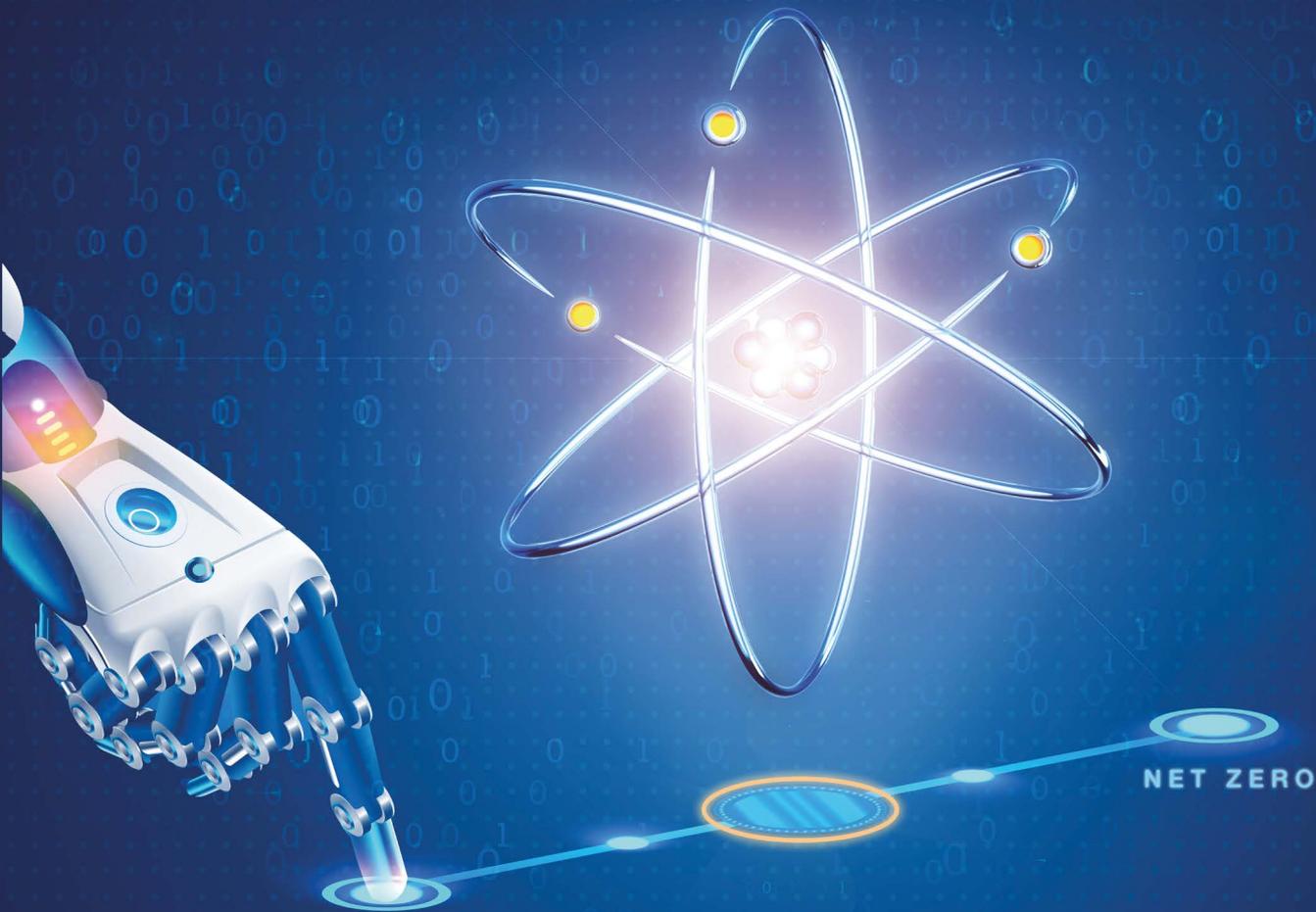


IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Septembre 2023 | www.iaea.org/fr/bulletin



