sous pression, écoulement par gravité, circulation et convection naturelles, par exemple). D'autres tranches de type AP1000 sont en construction aux États-Unis, où il est prévu qu'elles commencent à produire de l'électricité d'ici 2022.

### L'innovation au service de la durabilité

Les réacteurs innovants en sont encore au stade de la mise au point, et la construction de certains modèles pourrait débiter à l'horizon 2030. Ils sont tous caractérisés par des températures d'exploitation élevées qui permettent de produire de l'électricité tout en prenant en charge des applications non électriques (telles que la production d'hydrogène). Ils bénéficient en outre de dispositifs de sûreté intrinsèque très robustes, d'une viabilité accrue grâce à la minimisation des déchets et à l'optimisation de l'exploitation des ressources naturelles, ainsi que d'aménagements spéciaux qui renforcent la protection physique et la résistance à la prolifération.

Certains modèles devraient également utiliser des caloporteurs de types nouveaux, comme le métal liquide ou les sels fondus, qui leur permettent de fonctionner à pression ambiante et à des températures bien plus élevées, pour une plus grande efficacité. D'autres pourraient également être

dotés d'un cycle fermé du combustible nucléaire, ce qui permettrait de réduire le volume, la toxicité et la durée de vie des déchets radioactifs.

Le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium BN-800 offre un aperçu de ce que seront les réacteurs innovants. Avec sa version antérieure, le modèle BN-600, et le réacteur rapide expérimental chinois, il s'agit de l'un des trois réacteurs à neutrons rapides actuellement en exploitation commerciale. Exploité en Russie depuis octobre 2016, il utilise un combustible à mélange d'oxydes, constitué de plutonium et d'uranium. De nombreux modèles de réacteurs innovants devraient fonctionner selon un principe physique analogue, repoussant ainsi les limites de la technologie électronucléaire. Pour en savoir plus sur les réacteurs à neutrons rapides, consultez la page 14.

« Il va peut-être falloir encore attendre quelques années avant que la prochaine génération de réacteurs nucléaires de puissance soit exploitée commercialement, mais les progrès qui sont constamment réalisés dans le cadre des projets de recherche-développement sont très encourageants » se félicite Dohee Hahn, Directeur de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « Dans notre quête d'un avenir où l'énergie sera propre, il est clair que l'électronucléaire a une contribution importante à apporter à la réalisation de cet objectif impératif. »

### La centrale nucléaire de Taishan en Chine, équipée de réacteurs EPR.

(Photo : Taishan Nuclear Power Joint Venture Co. Ltd)



## De nouveaux combustibles en vue d'une production accrue d'énergie mais d'une réduction de la quantité de déchets

Les scientifiques sont à la recherche de nouveaux moyens d'alimenter les réacteurs nucléaires. L'objectif visé est de limiter autant que possible les incidences des déchets nucléaires et de réduire les frais d'exploitation et de maintenance, tout en améliorant les performances des centrales nucléaires et en renforçant encore la sûreté nucléaire.

L'une des approches retenues repose sur le recyclage multiple de l'uranium et du plutonium présents dans le combustible nucléaire une fois irradié. Ce combustible recyclé pourrait alimenter les réacteurs nucléaires de la prochaine génération en permettant d'exploiter plus efficacement les ressources et de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets nucléaires. Grâce au recyclage multiple, les réacteurs pourraient bien ne consommer pratiquement que du combustible usé recyclé au lieu d'uranium naturel nouvellement extrait.

Destiné à des modèles de réacteurs actuels et futurs, le combustible résistant aux accidents est l'un des nouveaux types de combustible prometteurs à être actuellement mis au point. Associant des matériaux et un gainage (le tube externe qui enrobe le combustible) nouveaux et améliorés, il résiste mieux aux changements de température et aux conditions extrêmes auxquels il peut être soumis dans un réacteur. Il peut par exemple supporter une perte de refroidissement actif dans le cœur pendant beaucoup plus longtemps que les combustibles utilisés à l'heure actuelle.

Les nouveaux types de combustibles destinés aux réacteurs avancés sont conçus pour séjourner plus longtemps dans le cœur, ce qui leur permet de produire davantage d'énergie et moins de déchets. Fabriqués à partir d'un mélange d'uranium et de plutonium de densité atomique plus élevée, enrobés de différents composés céramiques et insérés dans des gainages composés de métaux et d'alliages, ils ont pour but d'améliorer les performances du réacteur. De ce fait, ils se prêtent mieux à la surgénération, c'est-à-dire à la production de nouveau combustible dans les réacteurs à neutrons rapides pendant l'exploitation. Par ailleurs, comme les types de matières qui les composent transfèrent plus efficacement la chaleur, leur température globale est moins élevée et devient plus homogène, un atout pour la sûreté.



# Réduction des déchets nucléaires et augmentation de l'efficacité pour un avenir énergétique durable

Par Jeffrey Donovan

Les réacteurs à neutrons rapides peuvent augmenter l'efficacité de l'énergie nucléaire et réduire l'empreinte environnementale des déchets radioactifs. Plusieurs pays se tournent vers ces réacteurs innovants afin de garantir un avenir énergétique durable.

Les réacteurs à neutrons rapides utilisent des neutrons qui ne sont pas ralentis par un modérateur tel que l'eau pour maintenir la réaction de fission en chaîne. Là où les réacteurs à neutrons thermiques actuels ne consomment qu'une fraction de l'uranium naturel servant de combustible, les réacteurs à neutrons rapides utilisent la quasi-totalité de l'uranium contenu dans le combustible pour extraire jusqu'à 70 fois plus d'énergie, diminuant ainsi le besoin en nouvelles ressources d'uranium.

De plus, les réacteurs à neutrons rapides fonctionnent dans ce qu'on appelle un cycle fermé du combustible nucléaire. Cette expression désigne le recyclage et la réutilisation du combustible usé, c'est à dire du combustible nucléaire après irradiation. Un tel système d'énergie pourrait potentiellement durer des milliers d'années. Dans un cycle ouvert, à l'inverse, le combustible nucléaire n'est utilisé qu'une fois et le combustible usé est déclaré comme déchet pour finalement être stocké sous terre dans des dépôts géologiques.

Les réacteurs à neutrons rapides peuvent aussi produire plus de combustible qu'ils n'en consomment (c'est la « surgénération ») et brûler une partie des déchets présents dans le combustible usé, tels que des actinides mineurs, ce que les réacteurs thermiques ne peuvent pas faire efficacement. Les brûler réduit considérablement le volume,

la toxicité et la durée de vie des déchets radioactifs à longue période.

« L'empreinte environnementale d'une source d'énergie, ainsi que celle de ses déchets, est un sujet important pour de nombreux pays qui sont à la recherche de méthodes durables de fourniture d'énergie propre », déclare Amparo González Espartero, responsable technique du cycle du combustible nucléaire à l'AIEA.

« La capacité à réduire cette empreinte tout en tirant davantage parti du combustible nucléaire est l'une des principales caractéristiques qui rendent les réacteurs à neutrons rapides de plus en plus attrayants pour de nombreux pays, et qui stimule leur développement technologique. »

## Un retour en force

Les réacteurs à neutrons rapides faisaient partie des premières technologies mises en place aux débuts de l'électronucléaire, lorsque les ressources en uranium étaient perçues comme rares. Cependant, à mesure que les problèmes techniques et ceux liés aux matières en freinaient le développement, et que de nouveaux gisements d'uranium étaient découverts, les réacteurs à eau ordinaire (REO) ont fini par devenir la norme. Cinq réacteurs à neutrons rapides sont actuellement en service : deux réacteurs opérationnels (le BN-600 et le BN-800) et un réacteur d'essai (le BOR-60) en Russie ; le surgénérateur à neutrons rapides d'essai en Inde ; et le réacteur à neutrons rapides expérimental chinois (CEFR).

De nouveaux concepts, technologies et avancées dans la recherche sur les matières, combinés à une vision à long

terme du nucléaire comme source d'énergie durable remettent actuellement les réacteurs à neutrons rapides au goût du jour. Ces avancées se caractérisent en général par des mises à niveau innovantes, telles que des dispositifs de sûreté renforcés et des modèles améliorés et plus compacts qui tiennent compte du critère économique. Les nouveaux modèles comprennent également des caloporteurs différents, comme les sels fondus, le plomb, le plomb-bismuth ou des gaz.

« Les réacteurs à neutrons rapides sont en développement depuis des décennies, d'abord en tant que surgénérateurs de combustible, puis plus récemment en tant que petits réacteurs modulaires semblables à des batteries à longue durée de vie, et même en tant que microréacteurs », explique Vladimir Kriventsev, chef d'équipe chargé du développement technologique des réacteurs à neutrons rapides à l'AIEA. « Les réacteurs à neutrons rapides peuvent faire de l'électronucléaire une source d'énergie durable pour des milliers d'années et améliorer nettement la gestion des déchets nucléaires. »

### Progression des réacteurs à neutrons rapides

Des réacteurs à neutrons rapides sont en développement dans le monde entier. L'AIEA joue un rôle central dans le soutien au développement et à l'installation de ces réacteurs, ainsi que dans le partage d'informations et de données d'expérience, notamment par l'intermédiaire de projets de recherche coordonnée, de publications techniques, de groupes de travail technique et de conférences internationales.

La Russie, qui a déjà deux réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium en service, projette d'installer après 2035 un réacteur à neutrons rapides commercial nouvelle génération de 1 200 mégawatts électriques (MWe) dans le cadre d'un système autonome comprenant également des réacteurs à eau ordinaire. À l'aide du réacteur à neutrons rapides, le combustible usé issu des réacteurs à neutrons thermiques sera retraité et réutilisé, et l'empreinte finale des déchets sera jusqu'à dix fois inférieure à celle d'un combustible nucléaire ordinaire.

L'Inde est en train de mettre en service le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe refroidi au sodium, premier d'une série de réacteurs à neutrons rapides industriels que le pays prévoit d'installer. La Chine, qui exploite un réacteur à neutrons rapides expérimental de 20 MWe, est en train de construire un grand réacteur à neutrons rapides de démonstration et projette à terme d'exploiter des réacteurs à neutrons rapides commerciaux.

En Amérique du Nord, plusieurs modèles de réacteurs à neutrons rapides utilisant différents caloporteurs, dont des sels fondus, sont en développement. Les États-Unis prévoient de construire un réacteur à neutrons rapides d'essai pour faciliter la poursuite du développement de cette technologie, ainsi qu'un microréacteur à neutrons rapides de démonstration de 1,5 MWe, qui servira aussi à faire la démonstration d'un nouveau type de combustible retraité adapté à un usage dans les réacteurs innovants de demain.

Depuis les années 1950, la viabilité technologique des réacteurs à neutrons rapides a été largement prouvée. La France a exploité le réacteur Superphénix de 1 200 MWe commercialement pendant 12 ans, jusqu'en 1998, et poursuit la recherche-développement sur cette technologie, tout comme le font la Corée du Sud et le Japon, qui projette de redémarrer un réacteur à neutrons rapides d'essai.

Néanmoins, le déploiement industriel des réacteurs à neutrons rapides dépendra largement de l'amélioration de leur rentabilité.

« Dans un monde aux ressources limitées, où on s'attend à ce que le prix de l'uranium soit bien plus élevé qu'à présent et où l'accent sera mis sur la minimisation des déchets, les réacteurs à neutrons rapides innovants et compacts pourraient devenir encore plus compétitifs que les réacteurs à neutrons thermiques traditionnels sur le plan économique », déclare Stefano Monti, chef de la Section du développement de la technologie électronucléaire à l'AIEA. « Vu le nombre de pays qui sont en train de développer activement des réacteurs à neutrons rapides, nous nous attendons à ce qu'ils contribuent sensiblement aux systèmes d'énergie propre dans les décennies à venir. »

**Le réacteur BN-800 à la centrale nucléaire de Beloyarsk en Russie.**

(Photo : Rosenergoatom)

# Petits réacteurs, grand potentiel

Par Irena Chatzis



**La centrale Aurora, modèle avancé de centrale à fission.**

(Photo : Oklo)

Le mot « électronucléaire » évoque généralement des centrales et des tours de refroidissement imposantes, mais avec l'arrivée sur le marché de petits réacteurs modulaires (PRM) et de microréacteurs (MR), l'image et le développement de l'électronucléaire sont en passe de changer.