LES INNOVATIONS NUCLÉAIRES AU SERVICE DU « ZÉRO ÉMISSION NETTE »

Innovier pour disposer en permanence d'une énergie à faible émission de carbone : la puissance des systèmes énergétiques hybrides, p. 6

Décarboner les industries à l'aide de petits réacteurs modulaires et de microréacteurs, p. 12

Déchets nucléaires : un atout et non un fardeau, p. 20



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

iaebulletin@iaea.org

Direction de la rédaction : Joanne Liou

Conception et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'AIEA est disponible à l'adresse suivante :

www.iaea.org/fr/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'Agence internationale de l'énergie atomique, 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 prolifération des armes nucléaires et d'aider tous les pays – en particulier ceux en développement – à tirer parti de l'utilisation pacifique, sûre et sécurisée de la science et de la technologie nucléaires.

Créée en tant qu'organisme autonome des Nations Unies en 1957, l'AIEA est le seul organisme du système des Nations Unies spécialisé dans les technologies nucléaires. Ses laboratoires spécialisés uniques en leur genre 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 fournissent les principes fondamentaux, les prescriptions et les recommandations pour garantir la sûreté nucléaire et sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un niveau élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets nocifs 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'inspection 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.

Le travail de l'AIEA comporte de multiples facettes et fait 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 à Trieste (Italie).

Notre transition innovante vers un monde à zéro émission nette

Par Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

Face aux conséquences toujours plus lourdes du changement climatique et à la nécessité impérieuse d'un développement durable, l'énergie d'origine nucléaire apparaît de plus en plus comme une solution fiable pour faciliter notre transition vers un monde à zéro émission nette.

La capacité électronucléaire devra plus que doubler par rapport aux niveaux actuels si l'on veut atteindre les objectifs climatiques mondiaux. Cependant, nos technologies énergétiques actuelles ne suffiront pas. La moitié des réductions d'émissions de dioxyde de carbone nécessaires pour atteindre le niveau de zéro émission nette en 2050 devra provenir de technologies qui ne sont pas encore sur le marché. Voilà pourquoi l'innovation technique est si importante. Les experts de l'industrie nucléaire s'accordent à dire que le renforcement des capacités de fabrication et de production de combustible, ainsi que l'harmonisation des approches réglementaires, seront essentiels pour le déploiement de la prochaine génération de réacteurs nucléaires.

Face à l'urgence de réduire les émissions et d'améliorer la sécurité énergétique dans le monde, l'importance de l'électronucléaire ne peut être sous-estimée, pas plus que celle des innovations qui nous aideront à réaliser son plein potentiel, qu'il s'agisse de nouveaux modèles de réacteurs dépassant les normes d'efficacité ou de l'intégration de l'intelligence artificielle dans les solutions concernant le cycle de vie des centrales nucléaires. Au-delà de la production d'électricité, les réacteurs nucléaires sont déjà utilisés pour le dessalement de l'eau de mer, et ils offrent un potentiel important pour d'autres applications non électriques. La présente édition du Bulletin offre une vue d'ensemble de ces solutions innovantes, et s'appuie sur les contributions d'experts de premier plan.

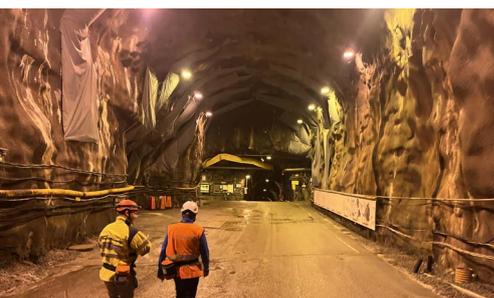
Les petits réacteurs modulaires (PRM) suscitent un intérêt croissant. Ces réacteurs nucléaires avancés, qui produisent généralement jusqu'à 300 MWe, devraient faciliter l'accès à l'énergie d'origine nucléaire dans le monde, car ils sont mieux adaptés aux petits réseaux électriques et peuvent plus facilement être couplés aux sources d'énergie renouvelable.