« Comme les grands réacteurs nucléaires, les PRM et les MR permettent de produire de l'énergie à faible émission de carbone, mais ces réacteurs étant plus petits, plus modulables et plus abordables, ils peuvent être associés à des réseaux électriques de moins grande envergure et construits dans des endroits difficiles d'accès, où l'implantation d'un grand réacteur serait compliquée », explique Frederik Reitsma, Chef d'équipe chargé de la technologie des PRM à l'AIEA. « Ces réacteurs sont souvent conçus pour assurer des services non électriques parallèlement à la production d'électricité, ce qui accroît leur intérêt du point de vue de la production d'une énergie propre, mais aussi leur rentabilité. »

Les PRM sont censés produire jusqu'à 300 mégawatts électriques (MWe) et les MR jusqu'à 10 MWe, selon les modèles. Outre leur modularité, ils ont pour caractéristiques communes d'être dotés de systèmes passifs et intégrés qui renforcent la sûreté, de pouvoir générer efficacement de l'énergie en s'adaptant aux fluctuations de la demande, et de bénéficier d'une conception simplifiée, de sorte qu'ils sont plus rapides et plus simples à construire que les réacteurs actuels. En outre, comme ils peuvent en grande partie être préfabriqués en usine, leur construction sur site

prend moins de temps et il est plus facile et plus rentable de les reproduire ailleurs.

« La construction d'un grand réacteur nucléaire est une vaste entreprise, qui nécessite de gros investissements sur le long terme, ce qui est possible et approprié dans certaines situations. Dans d'autre cas, cependant, les PRM et les MR représentent une solution à la fois plus réaliste et plus rapide à mettre en œuvre. Ils sont parfois le seul moyen de produire de l'énergie d'origine nucléaire de façon économique », ajoute M. Reitsma. « Quand ces avantages sont associés à des politiques de financement et de marché efficaces, l'électronucléaire devient accessible à tout un ensemble de nouveaux utilisateurs et il gagne en compétitivité ainsi qu'en attractivité sur le marché de l'énergie. » Pour en savoir plus sur les politiques de financement et du marché de l'électronucléaire, consultez la page 24.

## Une première dans le monde des PRM

Le premier PRM avancé du monde a été couplé au réseau en 2019 et son exploitation commerciale a débuté en mai 2020.

Aux abords de la côte arctique de la Russie, la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov abrite deux PRM KLT40S de 35 MWe qui génèrent aujourd'hui suffisamment d'énergie pour alimenter une ville d'environ 100 000 habitants. Cette centrale, qui a par ailleurs une capacité calorifique de 50 gigacalories par heure, sert au dessalement de l'eau de mer et permet de produire jusqu'à 240 000 mètres cubes d'eau potable par jour.

« Grâce aux petits réacteurs nucléaires, l'Arctique pourrait parvenir à la neutralité carbone dès 2040 », explique Anton Moskvina, Vice-président chargé de la promotion et du développement commercial à Rusatom Overseas. « Akademik Lomonosov remplacera une centrale à lignite et, en plus de contribuer à l'élimination d'émissions nocives dans l'écosystème de l'Arctique, elle garantira lumière et chauffage aux habitants de cette région exposée au froid intense du grand Nord. »

Les autres PRM dont la construction est la plus aboutie sont le réacteur CAREM de 30 MWe de l'Argentine et le HTR-PM de 210 MWe de la Chine. La procédure réglementaire est également en bonne voie pour plusieurs autres réacteurs de ce type, notamment le PRM de Nuscale Power aux États-Unis et plusieurs autres au Canada. Au total, plus de 70 modèles de PRM en sont à divers stades d'élaboration dans le monde.

L'AIEA mène plusieurs activités qui visent à appuyer la recherche-développement sur les PRM au niveau mondial. Elle facilite la coopération dans les domaines de leur conception, de leur mise au point et de leur déploiement et joue un rôle central dans le partage de connaissances et de données d'expérience sur leur réglementation.

## Micro-centrales

Si les modèles de PRM sont généralement inspirés de systèmes de réacteurs bien connus, les MR semblent plutôt sortir d'un film de science-fiction. Ils sont suffisamment petits pour qu'une centrale tout entière puisse être construite en usine puis transportée par camion. Équipés de systèmes de sûreté passive auto-régulés, ils n'ont besoin que de quelques opérateurs pour fonctionner. Comme ils sont indépendants du réseau électrique, ils peuvent être déplacés et réinstallés ailleurs. Ils peuvent produire jusqu'à 10 MWe d'électricité, ce qui correspond à peu près à la consommation de plus de 5 000 foyers 24 heures sur 24, tous les jours, pendant au moins 10 ans.

Compacts et mobiles, ces réacteurs peuvent servir de systèmes d'alimentation de secours pour des établissements comme les hôpitaux ou remplacer des groupes électrogènes fonctionnant souvent au gazole qui constituent la seule source d'électricité pour des communautés isolées ou des sites industriels ou miniers.

Plus d'une douzaine de MR sont actuellement mis au point dans le monde par des entreprises du secteur privé et des groupes de recherche.

D'une capacité de 1,5 MWe, le réacteur à spectre rapide Aurora mis au point par Oklo, jeune entreprise située aux États-Unis, sera déployé prochainement, une fois achevées les procédures réglementaires. Il a été conçu pour fonctionner et s'auto-réguler principalement au moyen de phénomènes physiques naturels et comporte par conséquent très peu de pièces mobiles, ce qui en accroît la sûreté. De plus, il doit

pouvoir fonctionner pendant des décennies sans être rechargé en combustible (de l'uranium faiblement enrichi à forte teneur).

« La réaction de fission peut se prêter à de nombreuses configurations : petits ou grands modèles, faisant appel à différents types de combustibles ou de systèmes de refroidissement, et elle peut créer les conditions favorables à une très grande variété de modèles économiques et de relations avec les collectivités, y compris en ce qui concerne leur acceptabilité », explique Caroline Cochran, Directrice des opérations d'Oklo. « Les nouvelles applications de la fission et l'apparition de centrales plus petites en divers endroits peuvent favoriser le développement humain tout en préservant le plus possible les ressources. »

Parmi les autres MR parvenus à un stade avancé, un réacteur de 4 MWe mis au point par U-Battery, entreprise du groupe URENCO située au Royaume-Uni, devrait entrer en service en 2028.

## Déploiement à grande échelle

Malgré les progrès enregistrés, les PRM et les MR ne sont pas près d'être déployés à grande échelle.

« C'est l'histoire de l'œuf et de la poule, explique M. Reitsma. D'une part, on a besoin d'un marché et d'une demande assurés pour amener les investisseurs à financer la mise au point et le déploiement des PRM, mais de l'autre, ce marché ne pourra s'établir solidement que si des fonds sont investis dans leur mise au point et leur démonstration, voire dans la recherche à mener ou dans les installations expérimentales que l'on pourra être amené à construire avant l'attribution d'une licence. Les investisseurs potentiels hésitent à investir dans de nouvelles technologies s'ils ne connaissent pas bien les risques du marché. »

La difficulté d'appliquer des réglementations à un ensemble très hétéroclite de modèles de PRM et de MR constitue l'un des autres grands obstacles à leur déploiement. Étant donné la diversité des combinaisons de structures, de systèmes et de composants, les approches réglementaires standard, qui ont été définies pour des centrales nucléaires traditionnelles, doivent être réexaminées puis ajustées si l'on souhaite garantir un niveau de sûreté adéquat. Pour en savoir plus sur les procédures réglementaires concernant les PRM, consultez la page 26.

« Au stade actuel, de nombreux PRM avancés uniques en leur genre sont en cours d'examen réglementaire et, quand celui-ci sera achevé, on peut encore compter quatre à cinq ans avant qu'ils ne soient construits et mis en service », estime M. Reitsma. « Néanmoins, les PRM et les MR suscitant un intérêt croissant, on peut espérer que cette durée se réduira à mesure que les processus de déploiement gagneront en rapidité, en rentabilité et en simplicité. »

# Bien plus qu'une source d'électricité

## La production nucléaire d'hydrogène au service d'un avenir bas carbone

Par Matt Fisher

L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'univers, mais sa production sous une forme pure pour les besoins d'une vaste gamme de procédés industriels est très gourmande en énergie et a une empreinte carbone élevée.

« Les techniques de production à forte intensité de carbone, comme le reformage du méthane à la vapeur, satisfont près de 95 % de la demande actuelle en hydrogène. Compte tenu des besoins de la transition mondiale vers une énergie propre, ce n'est pas une solution durable, d'autant plus que la demande est déjà relativement élevée et continue d'augmenter », déclare Ibrahim Khamis, ingénieur nucléaire principal à l'AIEA. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la demande d'hydrogène a plus que triplé depuis 1975.

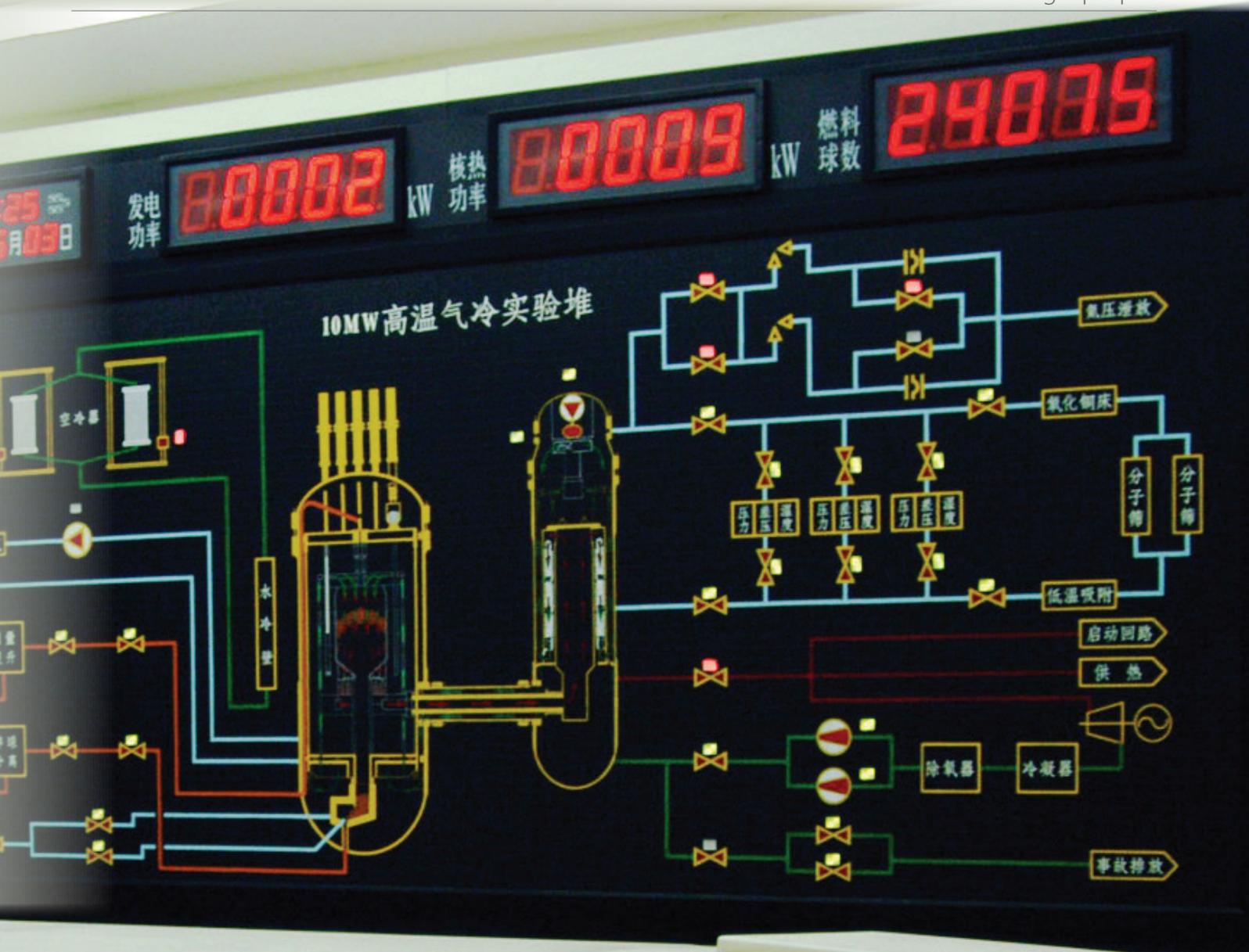
L'hydrogène est utilisé dans divers processus industriels, allant de la production de combustibles synthétiques et de produits pétrochimiques à la fabrication de semi-conducteurs, en passant par la charge des véhicules à pile à combustible. Afin de réduire l'impact environnemental de la production d'hydrogène, qui dépasse les 70 millions de tonnes par an, certains pays envisagent de se tourner vers l'électronucléaire.

« Par exemple, si seulement 4 % de l'hydrogène actuellement produit l'étaient à l'aide de l'électronucléaire, les émissions de dioxyde de carbone pourraient déjà être réduites de 60 millions de tonnes par an », explique Ibrahim Khamis. « Et si la production d'hydrogène

**La salle de commande du réacteur à haute température HTR-10 de l'Université de Tsinghua, à Beijing.**

(Photo : P. Pavlicek/AIEA)





reposait entièrement sur l'électronucléaire, ce sont alors 500 millions de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone que nous pourrions éliminer chaque année. »

En combinant des réacteurs nucléaires de puissance avec une usine de production d'hydrogène, il est possible de constituer un système de cogénération qui permette de produire efficacement de l'électricité et de l'hydrogène. Pour pouvoir produire de l'hydrogène, un tel système doit être équipé soit d'un dispositif d'électrolyse, soit de composants permettant la mise en œuvre de processus thermochimiques. L'électrolyse est une technique qui consiste à générer un courant électrique continu pour décomposer des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène. L'électrolyse de l'eau liquide s'effectue à des températures relativement basses, entre 80 et 120 °C, alors que l'électrolyse de la vapeur d'eau requiert des températures nettement plus élevées, ce qui rend cette dernière méthode bien plus efficace. Étant donné que l'électrolyse de la vapeur d'eau exige un apport thermique d'environ 700 à 950 °C, elle pourrait constituer une technique idéale pour l'intégration dans des centrales nucléaires dotées de réacteurs avancés à haute température.

Les procédés thermochimiques de production d'hydrogène consistent à dissocier les molécules d'eau en provoquant des réactions chimiques avec certains composés à des températures élevées. Les réacteurs nucléaires avancés fonctionnant à très hautes températures peuvent également être utilisés pour produire la chaleur nécessaire à la mise en œuvre de tels procédés.

« Le cycle iode-soufre est une méthode de production d'hydrogène qui offre des possibilités très intéressantes pour une exploitation à grande échelle durable et à long terme », déclare Ibrahim Khamis. « Cette méthode très prometteuse est en train d'être mise au point au moyen du modèle japonais de réacteur expérimental à haute température (HTTR) et des modèles chinois de réacteur à haute température HTR-10 et de réacteur modulaire à lit de boulets à haute température HTR-PM 600. D'autres travaux de recherche continuent également d'avancer à grands pas. »

Plusieurs pays sont en train de mettre en œuvre ou d'étudier des méthodes de production d'hydrogène à l'aide de centrales nucléaires afin de réduire leurs émissions de carbone dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie et des transports. C'est aussi un moyen de tirer davantage profit d'une centrale nucléaire, ce qui peut améliorer sa rentabilité.

L'AIEA fournit un appui aux pays intéressés par la production d'hydrogène au moyen d'initiatives comme des projets de recherche coordonnée et des réunions techniques. Elle a également mis au point le programme d'évaluation économique de l'hydrogène (HEEP), outil d'évaluation économique de la production d'hydrogène à grande échelle à l'aide de l'énergie nucléaire. Elle a en outre ouvert, au début de 2020, un cours en ligne sur la production d'hydrogène par cogénération nucléaire.

« La production d'hydrogène dans des centrales nucléaires pourrait grandement contribuer aux efforts visant à réduire les émissions de carbone, mais il faut d'abord relever un certain nombre de défis, dont la question de la viabilité économique de l'intégration de la production d'hydrogène dans une stratégie énergétique plus globale », explique Ibrahim Khamis. « La production d'hydrogène par décomposition thermochimique de l'eau exige des réacteurs innovants fonctionnant à très hautes températures, et il faudra encore attendre quelques années avant que de tels réacteurs soient mis en service. De même, la recherche-développement sur le cycle iode-soufre devra se poursuivre pendant plusieurs années encore avant que cette technique n'atteigne le niveau de maturité nécessaire à son exploitation commerciale à grande échelle. » Ibrahim Khamis ajoute que l'obtention d'autorisations pour les systèmes d'énergie nucléaire qui intègrent des applications non électriques constitue un autre défi.

### Études et essais de faisabilité

L'initiative H2@Scale, lancée au début de 2020 par le Ministère de l'énergie des États-Unis (DOE), étudie la faisabilité de projets de systèmes d'énergie nucléaire pour la production simultanée d'hydrogène et d'électricité bas carbone. Parmi les dizaines de projets financés par cette initiative, l'un sera mis en œuvre par trois compagnies d'électricité américaines, en coopération avec le Laboratoire national de l'Idaho du DOE. Il comprendra des évaluations techniques et économiques, ainsi que des démonstrations pilotes de production d'hydrogène dans plusieurs centrales nucléaires aux États-Unis.

Exelon, une des compagnies d'électricité prenant part à ce projet et premier producteur américain d'électricité bas carbone, est en train d'entreprendre l'installation d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons d'un mégawatt et de l'infrastructure connexe dans une de ses centrales nucléaires. Ce système, qui pourrait être mis en service en 2023, servira à montrer la viabilité économique de la production d'hydrogène électrolytique pour répondre aux besoins des systèmes de production d'électricité sur site et pour d'autres utilisations éventuelles à l'avenir.

« Ce projet nous aidera à définir les perspectives offertes par la production d'hydrogène d'origine nucléaire, notamment à déterminer quelles répercussions peuvent avoir les considérations financières sur la production d'hydrogène à grande échelle et à long terme », déclare Scot Greenlee, vice-président directeur des services techniques chez Exelon Generation. « Le recours à la production nucléaire d'hydrogène peut jouer un rôle important dans l'accroissement de la durabilité de l'énergie nucléaire au moment où nous planifions la voie vers un avenir bas carbone. »

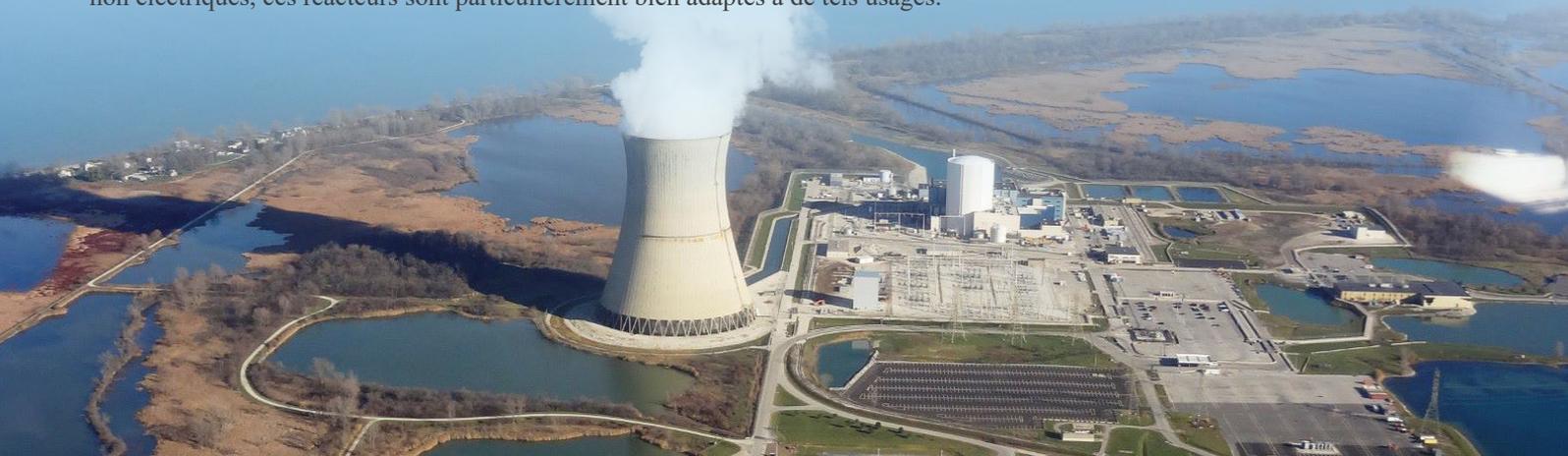
## De l'hydrogène et plus encore

L'électronucléaire peut être utilisé dans une gamme d'applications non électriques qui va au-delà de la seule production d'hydrogène, par exemple pour le chauffage des habitations et des commerces, le chauffage et le refroidissement à des fins industrielles, et le dessalement de l'eau de mer afin d'améliorer l'accès à l'eau potable.

Le recours à ces applications augmente également au fur et à mesure que sont élaborés de nouveaux systèmes d'énergie nucléaire destinés à optimiser la combinaison des utilisations électriques et non électriques ainsi que l'intégration avec les sources d'énergie renouvelables. De nouveaux modèles de réacteurs, comme les petits réacteurs modulaires, qui permettent une exploitation en régime flexible, c'est-à-dire dont la puissance électrique peut être ajustée en fonction des besoins, sont également en cours de mise au point. Parce que l'énergie habituellement utilisée pour la production d'électricité peut alors être affectée à des applications non électriques, ces réacteurs sont particulièrement bien adaptés à de tels usages.

**La centrale nucléaire de Davis-Besse, en Ohio, produira de l'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire.**

(Photo : B. Rayburn/Centrale nucléaire de Davis-Besse)



Des évaluations sont également en cours au Royaume-Uni. Le projet Energy Systems Catapult, initiative britannique à but non lucratif, vise à modéliser les systèmes énergétiques dans leur ensemble et peut maintenant intégrer les technologies nucléaires avancées de production d'hydrogène dans ses modèles. Ceux-ci donnent une idée de ce à quoi pourrait ressembler un bouquet énergétique qui permettrait, au plus faible coût possible, d'atteindre un bilan net nul d'émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050. Les résultats indiquent que les technologies nucléaires avancées pourraient, avec d'autres technologies, contribuer à la production d'hydrogène.

« Bien qu'il reste encore à déterminer la place qu'occupera l'hydrogène au Royaume-Uni, l'analyse effectuée par le Comité sur les changements climatiques et le Ministère britannique de l'économie, de l'énergie et de la stratégie industrielle suggère qu'il faudrait parvenir à produire environ 270 térawatts-heures d'hydrogène bas carbone d'ici à 2050, mais ce chiffre pourrait considérablement augmenter suivant les applications – chauffage, électricité ou transports – dans lesquelles l'hydrogène sera finalement utilisé », explique Philip Rogers, conseiller stratégique et économique principal au Conseil consultatif sur l'innovation et la recherche nucléaires du Royaume-Uni.

### Nouveaux programmes

En 2019, la Russie a lancé son premier projet de production nucléaire d'hydrogène. Ce programme, géré par la Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom », combinera l'électrolyse nucléaire et la production thermochimique à l'aide de réacteurs à haute température refroidis par gaz. L'objectif est de produire chaque année de grandes quantités d'hydrogène tout en abandonnant les techniques à forte intensité de carbone, telles que le reformage du méthane à la vapeur.

L'hydrogène produit sera destiné aussi bien à la consommation intérieure qu'aux marchés extérieurs. Une évaluation de faisabilité sur l'exportation d'une partie de l'hydrogène au Japon est menée en ce moment.

« Étant donné que la demande d'hydrogène, stimulée par l'expansion de secteurs comme l'industrie métallurgique, continue de croître, la production d'hydrogène au moyen de l'énergie nucléaire offre une possibilité de réduire considérablement les émissions de carbone et de doper la rentabilité du secteur électronucléaire », affirme Anton Moskvine, vice-président chargé de la promotion et du développement commercial à Rusatom Overseas.

# Des réseaux intelligents, stables et fiables

## Le rôle des réseaux intelligents et de l'électronucléaire dans les systèmes énergétiques bas carbone

Par Sinead Harvey

La combinaison de l'électronucléaire et des réseaux électriques intelligents – réseaux bidirectionnels qui connectent les producteurs et les consommateurs au moyen des nouvelles technologies – peut aider les pays à se tourner vers des sources d'électricité bas carbone et à garantir la fiabilité, la stabilité et la durabilité de leur approvisionnement énergétique.

De nombreux pays diversifient leur bouquet énergétique en y intégrant des sources d'énergie bas carbone pour réduire leurs émissions et atteindre leurs objectifs climatiques. Ces efforts se traduisent par une utilisation accrue des énergies renouvelables à l'échelle mondiale. Toutefois, le recours à ces sources d'énergie ne permet pas de satisfaire la totalité de la demande de manière fiable.