Ces caractéristiques font de ces réacteurs une solution potentielle pour les pays en développement, dont beaucoup disent vouloir en apprendre plus sur cette technologie. On compte plus de 80 modèles de PRM à différents stades de développement dans 18 pays. Certains modèles sont déjà déployés en Chine et en Fédération de Russie, et un modèle est en cours de construction en Argentine. La Plateforme de l'AIEA sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications et l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires de l'AIEA jouent un rôle important en appuyant le déploiement de réacteurs modulaires sûrs et sécurisés dans le monde entier.



L'année dernière, lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP27), j'ai lancé l'initiative Atoms4NetZero. L'objectif est de fournir aux pays et aux parties prenantes une expertise technique et des données scientifiques sur l'électronucléaire afin de décarboner la production d'électricité ainsi que les secteurs dont les émissions sont difficiles à réduire, tels que l'industrie et les transports. Cette initiative aide à modéliser la manière dont l'électronucléaire peut contribuer à la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre à zéro d'ici à 2050.

De toute évidence, pour atteindre les objectifs mondiaux en matière d'émissions, nous avons besoin de l'électronucléaire. La réalisation de ces objectifs dépendra de la poursuite de l'exploitation de nombreuses centrales existantes, de la construction d'un plus grand nombre de grandes centrales nucléaires traditionnelles et du déploiement de réacteurs avancés, PRM compris. Cela exigera des innovations plus poussées et une collaboration accrue à chaque étape du cycle du combustible. L'AIEA continuera à jouer son rôle unique en facilitant ces deux aspects afin que le nucléaire puisse contribuer à l'avènement d'un monde où règne la prospérité sans que la planète n'en pâtisse.



Photos : AIEA



1 Notre transition innovante vers un monde à zéro émission nette



4 Qu'est ce que l'objectif « zéro émission nette » et comment l'électronucléaire et les solutions innovantes peuvent-ils y contribuer ?



6 Innover pour disposer en permanence d'une énergie à faible émission de carbone : la puissance des systèmes énergétiques hybrides



8 Décarboner la production d'acier grâce à l'hydrogène d'origine nucléaire



10 L'énergie d'origine nucléaire au service du dessalement et de la sécurisation des ressources en eau douce



12 Décarboner les industries à l'aide de petits réacteurs modulaires et de microréacteurs



14 Réacteurs nucléaires avancés : les possibilités offertes par la fabrication additive



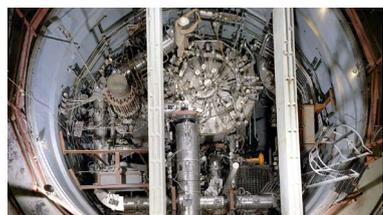
16 Alimenter les centrales de demain :
création de chaînes d'approvisionnement en combustible pour les PRM
et les réacteurs avancés



**18 Renforcer la production d'énergie nucléaire grâce à
l'intelligence artificielle**



20 Déchets nucléaires : un atout et non un fardeau



**22 Le potentiel à long terme du thorium pour la production
d'énergie nucléaire**



24 Réglementer les modèles de réacteurs innovants



**26 Vérification du combustible nucléaire utilisé dans les dépôts
géologiques profonds**

QUESTIONS-REPONSES

28 Façonner les perceptions de l'énergie nucléaire

INFOS AIEA

30 Actualités

32 Publications

Les innovations nucléaires au service du « zéro émission nette »?