« Les sources d'énergie renouvelable à faible émission de carbone sont certes respectueuses du climat, mais elles sont parfois difficiles à maîtriser et ne permettent pas toujours de répondre à la demande en raison de la nature intermittente de certaines d'entre elles, comme l'éolien et le solaire, et des capacités limitées de stockage de l'énergie. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer d'autres sources d'énergie au réseau électrique », explique Henri Paillere, chef de la Section de la planification et des études économiques de l'AIEA. « Du fait de la diversification des sources d'énergie qui alimentent les réseaux électriques, il a fallu rendre ceux-ci plus flexibles et plus adaptables pour assurer un approvisionnement énergétique fiable et robuste. »

L'électronucléaire peut produire de l'énergie bas carbone tous les jours, 24 heures sur 24. Il apporte la sécurité énergétique nécessaire aux pays qui veulent mettre en place des systèmes énergétiques à faible émission de carbone. Opérant en régime flexible, les centrales nucléaires peuvent compléter la production électrique variable des énergies renouvelables, et l'inertie de leurs énormes turbines à vapeur les rend particulièrement aptes à assurer la stabilité des réseaux et un approvisionnement en électricité fiable et propre.

Jusqu'à récemment, les réseaux électriques ont dépendu des centrales à combustible fossile, tel que le charbon et le gaz naturel, qui peuvent être mises en marche et arrêtées pour répondre aux variations de la demande, notamment lorsque celle-ci dépasse l'offre.

Les réseaux électriques intelligents, quant à eux, peuvent intégrer de nombreuses sources d'énergie différentes et passer dynamiquement d'une source à une autre, ce qui n'est pas le cas des réseaux classiques, moins souples. Bien que les réseaux intelligents existent depuis un certain temps déjà, ils ont connu des avancées technologiques qui les ont rendus beaucoup plus performants. Ils peuvent recourir aux dernières technologies, telles que l'intelligence artificielle et l'« Internet des objets » – système d'ordinateurs et d'appareils connectés les uns aux autres via le réseau Internet et capables d'échanger et de traiter des données de façon dynamique – pour recueillir des informations, améliorer le rendement d'exploitation et automatiser les processus.

Par exemple, un réseau électrique intelligent peut utiliser les prévisions météorologiques générées par l'intelligence artificielle annonçant un ciel couvert et l'absence de vent pour adapter l'utilisation des sources d'énergie de façon dynamique, en remplaçant le solaire et l'éolien par d'autres sources, comme l'électronucléaire, afin d'assurer un approvisionnement ininterrompu. L'intelligence artificielle peut également prévoir le point d'impact d'un orage ainsi que sa durée et envoyer un signal au réseau pour que celui-ci augmente sa production et diversifie les sources d'énergie qui l'alimentent afin de parer aux éventuels dégâts causés aux lignes de transport.

En cas de dégâts sur les lignes électriques ou de coupure de courant, les capteurs et les appareils connectés au réseau via le système de l'Internet des objets peuvent transmettre des informations aux exploitants du réseau leur indiquant si des réparations sont nécessaires et s'il est besoin de rediriger le courant ou de faire appel à une autre source d'énergie.

Les réseaux électriques classiques ne permettaient d'évaluer les conséquences d'un orage qu'après coup. Ainsi, lorsqu'une ligne électrique était endommagée, tous ceux qu'elle alimentait se retrouvaient souvent sans électricité jusqu'à sa réparation. Comme les réseaux intelligents peuvent compter sur des solutions alternatives pour la production et la distribution de l'électricité, ils sont plus résistants et peuvent réduire les pannes de courant subies par les consommateurs.

Chez Électricité de France (EDF), un des plus grands producteurs d'électricité au monde, parmi les technologies de réseaux intelligents innovantes qui sont en cours d'élaboration figure la 5G – la nouvelle génération de réseaux Internet mobiles – qui permettra de renforcer les systèmes d'Internet des objets et de mettre au point des réseaux électriques hybrides plus efficaces. La technologie de la chaîne de blocs, qui offre un moyen extrêmement sécurisé de tracer et de gérer les opérations, est également en train d'être intégrée aux réseaux électriques, l'objectif étant de certifier la quantité d'énergie propre produite et sa provenance. EDF utilise une méthode connue sous le nom de « jumelage numérique » pour créer des environnements virtuels permettant de prévoir les besoins en maintenance des réseaux et de réduire les frais de réparation.

« Nos activités de recherche-développement sur les réseaux intelligents visent à répondre à des difficultés très diverses. Nous prenons aussi en compte les attentes de la société, qui demande une infrastructure électrique plus verte. De plus, nous nous préparons pour faire face à toutes sortes de risques, comme les effets du changement climatique et les cyber-risques, et nous nous assurons que nos réseaux sont suffisamment robustes pour résister à d'éventuelles crises », affirme Bernard Salha, directeur de la recherche-développement à EDF. « Bien entendu, chaque fois qu'une augmentation de la puissance de calcul permettra à une nouvelle méthode de voir le jour, celle-ci sera testée dans des modèles existants pour en améliorer la précision. »

Selon Dian Zahradka, spécialiste principal de la sûreté nucléaire à l'AIEA, l'évaluation des incidences de ces avancées technologiques constitue une étape importante du processus. « Les nouvelles technologies n'offrent des avantages que si elles sont sûres. Conformément aux normes de sûreté de l'AIEA, toutes modifications de la conception, notamment le recours à l'intelligence artificielle et aux technologies de l'Internet des objets, sont soumises à une évaluation rigoureuse de la sûreté qui doit permettre de déterminer les répercussions que ces changements ou modernisations pourraient avoir sur les centrales nucléaires et leurs interactions avec le réseau électrique. L'AIEA organise des réunions techniques pour examiner les conséquences potentielles de l'intégration de ces nouvelles technologies et échanger des données d'expérience sur leur utilisation dans les centrales nucléaires ».

## Inertie du réseau et électronucléaire

Dans les réseaux électriques intelligents, davantage de sources d'énergie peuvent être activement connectées au réseau et utilisées de façon dynamique. Cependant, une telle configuration peut aussi donner lieu à des fluctuations plus importantes de la fréquence électrique, induisant une plus grande instabilité.

Un réseau électrique est conçu pour fonctionner à une fréquence déterminée, celle-ci devant rester dans une certaine plage de valeurs pour qu'un approvisionnement stable en électricité puisse être garanti. Cependant, la fréquence varie constamment, à chaque fois que des appareils électriques sont mis en marche ou arrêtés. Ces fluctuations sont généralement absorbées par les parties d'un système de production d'électricité qui sont mises en mouvement par une source d'énergie, comme une turbine rotative dans une centrale nucléaire ou une centrale à combustible fossile.

Cette masse en rotation peut accélérer ou ralentir légèrement pour amortir les chocs, permettant de compenser les variations de fréquence et servant de système tampon face aux perturbations soudaines. L'expression « inertie du réseau » fait référence au mouvement de ces parties et à leur influence sur le courant en circulation dans le réseau.

Toutefois, des systèmes reposant sur des sources d'énergie renouvelable comme le solaire ne comprennent pas d'éléments mobiles. Certains qui font appel à d'autres énergies renouvelables disposent de parties rotatives, comme les éoliennes, mais celles-ci sont indirectement connectées au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence et n'ont donc pas l'inertie nécessaire.

« Sans inertie, le réseau n'a qu'une capacité limitée d'absorption des variations et il peut devenir instable », explique Shannon Bragg-Sitton, directrice technique nationale chargée des systèmes énergétiques intégrés au Laboratoire national de l'Idaho (États-Unis). « Il devient aussi particulièrement vulnérable aux fortes perturbations, telles qu'une déconnexion soudaine d'une source d'énergie, une variation importante de la charge nette ou un incident majeur survenant sur le réseau de transport ou de distribution. De tels changements peuvent provoquer de brusques surcharges ou pénuries d'électricité et donner lieu à d'éventuelles coupures de courant. L'électronucléaire peut contribuer à répondre à ces problèmes et à renforcer la stabilité du réseau. »

L'AIEA aide les pays à évaluer la fiabilité et la robustesse de leur réseau électrique, notamment en ce qui concerne le recours à l'électronucléaire, au moyen de publications, d'ateliers et de réunions techniques. Elle met également en relation l'industrie nucléaire et les acteurs du réseau électrique pour leur permettre d'échanger des informations, de présenter les meilleures pratiques et d'examiner les difficultés et possibilités d'action qu'ils ont en commun. Ces activités aident les pays à élaborer des stratégies énergétiques destinées à assurer la sécurité et la durabilité énergétiques.

# Investir dans la transition vers une énergie propre

## Financement de l'électronucléaire et aide économique

Par Shant Krikorian



Les politiques de financement et commerciales innovantes sont un moyen de rendre plus attractifs les investissements dans la construction de nouvelles centrales nucléaires et peuvent à ce titre contribuer à préparer un avenir énergétique non polluant.

Il est largement admis par de nombreux pays que l'électronucléaire, qui ne produit pas de gaz à effet de serre (GES) au stade de l'exploitation, apporte une contribution décisive à la réduction des émissions de GES et à l'atténuation du changement climatique. Producteur d'un flux d'énergie ajustable et continu, il peut également venir en complément d'autres sources d'énergie, notamment les renouvelables intermittentes, comme l'éolien ou le solaire, lorsque celles-ci sont indisponibles.

Malgré ces avantages, l'adoption de l'électronucléaire achoppe sur un obstacle majeur : son coût. Si l'énergie d'origine nucléaire produite par le parc actuel reste compétitive sur de nombreux marchés, le financement d'une nouvelle centrale suppose des dépenses initiales considérables et un investissement sur la durée.

« Le marché de l'énergie évolue et il devient plus imprévisible dans de nombreux pays qui diversifient leurs sources d'énergie pour réduire leurs émissions de

carbone, ce qui accentue les variations des prix et de l'approvisionnement, explique Wei Huang, Directeur de la Division de la planification, de l'information et de la gestion des connaissances de l'AIEA. Ce marché plus instable contribue à créer un climat d'incertitude défavorable à l'investissement à long terme dans des technologies à forte intensité de capital qui exigent des dépenses initiales considérables, comme l'électronucléaire. »

D'après Maria G. Korsnick, Présidente-directrice générale de l'Institut de l'énergie nucléaire, l'adoption de formes innovantes de politiques de financement et de marché dans le secteur nucléaire peut contribuer à limiter les facteurs d'incertitude et à compenser les fluctuations du marché. Les progrès technologiques contribuent aussi à faire de l'électronucléaire une solution plus économique (voir page 14).

« Pour que le nucléaire puisse donner le meilleur de lui-même dans un avenir énergétique sobre en carbone, il est essentiel de reconnaître à leur juste valeur l'intérêt écologique des centrales nucléaires et leurs autres avantages, qui sont diversement valorisés sur les différents marchés de l'électricité, explique M<sup>me</sup> Korsnick. Les responsables politiques devraient adopter des positions fondées sur le consensus qui se bâtit autour de l'idée qu'inclure

le nucléaire dans le bouquet énergétique est le moyen le plus économique de passer rapidement à un système de production d'électricité propre. Cette stratégie implique de donner la priorité à la préservation du parc nucléaire existant tout en préparant le terrain pour la construction d'installations énergétiques nucléaires avancées. »

D'après les estimations de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables, le montant total des subventions directes accordées au secteur de l'énergie en 2017 a été d'au moins 634 milliards de dollars É.-U., dont l'essentiel a été consacré aux technologies de production énergétique basées sur les combustibles fossiles et les renouvelables.

### Encourager les investissements dans le nucléaire

Déjà en vigueur depuis des décennies pour un ensemble de technologies, les accords d'achat d'énergie gagnent aujourd'hui du terrain dans le domaine de l'électronucléaire et sont en passe de devenir le moyen le plus utilisé de réduire les incertitudes et de garantir les recettes à long terme des nouveaux projets de centrales nucléaires. Ils sont

conclus entre les exécutants d'un tel projet et les acquéreurs de la centrale, auxquels ils permettent de s'entendre sur un prix pour la production d'une quantité définie d'électricité sur une durée déterminée, généralement longue, qui couvre souvent l'ensemble des coûts du projet ainsi qu'une marge. En général, les accords d'achat d'énergie sont aussi complétés par d'autres formes d'aides apportées par les pouvoirs publics et des prestataires, ainsi que par des mécanismes innovants de financement de l'électronucléaire, tels que les « contrats de différence » et les projets de « construction-propriété-exploitation », qui visent à réduire les risques et à attirer les investissements.

Le projet de centrale nucléaire d'Akkuyu en Turquie, par exemple, est mis en œuvre grâce à des accords d'achat d'énergie ainsi qu'à des financements et des garanties de prêts du gouvernement et d'un prestataire.

« Le coût du projet est couvert par un accord d'achat d'énergie et par un financement du prestataire "Rosatom", la Société nationale pour l'énergie atomique de la Russie, qui assurera la phase "construction-propriété-exploitation" de la centrale. L'ensemble des entités impliquées bénéficient ainsi d'une stabilité et d'assurances, car elles connaissent le prix de l'électricité et savent que les divers investissements sont en sécurité, explique Anton Dedusenko, Vice-Président du Conseil d'administration de la société chargée du projet d'Akkuyu. La sécurité conférée par cet accord d'achat d'énergie a ouvert la voie à des discussions avec des investisseurs potentiels qui pourraient participer au capital à hauteur de 49 %. Un investissement d'une telle ampleur devient généralement intéressant lorsque l'on dispose d'assurances et d'une visibilité quant aux recettes de la centrale. C'est précisément ce qu'apporte un accord d'achat d'énergie. »

## Tarifification du carbone

Dans l'optique d'un avenir énergétique non polluant, les politiques publiques de soutien à la production d'électricité sobre en carbone se sont concrétisées sous la forme de subventions directes, de tarifs de rachat, de contingents à respecter et d'exonérations de taxes sur l'énergie.

L'une des approches largement adoptées est la tarification du carbone, qui vise à réduire les émissions et à favoriser le recours à des sources d'énergie à faible teneur en carbone. Elle contribue également à améliorer la compétitivité de ces sources d'énergie et à en assurer la stabilité, face aux faibles coûts de production des combustibles fossiles.

La tarification du carbone, dans sa forme la plus simple, consiste à prélever une taxe calculée en fonction des tonnes de dioxyde de carbone rejetées, par exemple, par des centrales électriques ou des chaudières industrielles. Selon le principe de la tarification du carbone, une usine alimentée par des combustibles fossiles qui émet d'importantes

quantités de dioxyde de carbone paye davantage qu'une usine utilisant des sources d'énergie à faible teneur en carbone et n'ayant que de faibles émissions.

« Le prix du carbone est fixé en fonction du coût estimé des émissions de GES, notamment celui des atteintes à la santé des populations et à l'environnement, explique Henri Paillere, Chef de la Section de la planification et des études économiques de l'AIEA. L'objectif est de faire assumer à l'émetteur le poids des dommages causés par les émissions de dioxyde de carbone, afin d'encourager le recours à des sources d'énergie à faible teneur en carbone et de réduire à terme les émissions de GES. »

La tarification du carbone a pour autre avantage de rendre l'électronucléaire plus compétitif à l'exploitation que les combustibles fossiles, en particulier sur le long terme, du fait des économies réalisables sur les émissions. En stabilisant le prix, il est possible de réduire en partie les incertitudes liées aux investissements dans l'électronucléaire.

« Des technologies sobres en carbone telles que le nucléaire, mais aussi l'hydroélectrique et les énergies renouvelables intermittentes, ont besoin de la tarification du carbone pour rester compétitives face aux combustibles fossiles, en particulier quand le prix de ces derniers vient à chuter, explique Jan Horst Keppler, Conseiller économique principal à l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN). Sur le long terme, néanmoins, les pouvoirs publics doivent convaincre les concepteurs des projets et les investisseurs qu'ils entendent vraiment appliquer une tarification stable ou croissante du carbone. »

Grâce aux activités qu'elle mène dans le domaine de la planification énergétique, l'AIEA aide les pays qui examinent les options de financement et les stratégies possibles à faire leur choix. Elle mène des études sur les modèles de financement en vigueur, organise des réunions d'experts et publie des rapports exhaustifs sur les coûts et les avantages de l'électronucléaire, établis sur la base de projets menés à bien.

« Assurer la continuité des opérations des centrales nucléaires existantes tout en accélérant le déploiement de nouvelles installations peut se révéler être une tâche ardue dans un marché énergétique instable, explique M. Paillere. Les organismes publics doivent continuer de reconnaître la contribution essentielle de l'électronucléaire au développement durable et à la production d'énergie propre. »



# Sûreté et autorisation des petits réacteurs modulaires

## Une approche technologiquement neutre

Par Miklos Gaspar



**Salle de commande d'un simulateur de petit réacteur modulaire de NuScale Power.**

(Photo : Energy Northwest)

Si les petits réacteurs modulaires (PRM) sont plus petits, dotés de technologies innovantes et munis de nombreux dispositifs de sûreté intrinsèque, le but ultime en matière de réglementation reste le même : protéger les personnes et l'environnement et réduire le risque d'accident et de rejet de matières radioactives.

Les approches novatrices de la conception et du déploiement des PRM peuvent représenter un défi pour les cadres réglementaires existants. Les modèles de PRM sont généralement plus simples que ceux des réacteurs actuels, et leur concept de sûreté repose davantage sur des systèmes passifs et des caractéristiques de sûreté intrinsèque (comme une puissance et une pression d'utilisation faibles), qui augmentent les marges de sûreté et, dans certains cas, éliminent pratiquement le risque d'endommagement grave du cœur du réacteur, et donc de rejet important de matières nucléaires en cas d'accident. Ils ont donc moins besoin de dispositifs de confinement solides et de mesures d'intervention d'urgence.

« Les PRM sont généralement moins tributaires de systèmes de sûreté, de mesures opérationnelles et d'interventions humaines que les réacteurs actuels. L'approche réglementaire habituelle, basée sur des mesures de sûreté redondantes pour compenser les éventuelles erreurs humaines et mécaniques, n'est donc pas forcément adaptée, et de nouvelles approches devraient être envisagées », déclare le Directeur de

la Division de la sûreté des installations nucléaires de l'AIEA, Greg Rzentkowski. Il ajoute que les principaux concepts qui sous-tendent l'approche de la sûreté actuelle – comme le concept de défense en profondeur, qui permet de prévenir les accidents et d'atténuer leurs conséquences à plusieurs niveaux techniques et procéduraux – sont pertinents pour les PRM s'ils sont associés à des renseignements concernant les risques et la performance.

Pour démontrer la sûreté de la conception d'une centrale nucléaire, quel qu'en soit le type, une évaluation de la sûreté exhaustive couvrant tous les états de la centrale – fonctionnement normal, incidents de fonctionnement prévus et conditions accidentelles – doit être réalisée. À partir de là, on peut déterminer la capacité de résistance du modèle à des événements internes et externes et définir des critères de performance pour les dispositifs de sûreté, notamment la planification des interventions d'urgence.

« La démonstration du bien-fondé de la conception des PRM implique de prouver l'efficacité des fonctions de sûreté principales – commande du réacteur, refroidissement du cœur et confinement de la radioactivité – sur la base de l'optimisation des stratégies de défense en profondeur, de façon à réduire le plus possible le risque d'accident et, le cas échéant, en éliminer les conséquences », explique Greg Rzentkowski. Selon lui, compte tenu des nouveaux

modèles et des nouveaux concepts de sûreté, il importe de porter une attention particulière à la validation des argumentaires de sûreté, aux interfaces entre les tranches, aux propriétés des matériaux et aux facteurs humains. « Même si le risque d'accident est insignifiant, des solutions modulables de confinement et d'intervention d'urgence sont indispensables pour faire face à l'imprévu », ajoute-t-il.

### Cadre technologiquement neutre

Compte tenu de la diversité technologique des concepts et modèles associés aux technologies novatrices, notamment les PMR, l'AIEA a entrepris d'élaborer un cadre technologiquement neutre pour la sûreté afin de favoriser l'harmonisation des approches au niveau international sur la base de ses normes de sûreté.

Un tel cadre devrait comprendre une partie générale – hiérarchisation des objectifs sociétaux et sanitaires, objectifs relatifs aux risques et principes et prescriptions de sûreté de haut niveau – qui pourrait être développée plus en détail au niveau national afin de couvrir les aspects réglementaires et techniques propres à la technologie employée. « Cette approche offre une certaine flexibilité et permet de combiner des techniques novatrices et éprouvées de manière équilibrée, ce qui est nécessaire pour optimiser l'efficacité des mesures de protection et d'atténuation en vue d'atteindre les objectifs de sûreté généraux et les objectifs spécifiques relatifs aux risques », déclare Greg Rzentkowski.

Certains pays sont déjà actifs dans ce domaine. Le Canada, par exemple, fait partie des quelques pays, avec l'Argentine, la Chine, les États-Unis et la Russie, qui procèdent à des examens réglementaires des PMR.

« Le cadre réglementaire technologiquement neutre de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN), qui s'appuie largement sur les normes de sûreté de l'AIEA, fait place à la nouveauté et à l'innovation dans la conception, la construction, l'exploitation et le déclassement d'un réacteur, sans compromettre la sûreté », déclare le Directeur général de la CCSN, Hugh Robertson. « Lorsque les marges de sûreté de la conception sont incertaines et l'expérience d'exploitation limitée, des contrôles opérationnels supplémentaires peuvent être nécessaires, et des mesures de protection adaptées au risque sont appliquées. »

Hugh Robertson ajoute que la collaboration entre les responsables de la réglementation nucléaire et l'harmonisation des prescriptions réglementaires peuvent être bénéfiques pour toutes les parties concernées. « À la longue, cela renforce l'efficacité et l'efficacité de la procédure d'autorisation. L'examen des problèmes de sûreté communs par plusieurs personnes peut conduire à une amélioration du niveau de sûreté. Les mêmes informations d'ordre scientifique et réglementaire peuvent aussi être utilisées dans le respect de la souveraineté réglementaire pendant que nous continuons de chercher de nouvelles possibilités d'harmonisation. »

### Démonstration de la sûreté au moyen d'études de cas

Les normes de sûreté de l'AIEA, référence mondiale pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants, sont généralement neutres sur le plan technologique et peuvent s'appliquer aux PMR. Toutefois, l'AIEA compte fournir un appui supplémentaire aux responsables de la réglementation nationaux en élaborant des orientations spécifiques pour l'application de ces normes. « Des études de cas démontrant comment les prescriptions relatives à la conception des centrales nucléaires peuvent être utilisées pour l'autorisation des technologies de PRM les plus communes – les réacteurs refroidis par eau et les réacteurs à haute température refroidi par gaz – ont déjà été réalisées », indique Greg Rzentkowski.

En parallèle, le Forum des responsables de la réglementation des petits réacteurs modulaires s'efforce déjà de diffuser des connaissances et des données d'expérience en matière de réglementation et de recenser les bonnes pratiques. Créé par l'AIEA, ce groupe de travail international est chargé d'étudier les difficultés liées à la réglementation des nouveaux modèles de PRM afin d'établir de nouvelles recommandations pour la sûreté de ces réacteurs. Ces recommandations ont été publiées sur le site web de l'AIEA à l'issue d'une réunion sur l'élaboration de normes nationales propres aux PRM. Le Forum s'intéresse avant tout à la multi-modularité des PRM et à la sûreté de l'interdépendance entre les modules de sorte qu'un éventuel incident dans un module n'ait que des conséquences minimales sur les autres modules.

« La sûreté restera toujours la première priorité ; c'est pourquoi la réglementation des PRM doit être axée non plus sur les réacteurs pris individuellement, mais sur une évaluation globale de la sûreté couvrant la solidité du modèle, l'exhaustivité de l'argumentaire de sûreté et l'adéquation des processus, l'objectif étant de garantir la sûreté tout au long de la durée de vie utile du réacteur et d'éviter de construire d'abord et de régler les problèmes de sûreté ensuite », déclare Greg Rzentkowski.

# Évoluer pour l'avenir

## Les garanties et l'électronucléaire

Par Adem Mutluer

L'évolution de la technologie électronucléaire et l'augmentation du nombre d'installations nucléaires et de la quantité de matières nucléaires dans le monde imposent que la technologie des garanties évolue en parallèle pour rester efficace. Les garanties sont un ensemble de mesures techniques destinées à vérifier que les matières et technologies nucléaires sont utilisées uniquement à des fins pacifiques et ne sont pas détournées pour fabriquer des bombes nucléaires.

« L'intelligence artificielle, la fabrication additive et la technologie des registres distribués font partie des changements à venir qui pourraient avoir une incidence sur l'application des garanties au niveau international, indique Chad Haddal, responsable de la coordination des activités d'information sur les garanties à l'AIEA. La mise au point de moyens de production électronucléaire avancés impose d'adapter ces garanties pour continuer d'assurer une vérification efficace. »

L'évolution technologique aide à améliorer la durabilité, l'efficacité, la sûreté et la sécurité de l'électronucléaire, source d'énergie fiable émettant peu de carbone. De nombreux pays accordent de plus en plus d'importance à ce type de source comme moyen de décarboniser leur production énergétique et de construire un avenir basé sur une énergie propre.