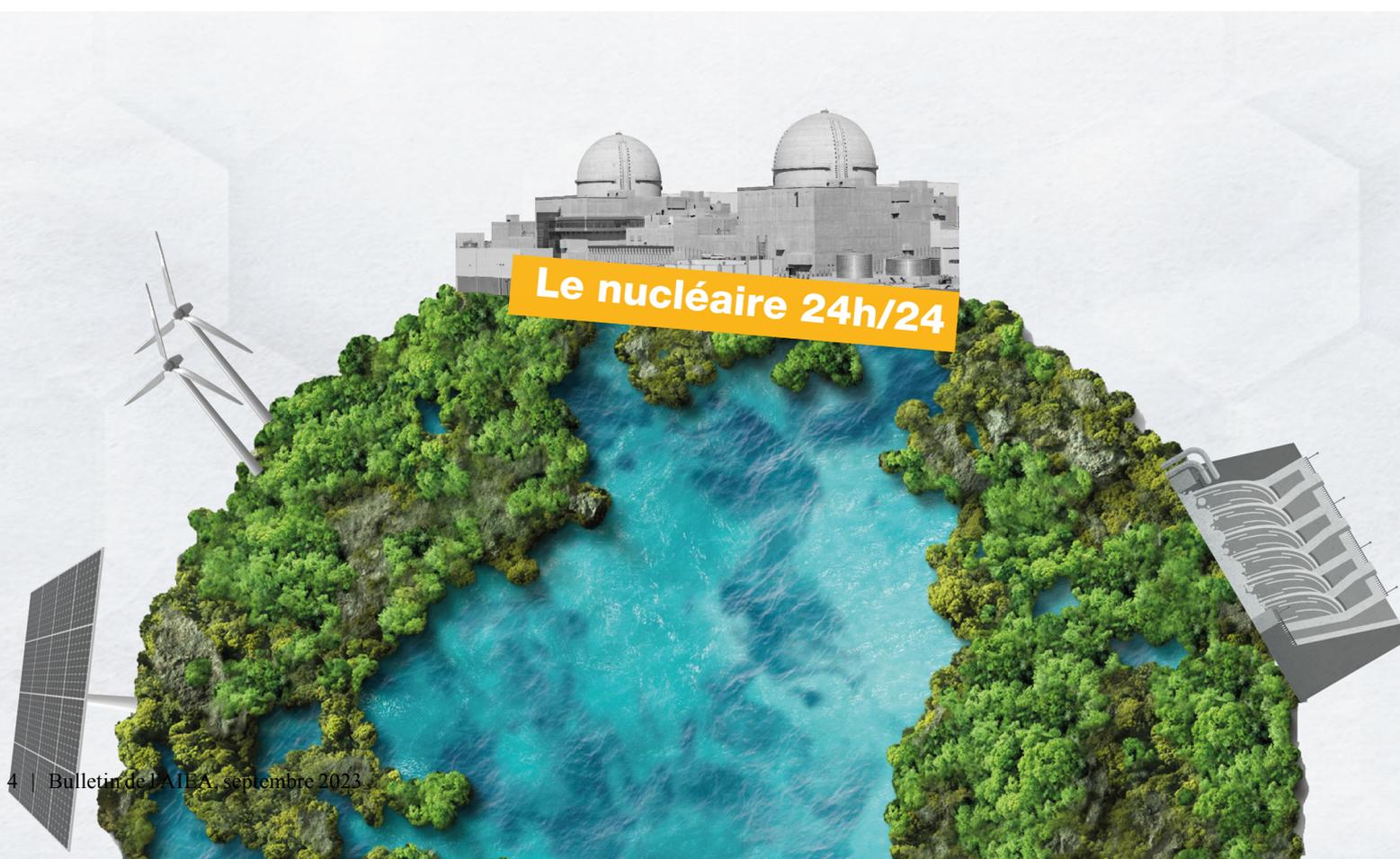
Par Joanne Liou

Dans le cadre des efforts déployés pour assurer un avenir durable et la résilience au changement climatique, l'objectif « zéro émission nette » de gaz à effet de serre (GES) s'est fait jour aux quatre coins du monde. Pour l'atteindre, il faut soit utiliser des technologies qui n'émettent aucun GES (telles que les énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique et l'énergie d'origine nucléaire), soit accepter un certain niveau d'émissions tout en retirant de l'atmosphère une quantité équivalente au moyen de technologies de piégeage du carbone ou de technologies comparables.