Pour Menekse Basturk Tatlisu, analyste des garanties à l'AIEA, il est primordial que les garanties fassent partie des plans de développement électronucléaire. « Les accords de garanties conclus avec les États prévoient que l'AIEA peut vérifier toutes les matières nucléaires sur le territoire de ces États, explique-t-elle. Ceux-ci doivent communiquer des renseignements descriptifs pour toutes les installations

nucléaires dans lesquelles l'AIEA est autorisée à vérifier l'utilisation et la quantité des matières nucléaires. »

### Technologies nouvelles et émergentes

Les spécialistes des garanties de l'AIEA suivent de près les technologies nouvelles et émergentes pour se tenir au courant des progrès accomplis et déterminer l'influence que ces derniers pourraient avoir sur leur travail. Dans le cadre de ces efforts, le Département des garanties de l'AIEA organise des ateliers sur les nouvelles technologies, lors desquels des experts internationaux examinent et décrivent les technologies en question avec le personnel de l'AIEA.

« Que des experts décrivent les nouvelles technologies susceptibles d'influencer la production électronucléaire et le domaine nucléaire en général nous aide à mieux comprendre comment ces technologies pourraient modifier le rôle des garanties et l'environnement dans lequel nous devons jouer ce rôle à l'avenir, indique Chad Haddal. Nous nous intéressons à la fois aux avantages et aux enjeux de ces technologies. Nous devons savoir quelles sont les innovations technologiques dans notre environnement externe et nous y adapter, et c'est pourquoi nous prenons les devants et regardons vers l'avenir. »

### Application et amélioration de la technologie

Une des dernières techniques mises au point par l'AIEA est un ensemble d'algorithmes d'apprentissage connu sous le nom de « réseau neuronal ». Ce réseau informatique s'inspire assez librement de la mémoire associative humaine et est conçu pour apprendre progressivement, analyser et reconnaître des configurations en vue de faciliter la compréhension des données.



Les analystes des garanties examinent de grandes quantités de données obtenues par vidéosurveillance. En 2019, 1 425 caméras de surveillance de l'AIEA étaient placées dans des installations nucléaires partout dans le monde. Activées 24 heures sur 24, ces caméras garantissent la continuité des connaissances concernant les matières nucléaires et permettent aux inspecteurs des garanties de s'assurer qu'il n'y a aucun accès non détecté aux matières nucléaires ni aucune opération non déclarée dans l'installation. Certaines installations ayant plusieurs caméras de surveillance, la quantité de données générées peut être considérable.

L'utilisation de réseaux neuronaux mis au point grâce à l'intelligence artificielle et à l'apprentissage automatique pourrait aider les inspecteurs des garanties à détecter les mouvements de matières nucléaires et les autres activités pertinentes pour les garanties dans une installation. Ces technologies pourraient aussi permettre de déterminer les indicateurs les plus pertinents pour examiner et suivre les objets et repérer les objets et comportements inattendus. Les analystes pourraient ainsi examiner les données de surveillance en utilisant leur temps de manière plus efficace et rationnelle.

## Garanties intégrées

Alors que la technologie offre de nouvelles possibilités d'utiliser efficacement l'électronucléaire, l'expérience montre qu'il est préférable de concevoir les nouvelles installations en tenant compte des garanties dès le début.

« Intégrer les questions liées aux garanties dès les premières étapes est avantageux à la fois pour les pays, les exploitants et les garanties de l'AIEA, déclare Menekse Basturk Tatlisu. Le fait de prendre ces questions en considération dès le début de la conception de nouveaux processus et de nouvelles installations électronucléaires peut faciliter l'application des garanties pour les exploitants et pour les inspecteurs de l'AIEA. »

Par exemple, la prise en compte des garanties lors de la conception du cœur du réacteur et des systèmes d'entreposage du combustible neuf et du combustible utilisé dans une nouvelle installation nucléaire peut permettre de rationaliser l'application des garanties et de la rendre plus efficace tout en réduisant ses répercussions sur l'exploitation de l'installation.

Les documents de l'AIEA sur l'intégration des garanties dans la conception offrent des orientations et des conseils sur les aspects des garanties à prendre en considération lors de la conception d'un nouveau réacteur nucléaire, de l'amélioration et de la construction d'une installation nucléaire et de l'établissement d'une installation de gestion à long terme du combustible utilisé. Ils aident les autorités, les concepteurs, les fournisseurs de matériel et les acheteurs potentiels à faire des choix éclairés tout en tenant compte des aspects économiques et opérationnels et des considérations de sûreté et de sécurité liés à la conception d'une installation nucléaire.

« Les documents sur l'intégration des garanties dans la conception sont conçus pour aider les pays à trouver le bon équilibre entre les coûts, les obligations juridiques et l'efficacité opérationnelle, explique Menekse Basturk Tatlisu. Les garanties doivent être intégrées dans la conception pour tous les aspects du cycle du combustible nucléaire, de la planification initiale au déclassement. »

**Des inspecteurs des garanties installent une caméra de surveillance.**

(Photo : D. Calma/AIEA)



# Intensifier la décarbonisation grâce à l'énergie nucléaire

Par Kirsty Gogan et Eric Ingersoll



Kirsty Gogan est la co-fondatrice et directrice d'Energy for Humanity, ONG environnementale ciblant la décarbonisation intensive à grande échelle et l'accès à l'énergie.



Eric Ingersoll, directeur de la technologie chez Energy for Humanity, est aussi conseiller stratégique et entrepreneur spécialisé dans la commercialisation des nouvelles technologies de l'énergie.

Le monde est très loin de remplir les objectifs climatiques de l'Accord de Paris, qui consistent à faire en sorte que la température à la surface du globe n'augmente pas plus de 1,5 °C à 2 °C d'ici 2050. Selon les projections actuelles, les combustibles fossiles constitueront toujours la majorité de l'énergie utilisée à travers le monde d'ici à 2050.

Si l'augmentation de la température dépassait 1,5 °C, il faudrait peut-être se résoudre à des retombées climatiques comme le déplacement de millions de personnes en raison de l'augmentation du niveau de la mer et l'exposition de millions d'autres à des vagues de chaleur extrême, ainsi qu'à des répercussions majeures sur la biodiversité : disparition d'espèces, fonte de la banquise arctique et perte de la quasi-totalité des récifs coralliens.

Si cette augmentation dépassait 2 °C, il est possible que la moitié de la population mondiale soit exposée à une « chaleur mortelle » en été, que les nappes glaciaires de l'Antarctique s'effondrent, que les sécheresses s'aggravent considérablement et que le désert du Sahara s'étende à l'Europe du sud. Les disponibilités alimentaires mondiales pourraient être menacées, provoquant des migrations humaines massives et induisant un risque croissant d'effondrement de civilisations.

Les filières énergétiques actuelles, même celles qui incluent un développement à grande échelle des énergies renouvelables, poussent le monde vers des effets climatiques catastrophiques, la température risquant fortement d'augmenter de 4 °C. De larges zones de la planète pourraient alors devenir inhabitables.

La « Flexible Nuclear Campaign » de l'initiative ministérielle sur l'énergie propre que nous avons fondée ensemble explore le rôle élargi que l'énergie nucléaire peut jouer pour réduire les risques liés à la transition énergétique. Dans le présent article, nous allons exposer deux manières

possibles d'intensifier la décarbonisation grâce à l'énergie nucléaire.

La première consiste à étendre la contribution de l'énergie nucléaire à la production d'électricité grâce à une combinaison de réacteurs avancés et de capacités de stockage de l'énergie thermique, l'idée étant de venir compléter les énergies renouvelables dans les futurs réseaux électriques.

La seconde consiste à contrer l'utilisation du pétrole et du gaz, qui constituent actuellement les trois quarts de la consommation d'énergie, en fournissant à grande échelle et à bas prix de l'hydrogène produit au moyen de l'électronucléaire.

Pour que le déploiement de l'énergie nucléaire atteigne l'ampleur et les niveaux requis et pour pouvoir en assumer les coûts, il faut changer d'orientation. L'industrie nucléaire doit s'y consacrer et faire preuve de créativité ainsi que d'esprit d'innovation dans les domaines technique et économique, comme le secteur des énergies renouvelables a su le faire.

Comment un modèle de production industrielle doté des caractéristiques suivantes : volume important, faibles coûts, déploiement rapide et attractivité commerciale, pourrait-il permettre aux technologies nucléaires de contribuer aux objectifs de la neutralité carbone et d'une énergie durable pour tous d'ici à 2050 ?

## La flexibilité, un atout du nucléaire dans les futurs réseaux électriques

Notre étude récente sur les exigences en matière de performance et de coûts auxquelles doivent se tenir les centrales nucléaires de pointe, menée dans le cadre du « ARPA-E's MEITNER Program » des États-Unis, définit les normes du marché applicables aux fabricants de réacteurs avancés qui s'emploient

à concevoir des produits utiles à des prix compétitifs afin de les commercialiser au début des années 2030.

Elle définit les caractéristiques en termes de prix et de performance exigées des propriétaires de centrales nucléaires et des investisseurs, ainsi que de la société en général, afin de pouvoir disposer à un prix abordable de futurs systèmes électriques fiables, résistants, flexibles et, par-dessus tout, propres. Selon nos observations, la demande de réacteurs avancés dont les coûts s'établiraient à moins de 3 000 \$ É.-U./kW sera forte. Combiner centrales nucléaires et stockage de l'énergie thermique permet au nucléaire d'être une ressource de premier ordre, du fait de la création de précieuses capacités de stockage d'énergie supplémentaires, et d'apporter une valeur ajoutée à un tel système énergétique. Pour les exploitants du réseau, les spécialistes de la modélisation des systèmes énergétiques et les décideurs, ce schéma montre l'intérêt des technologies nucléaires flexibles, non seulement pour la réduction des émissions mais aussi pour la diminution de l'ensemble des coûts dans tout le système énergétique.

## Combustibles synthétiques à base d'hydrogène

Pour parvenir à réduire les émissions au rythme et à l'échelle requis, tout en développant l'accès à l'énergie et en stimulant la croissance économique à travers le monde, il faut que les substituts de combustibles carboneutres et à émissions nulles soient aussi performants que les combustibles fossiles à un prix aussi compétitif.

La production nucléaire d'hydrogène sans émissions peut rivaliser en prix avec d'autres méthodes de production sans dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ainsi qu'avec le réformage à la vapeur de gaz naturel à bas prix (Allen et al. 1986 ; BloombergNEF 2020 ; Boardman et al. 2019 ; Gogan and Ingersoll 2018 ; Hydrogen Council 2020 ; IEA 2019b ; NREL 2019b ; M. Ruth et al. 2017 ; Yan 2017). Même les centrales nucléaires classiques coûteuses des débuts, présentes dans l'Union européenne et aux États-Unis, peuvent produire de l'hydrogène propre à des coûts comparables à ceux des ressources éoliennes et solaires actuelles, avec de bons facteurs de capacité.

De l'hydrogène produit à grande échelle et à faible coût permettrait de décarboner les secteurs de l'aviation, du fret, de la fabrication du ciment et de l'industrie, à condition qu'il puisse rivaliser avec le pétrole bon marché. Pour ce faire, le prix à atteindre est estimé à environ 0,90 \$ É.-U./kg.

Selon les projections actuelles, le prix de l'hydrogène généré par des énergies renouvelables tomberait à 2 \$ É. U. d'ici à 2030, voire à un niveau encore inférieur d'ici à 2050. La baisse des prix est entravée par des facteurs de capacité faibles même si les coûts d'investissement dans les énergies renouvelables devraient continuer de diminuer.

Les centrales nucléaires actuelles pourraient fournir de l'hydrogène propre pour moins de 2 \$ É.-U./kg, prix qui

pourrait tomber à 0,90 \$ É.-U./kg, éventuellement d'ici à 2030, grâce à une nouvelle génération de réacteurs modulaires avancés.

Si elle veut être le moteur d'une forte augmentation de la production d'hydrogène propre, l'industrie nucléaire va devoir modifier ses modèles d'exécution de projets et de croissance pour passer à une plus grande échelle et fournir de la chaleur, des combustibles et de l'électricité propres. Pour ce faire, il faudra continuer de se concentrer au maximum sur la réduction des coûts, l'amélioration des performances et les rythmes de déploiement, ces facteurs ayant permis aux énergies renouvelables d'engager la conversion du système énergétique mondial.

Il est possible de diminuer radicalement les coûts à court terme en se détournant des projets de construction classiques pour favoriser des environnements de fabrication à haut rendement de réacteurs avancés, comme les chantiers navals ou les « giga-usines » à hydrogène, raffineries de nouvelle génération situées sur des friches industrielles, comme les grandes raffineries côtières de gaz et de pétrole.

Ce changement va diminuer considérablement le coût de l'hydrogène propre et de la production de combustible synthétique. Les chantiers navals de pointe, qui ont déjà de gros moyens de fabrication, peuvent les mettre au service de la construction sur mesure d'installations de production d'hydrogène.

Les giga-usines et les centrales nucléaires offshore fabriquées sur des chantiers navals pourraient remettre le monde sur la voie des objectifs de réchauffement de 1,5/2 °C inscrits dans l'Accord de Paris. Cette action vigoureuse en faveur de la décarbonisation peut être menée à une échelle spatiale restreinte, ce qui permettrait de réserver de vastes portions de territoire au ré-ensauvagement et à la régénération des écosystèmes naturels, à l'opposé de l'« étalement » associé aux développements industriels des énergies renouvelables à l'échelle d'un pays.

En appliquant ces modèles, le passage en trente ans d'une consommation actuelle de 100 millions de barils de pétrole par jour à l'équivalent en combustibles de substitution propres peut être réalisé à un coût bien inférieur : 17 milliards de dollars É.-U. au lieu des 25 milliards de dollars É.-U. requis pour maintenir les flux de pétrole jusqu'en 2050. Le contraste est encore plus marqué avec les 70 milliards de dollars É.-U. que coûte une stratégie fondée sur les seules énergies renouvelables.

Grâce à ces modèles modifiés, l'énergie nucléaire peut décarboner l'économie à un coût inférieur à celui requis pour une utilisation continue des combustibles fossiles. Cependant, cette transition ne s'amorcera que si les pouvoirs publics et d'autres acteurs prennent des mesures d'urgence pour réduire les coûts, accélérer l'innovation et intensifier les opérations de déploiement. L'énergie nucléaire doit faire partie intégrante des initiatives de décarbonisation mondiales.

## Rationalisation de l'entreposage : l'AIEA organise des formations sur la gestion des déchets radioactifs en Afrique



**Exercice pratique : les participants au cours observent un expert de l'AIEA récupérer une source retirée du service, qui avait auparavant servi dans un contexte industriel.**

(Photo : O. Yusuf/AIEA)

La transformation, le conditionnement et l'entreposage appropriés des sources radioactives scellées retirées du service sont essentiels pour garantir la sûreté et la sécurité des personnes et de l'environnement. Ces activités peuvent cependant poser problème, en particulier pour les pays qui ne disposent pas encore d'un savoir-faire national en la matière. Aussi, l'AIEA a-t-elle apporté son concours à l'élaboration d'une approche plus simple et plus rentable de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service, à l'intention des pays dans lesquels ces sources sont relativement peu nombreuses. Cette nouvelle approche a été présentée pour la première fois lors d'un cours organisé par l'AIEA à Kampala (Ouganda) en 2020.

L'idée est de se doter d'une installation comprenant tous les éléments nécessaires à la transformation, au conditionnement et à l'entreposage de sources de neutrons et de rayonnement gamma de faible activité, du type de celles que l'on trouve communément dans l'industrie et en médecine. Appelée « concept à double conteneur ISO », l'installation se compose de deux conteneurs d'expédition standard, situés à proximité l'un de l'autre et équipés de manière à offrir une bonne ventilation, autoriser un contrôle de

la contamination, et garantir une sûreté et une sécurité appropriés. L'un des conteneurs sert de structure de transformation et de conditionnement, l'autre étant affecté à la réception et à l'entreposage provisoire des sources radioactives scellées de faible activité retirées du service, puis des sources conditionnées.

L'installation et les procédures y associées ont fait l'objet d'un examen international par des pairs. Un groupe d'experts internationaux en matière de gestion des déchets radioactifs, venus d'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, du Ghana et du Maroc, a été chargé d'observer le mode de fonctionnement de l'installation à double conteneur ISO, et d'assister au cours proprement dit. Le groupe a également examiné l'installation et les procédures techniques suivies pour la gestion des déchets, depuis leur réception jusqu'à leur entreposage définitif, afin d'évaluer l'approche au regard de l'ensemble des normes et meilleures pratiques internationales pertinentes. Ces activités, qui bénéficient d'un soutien financier de l'Union européenne, font partie d'une initiative plus vaste menée par l'AIEA dans le cadre de l'Accord régional de coopération pour l'Afrique sur la recherche, le développement et la formation

dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires (AFRA), qui vise à aider les pays africains à renforcer leur infrastructure juridique et réglementaire en matière de sûreté et de sécurité nucléaires. Dans chaque pays, l'utilisation de l'installation, avec ses sources radioactives, sera soumise à l'autorisation de l'organisme de réglementation national. En Ouganda, l'autorisation avait été délivrée avant la tenue du cours. « L'approche qui a été suivie en l'espèce est conforme aux normes de sûreté de l'AIEA », indique Deogratias Sekyanzi, Directeur général du Conseil de l'énergie atomique de l'Ouganda, l'organisme national de réglementation.

Certains pays, comme le Cameroun, ont des projets déjà bien avancés concernant l'utilisation de conteneurs d'expédition pour l'entreposage de sources radioactives scellées retirées du service, alors que, dans d'autres pays, la sûreté de cette méthode n'a pas encore été démontrée. David Bennett, spécialiste de la sûreté des déchets à l'AIEA, explique que, dans le cadre d'un nouveau projet de coopération technique lancé en 2020, l'AIEA s'efforce de donner aux organismes nationaux de meilleurs moyens de faire la démonstration de la sûreté de l'entreposage.

### L'approche « capsule et conteneur »

Une fois l'installation construite, l'étape suivante consiste à retirer les sources radioactives de leurs dispositifs conformément aux prescriptions et recommandations figurant dans le Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives et dans les normes de sûreté de l'AIEA. Les procédures techniques que le personnel local est tenu de respecter afin de récupérer les sources retirées du service et de les conditionner sous une forme adaptée à l'entreposage sont au cœur de l'approche proposée. Elles prévoient de sceller les sources retirées du service dans une capsule spéciale en acier inoxydable conçue de manière à pouvoir être correctement scellée sans matériel spécialisé, ce qui permet d'effectuer la manipulation en question sans difficulté, dans n'importe quel pays. Une fois scellée, la capsule contenant les sources radioactives est placée dans un récipient en plomb, lui-même inséré dans un fût avec un blindage en béton, qui sert d'emballage à des fins d'entreposage ou de transport des

sources radioactives scellées retirées du service.

« Une nouvelle installation du type de celle présentée en Ouganda peut être construite sur un terrain de moins de 1 000 mètres carrés et à un coût abordable », souligne Mohamed Al-Mughrabi, expert de haut niveau à l'AIEA.

### Former les responsables de la gestion des déchets radioactifs en Afrique

Dans le cadre des efforts qu'elle ne cesse de déployer pour faciliter

le contrôle des sources radioactives scellées retirées du service dans le monde entier, l'AIEA organise une série de cours pratiques qui portent notamment sur la construction, l'homologation et l'utilisation d'installations à double conteneur ISO. Dispensés dans le cadre de son programme de coopération technique, ces cours pourraient être organisés dans toute l'Afrique, en particulier là où il n'existe pas encore d'installations de transformation, de conditionnement et d'entreposage des déchets.

À la suite de la présentation concrète de l'approche à double conteneur ISO effectuée en Ouganda, au Cameroun,

au Sénégal et au Zimbabwe, et dans le sillage des conclusions auxquelles a abouti un examen technique international par des pairs, des projets visant à appliquer ce concept dans d'autres pays, notamment au Cameroun, en Éthiopie, à Madagascar et au Nigeria, ont été élaborés.

Le projet RAF9062, intitulé « Renforcement de la gestion des déchets radioactifs (AFRA) » est mené par l'AIEA et cofinancé par la Commission européenne, l'Espagne et les États-Unis d'Amérique.

— Par Omar Yusuf

## Des légumes plus savoureux et plus nutritifs : la Bulgarie améliore la qualité des aliments avec l'appui de l'AIEA



**Nasya Tomlekova, professeure au MCVRI, et Iliya Valchanov, producteur de nouvelles variétés de mutants.**

(Photo: MCVRI)

La Bulgarie, un des pays d'Europe abritant la biodiversité la plus riche, est depuis longtemps un important exportateur de diverses denrées alimentaires. En raison du réchauffement progressif de la planète au cours des dernières décennies, les agriculteurs ont vu chuter les rendements et la qualité des principales cultures. Pour s'adapter aux changements environnementaux et continuer d'assurer une production maraîchère durable et saine, ils font maintenant appel à des techniques nucléaires.

« La Bulgarie est réputée pour l'excellente qualité de ses cultures, qui repose sur une longue tradition de production maraîchère à l'échelle de tout le pays »,

déclare Nasya Tomlekova, responsable du Laboratoire de biologie moléculaire de l'Institut de recherche sur les cultures maraîchères de Maritsa (MVCRI), situé à Plovdiv, la deuxième plus grande ville du pays. « Nous faisons maintenant face à des problèmes plus complexes qui concernent la baisse de la production et la qualité des variétés locales. Nous devons trouver des solutions dans ce domaine et promouvoir ces produits, ce qui est possible grâce aux techniques nucléaires. »

Les programmes en cours de sélection végétale, que soutient l'AIEA en partenariat avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), visent essentiellement à mettre au

point de nouvelles variétés de poivrons, de tomates et de pommes de terre.

Dès 2020, trois variétés de poivrons seront mises à la disposition des agriculteurs au cours des trois prochaines années. L'une d'entre elles, Zlatna shipka, introduite en 2020, a un rendement de sept pour cent supérieur à celui des variétés traditionnelles. En 2021, une variété de poivrons Desislava, qui présente de meilleurs rendements et une teneur en bêta-carotène plus élevée, similaire à celle des carottes, sera mise en circulation. C'est un facteur important, car un apport élevé en bêta-carotène, que notre organisme transforme en vitamine A, est essentiel à la bonne santé de notre peau et de nos yeux et au renforcement de

notre système immunitaire. Une variété de poivrons Toniko, qui devrait être diffusée en 2022, aura également une teneur en bêta-carotène accrue.

« Comme tous les agriculteurs, je me suis beaucoup investi et ai travaillé dur pour produire des cultures de haute qualité et bonnes pour la santé », affirme Yancho Valchev, un des agriculteurs participant aux essais pilotes du programme de sélection végétale. « Nous faisons face à de nombreuses difficultés, comme le changement climatique, les maladies des légumes, les insectes et les ravageurs, mais grâce à ces programmes, nous avons pu améliorer les rendements et la qualité de nos cultures. »

« Plus jeune, avant mes 30 ans, j'étais intéressé par une alimentation et un mode de vie sains, et aujourd'hui, en tant qu'agriculteur, je peux concrétiser ces objectifs à l'aide de ces nouvelles variétés », déclare Iliya Valchanov, autre agriculteur participant au programme. « En ce moment, ce sont ces produits qui se vendent le mieux sur les marchés locaux, particulièrement chez les jeunes, pour qui une alimentation saine est également importante. »

Mais il ne s'agit là que des derniers travaux menés en Bulgarie par l'AIEA et la FAO à l'appui de l'agriculture. Au cours des 50 dernières années, les spécialistes bulgares ont mis au point 76 variétés de cultures après avoir participé à des cours

et à des travaux de recherche de l'AIEA sur l'utilisation de techniques nucléaires au service d'une production alimentaire durable et de la sécurité alimentaire (voir la rubrique « En savoir plus »).

« L'AIEA, la FAO et le MVCRI poursuivront leur collaboration fructueuse pour mettre au point des variétés améliorées de poivrons, de tomates et de pommes de terre à haut rendement, présentant des valeurs nutritionnelles supérieures et capables de s'adapter au changement climatique, ce qui permettra de renforcer la sécurité alimentaire du pays dans son ensemble », explique Fatma Sarsu, spécialiste de la sélection des plantes et phytogénéticienne à la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture.