« Les spécialistes du climat s'accordent à dire que pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 degré d'ici à la fin du siècle, le système énergétique, qui est la principale source d'émissions de GES, doit être neutre en carbone. Cela signifie aucune émission, ou zéro émission nette », explique Henri Paillère, chef de la Section de la planification et des études économiques à l'AIEA. L'Accord de Paris de 2015, adopté par 196 pays, vise à limiter le réchauffement climatique à moins de 2 °C, et de préférence à 1,5 °C.

Les scientifiques s'entendent également pour dire que l'activité humaine est le principal moteur du changement climatique. La combustion de combustibles fossiles, le défrichement et la déforestation, y compris des mangroves, génèrent des GES comme le dioxyde de carbone et le méthane, qui piègent la chaleur et provoquent une hausse des températures. La fréquence accrue des phénomènes météorologiques extrêmes, l'élévation du niveau des mers et les changements de la température mondiale montrent combien il est urgent de passer à une société neutre en carbone.

Les nations du monde entier se sont engagées à réduire leurs émissions de GES pour limiter leur empreinte et remédier à la crise climatique. « Pour concrétiser l'objectif "zéro émission nette", il faut agir sur plusieurs plans, et notamment réduire l'utilisation des combustibles fossiles et recourir davantage aux sources d'énergie propre », indique M. Paillère. D'après le document Perspectives énergétiques mondiales 2022 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'électronucléaire fournit au total 10 % de l'électricité dans le monde et un quart de l'approvisionnement en énergies à faible émission de carbone.



« L'électronucléaire, réputé pour sa faible empreinte carbone et sa production d'énergie fiable, s'impose comme un élément clé de la transition vers une énergie propre », ajoute M. Paillère.

Les innovations au service de l'avenir

Les innovations dans l'industrie nucléaire seront essentielles pour tirer parti de tout le potentiel de l'électronucléaire sur la voie de l'objectif « zéro émission nette ». De nouveaux modèles de réacteurs entrent en scène et de nouvelles méthodes de fabrication modulaire font leur apparition, apportant avec eux des promesses et défis quant à leur déploiement. L'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires de l'AIEA vise à trouver un terrain d'entente entre les organismes de réglementation, les concepteurs, les exploitants et d'autres parties prenantes pour favoriser un déploiement sûr et sécurisé de ces réacteurs avancés, y compris les petits réacteurs modulaires.



Toutefois, l'avenir de l'électronucléaire dépend non seulement des innovations dans les technologies des réacteurs, mais aussi des processus de fabrication, de la sécurité de l'approvisionnement en combustible, des solutions pour le combustible usé et d'autres facteurs. Il existe déjà des exemples qui prouvent que les innovations, telles que l'intelligence artificielle et la fabrication additive, ouvrent la voie à des solutions sûres et durables qui permettraient de réaliser des économies et d'améliorer les aspects économiques de l'exploitation des centrales nucléaires.

Si l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont des sources d'énergie variables qui dépendent des conditions météorologiques et de l'heure de la journée, les centrales nucléaires sont pour leur part des sources d'énergie acheminables, c'est à dire que leur production peut être adaptée en fonction de la demande en électricité. Le potentiel des systèmes énergétiques hybrides qui combinent l'énergie d'origine nucléaire et l'énergie renouvelable répond au besoin de flexibilité du réseau et de réduction des émissions, tout en permettant d'optimiser les ressources financières. En outre,



l'utilisation accrue de l'énergie d'origine nucléaire pour des applications non électriques, notamment le chauffage urbain, la production d'hydrogène, le dessalement et la production de chaleur pour les processus industriels, offre des moyens de réduire les émissions.