## EN SAVOIR PLUS

### Qu'est-ce que la sélection par mutation ?

La sélection par mutation est une technique d'amélioration des cultures qui repose sur l'utilisation de techniques nucléaires faisant appel par exemple aux rayons X ou gamma pour induire des modifications dans les végétaux. Les semences ou les cellules d'une plante sont d'abord exposées aux rayonnements, puis les scientifiques récupèrent les nouvelles semences ou plantules mutantes pour les cultiver en milieu stérile. Au fur et à mesure qu'elles se

développent, les plantes font l'objet d'un suivi et sont sélectionnées en fonction de certaines caractéristiques, telles que leur croissance, leur couleur, leur valeur nutritionnelle et leur tolérance à la chaleur. Le suivi des plantes sélectionnées se poursuit sur plusieurs générations pour finalement aboutir à de nouvelles lignées et variétés de plantes.

Les techniques nucléaires permettent d'accélérer le processus naturel d'évolution, donnant naissance à des variétés de cultures présentant des caractéristiques améliorées.

Il existe maintenant 18 installations d'irradiation gamma en Bulgarie, grâce auxquelles celle-ci peut poursuivre son action en vue d'assurer une production alimentaire durable destinée à la consommation intérieure et de maintenir des exportations solides. Les lignées et les variétés mutantes mises au point dans les installations d'irradiation bulgares qui présentent les caractéristiques voulues sont conservées dans la banque de gènes nationale, qui contient 60 000 échantillons de semences, ou dans des établissements de recherche dans tout le pays pour une utilisation ultérieure. Dans le cadre du programme de coopération technique et des projets de recherche coordonnée menés par l'AIEA en Bulgarie au cours des 50 dernières années, 76 variétés de cultures ont été diffusées. Elles sont enregistrées dans la base de données FAO/AIEA sur les variétés de mutants.

— By Carley Willis

## Avec l'appui de l'AIEA, la Chine inaugure la plus grande installation au monde de traitement des eaux usées par la technologie des faisceaux d'électrons

Capable de traiter 30 millions de litres d'eau résiduaire industrielle par jour, la plus grande installation au monde de traitement des eaux usées par la technologie des faisceaux d'électrons a été inaugurée en Chine en juin 2020. Basé sur une technologie transférée par l'AIEA depuis 2010, ce procédé de traitement permettra d'économiser 4,5 milliards de litres d'eau potable par an, ce qui correspond aux besoins annuels de 100 000 personnes.

Dans cette installation implantée en Chine méridionale, dans les locaux de la Guanhua Knitting Factory, le plus grand importateur de fil peigné au monde, la technologie de faisceaux d'électrons sert à traiter les eaux polluées par des résidus de teinture industrielle dont

les molécules ne peuvent pas être décomposées au moyen de bactéries ou de produits chimiques. Elle rend possible la décomposition des grosses molécules complexes que contient cette eau, ce qui permet de la réutiliser une fois traitée.

En Chine, plus grand producteur de textile au monde, l'industrie textile utilisait jusqu'ici des produits chimiques pour traiter ses eaux usées. Sous l'effet du renforcement des politiques en matière de protection de l'environnement, elle fait aujourd'hui appel à la technologie de faisceaux d'électrons, qui lui permet d'appliquer une méthode de traitement des eaux usées très efficace et respectueuse de l'environnement.

« Habituellement, on traitait ces eaux usées à l'aide de procédés chimiques qui produisaient des déchets secondaires », explique Bum Soo Han, radiochimiste à l'AIEA. « Le traitement par faisceaux d'électrons est une méthode à la fois écologique et économique, car il est plus rapide et permet d'économiser le coût des produits chimiques, sans compter qu'il n'engendre pas de déchets secondaires. »

Tout a commencé en 2012 avec un projet de coopération technique de l'AIEA dans le cadre duquel des scientifiques chinois ont mis au point un programme de traitement des eaux usées au moyen de faisceaux d'électrons. L'appui de l'AIEA a permis à des boursiers d'étudier des installations en service à l'étranger, ainsi que d'organiser un cours national



## Sept accélérateurs d'électrons traitent les eaux résiduelles des procédés d'impression et de teinture à l'usine Guanhua Knitting Factory.

(Photo: Institut de technologie de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles, Université de Tsinghua)

et des visites d'experts qui ont eu un rôle consultatif lors de l'élaboration du projet.

« J'ai pu aller étudier en Hongrie en 2013 grâce au programme de bourse de l'AIEA » raconte Shijun He, aujourd'hui Professeur à l'Institut de technologie de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles (INET) de l'Université de Tsinghua. « La possibilité de travailler dans un laboratoire international et de participer à des cours a eu des répercussions directes sur les travaux que nous menons aujourd'hui. »

En 2017, une installation expérimentale, à même de traiter 1,5 million de litres d'eaux rejetées quotidiennement par une usine textile locale, a été construite à Jinhua, ville située à 300 kilomètres au sud-est de Shanghai. Deux ans après le lancement de ce projet de démonstration, la construction de l'installation commerciale de traitement des eaux usées a débuté à l'usine Guanhua Knitting Factory. Construite par la Société de développement de la technologie nucléaire (SDTN), filiale de la Corporation générale chinoise de l'électronucléaire, la nouvelle installation traite plus de 30 millions de litres d'eau usée par jour grâce à ses sept accélérateurs d'électrons. « Plus de 70 % des eaux traitées au moyen de ce procédé sont

réutilisables par l'usine, contre 50 % auparavant. Nous n'avons plus à extraire autant d'eau qu'avant directement de la rivière pour les besoins de l'usine, ce qui permet d'économiser 4,5 milliards de litres d'eau chaque année », explique Dongming Hu, directeur général de CGNNT.

La réussite de ce projet a été largement partagée avec d'autres industries du pays, l'objectif étant de mettre à profit cette technologie pour traiter les quantités croissantes d'eaux usées qui sont produites du fait de la croissance démographique et du développement industriel et agricole. « D'importantes quantités d'eaux usées sont rejetées en Chine et il est difficile de les traiter au moyen des technologies classiques. Mais grâce aux faisceaux d'électrons, nous pouvons largement améliorer le taux de recyclage de ces eaux », ajoute M. He. D'autres projets de démonstration sont en cours dans les provinces du Xinjiang, du Hubei et du Guangxi. « Nous nous employons à mettre en pratique la technologie de faisceaux d'électrons dans divers secteurs industriels en Chine », se félicite M. He.

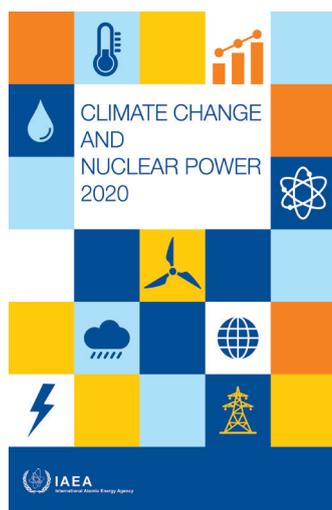
### Principe de fonctionnement

L'industrie textile consomme des quantités considérables d'eau et de

produits chimiques tels que teintures, amidons, acides, sels et détergents, lesquels sont rejetés pendant le processus de production. « La technologie d'irradiation par faisceaux d'électrons permet de décomposer les importants volumes de contaminants présents dans les eaux usées et d'éliminer ces polluants complexes », explique M. Han. Selon ce procédé, un accélérateur d'électrons émet un faisceau d'électrons qui ionise les molécules d'eau, ce qui génère des radicaux actifs. Ceux-ci entrent en réaction avec les contaminants organiques toxiques présents dans les eaux usées, qui se dégradent alors et prennent une forme chimique plus simple et plus facile à traiter à l'aide de méthodes classiques.

« Ce projet illustre parfaitement comment un appui minime fourni par l'AIEA en guise d'amorce dans le cadre de son programme de coopération technique et de ses projets de recherche coordonnée peut contribuer à favoriser l'émergence d'une industrie durable dans un pays » se félicite Gashaw Wolde, qui gère les projets de coopération technique de l'AIEA en Chine. « On assiste au développement de procédés industriels plus propres et efficaces, qui ont clairement des effets socio-économiques à l'échelle du pays. »

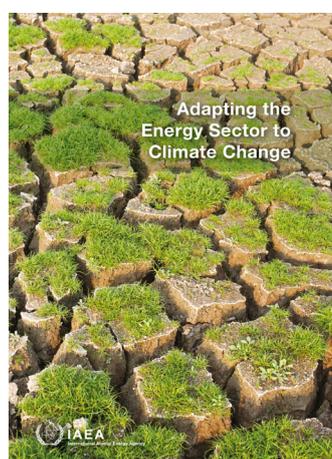
— Par Carley Willis



## Changements climatiques et énergie nucléaire 2020

La publication intitulée *Climate Change and Nuclear Power 2020* présente des informations actualisées sur la situation actuelle de l'électronucléaire et le rôle que cette source d'énergie peut jouer, avec d'autres sources à faible émission de carbone, dans les stratégies ambitieuses d'atténuation des changements climatiques à l'échelle mondiale destinées à limiter l'élévation de la température à 1,5 °C, conformément à l'Accord de Paris de 2016. Depuis 2000, l'AIEA publie régulièrement de tels documents d'information et des analyses pour aider les États Membres qui décident d'intégrer l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique, ainsi que ceux qui envisagent d'autres stratégies. La publication de 2020 porte principalement sur la contribution importante que peut apporter l'énergie nucléaire, lorsqu'elle est intégrée dans un système énergétique bas carbone, à la réalisation de l'objectif visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, ainsi que sur les défis à relever pour parvenir à exploiter le potentiel de cette énergie. Elle passe en revue les facteurs ayant trait aux systèmes énergétiques et au marché de l'énergie qui ont une incidence sur la transition vers un système énergétique bas carbone. Elle présente également les progrès à accomplir pour accroître à grande échelle les capacités qui permettront de réduire rapidement les émissions de carbone du système énergétique mondial en vue de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C.

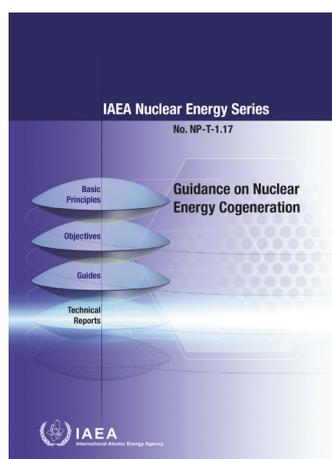
Publication hors collections ; ISBN : 978-92-0-115020-2 ; 28 euros ; 2020 (en anglais)



## Adapter le secteur de l'énergie au changement climatique

La publication intitulée *Adapting the Energy Sector to Climate Change* présente les diverses incidences du changement climatique graduel et des phénomènes météorologiques extrêmes sur le secteur de l'énergie, ainsi que les solutions possibles pour y faire face. Tous les maillons de la chaîne d'approvisionnement y sont examinés : ressources disponibles, extraction et transport des sources d'énergie non renouvelable, production d'électricité, transport et distribution de l'électricité. Cette publication comprend également trois études de cas portant sur l'évaluation de la vulnérabilité du secteur de l'énergie en Argentine, au Pakistan et en Slovaquie.

Publication hors collections ; ISBN : 978-92-0-100919-7 ; 40,00 euros ; 2019 (en anglais)



## Orientations sur la cogénération nucléaire

La publication intitulée *Guidance on Nuclear Energy Cogeneration* présente un aperçu des avantages offerts par la cogénération nucléaire, de l'expérience acquise dans ce domaine et des futurs projets de mise en œuvre de cette technologie. Elle met également en exergue des projets de démonstration élaborés par le passé en lien avec des secteurs industriels et expose des concepts techniques de complexes combinant applications nucléaires et industrielles. Elle s'adresse à des utilisateurs des milieux universitaire et industriel ainsi qu'à des organismes et établissements publics requérant des informations de base sur divers aspects de l'utilisation de l'électronucléaire aux fins de la cogénération.

IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.17 ; ISBN : 978-92-0-104119-7 ; 32,00 euros ; 2019 (en anglais)

Pour obtenir de plus amples informations ou commander une publication, veuillez écrire à l'adresse suivante :

Unité de la promotion et de la vente  
 Agence internationale de l'énergie atomique  
 Centre international de Vienne  
 B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)  
 Mél. : sales.publications@iaea.org



# FÖRUM SCIENTIFIQUE

L'énergie nucléaire au service du climat



# 2020

#Atoms4Climate

Lisez cette publication et d'autres numéros du Bulletin de l'AIEA en ligne sur  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Pour de plus amples informations sur l'AIEA et les travaux qu'elle mène, rendez-vous sur le site  
[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

ou suivez-nous sur