Dans le cadre de l'objectif « zéro émission nette », l'AIEA estime que le nucléaire est bien placé pour aider à décarboner l'approvisionnement en électricité et qu'une réduction de la part de l'énergie d'origine nucléaire rendrait l'objectif plus coûteux et plus difficile à atteindre. Pour tirer parti de l'énergie d'origine nucléaire dans la transition vers le « zéro émission nette », l'AIEA a lancé l'initiative Atoms4NetZero, qui vise à informer les décideurs et responsables politiques de la possibilité d'aller de l'avant en faisant de l'électronucléaire le pilier fiable de transitions vers une énergie propre, peu coûteuse, résiliente et plus sécurisée. En août 2023, on comptait 410 réacteurs nucléaires en exploitation, pour une capacité installée totale de plus de 368 000 MWe dans 31 pays. En parallèle, 57 réacteurs sont en construction dans 17 pays, dont trois primo-accédants.

L'évolution mondiale en faveur de l'énergie d'origine nucléaire était bien visible l'année dernière lors de la Conférence générale 2022 de l'AIEA. Un nombre record de 51 pays ont souligné le rôle de cette énergie dans leurs efforts d'atténuation du changement climatique, de sécurité énergétique et de développement durable.

« La crise climatique et la crise énergétique ont incité davantage de pays à considérer l'énergie d'origine nucléaire comme un élément de la solution. Les sondages d'opinion publique dans le monde entier montrent un taux d'acceptation croissant », a indiqué Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, dans sa déclaration à la Conférence. « Les caractéristiques uniques de l'énergie d'origine nucléaire en tant que source d'énergie sûre, sécurisée et fiable sont essentielles pour assurer la transition écologique du monde. »

Innover pour disposer en permanence d'une énergie à faible émission de carbone : la puissance des systèmes énergétiques hybrides

Par Emma Midgley

Pour réduire les émissions du secteur énergétique, il est essentiel de faire usage de toutes les sources d'énergie à faible émission de carbone. Si les systèmes d'énergie renouvelable intermittente voient leur part croître dans les réseaux électriques pour assurer un approvisionnement continu en énergies à faible émission de carbone, les centrales nucléaires, elles, sont mises à contribution pour combler les lacunes de l'énergie solaire et éolienne dans les systèmes énergétiques hybrides.

L'énergie d'origine nucléaire est une énergie acheminable, capable de s'adapter à l'évolution de la demande et de produire 24 heures sur 24 et en toute fiabilité d'énormes quantités d'électricité bas carbone. Cette stabilité est la raison pour laquelle elle est généralement utilisée comme charge de base, car elle fonctionne en continu et ne connaît que peu, voire pas du tout, de variations de production. Couplée aux énergies renouvelables, l'énergie d'origine nucléaire contribue également à la stabilité des réseaux électriques en venant en renfort de la production intermittente des sources renouvelables. Par exemple, certaines centrales nucléaires aux États-Unis d'Amérique ajustent régulièrement leur capacité d'environ 10 à 15 % pour tenir compte des variations habituelles de la demande d'électricité et de l'apport intermittent des sources renouvelables.

« Les systèmes énergétiques hybrides alliant le nucléaire aux énergies renouvelables offrent une synergie puissante, en combinant la fiabilité et la charge de base de l'énergie d'origine nucléaire avec des sources d'énergie renouvelable intermittente. Cette approche intégrée est la clé pour assurer à l'avenir un système énergétique résilient et à faible émission

de carbone, capable de satisfaire une demande croissante tout en atténuant le changement climatique », explique Tatjana Jevremovic, cheffe d'équipe à l'AIEA pour le développement de la technologie des réacteurs à eau.

Pour décarboner chaque heure de consommation d'énergie, il faudra mobiliser l'ensemble des technologies qui n'émettent pas de carbone. Toutes les synergies potentielles entre ces ressources énergétiques ne sont pas encore pleinement mises à profit, et les experts étudient les avantages stratégiques de l'intégration directe de ces systèmes parallèles. Les systèmes énergétiques hybrides cherchent à coupler le nucléaire et les énergies renouvelables en tirant parti de leurs avantages respectifs. L'objectif est d'alimenter le réseau en électricité de façon fiable et durable, tout en offrant une énergie à faible émission de carbone aux différents secteurs consommateurs d'énergie.

Systèmes couplés

Les systèmes hybrides peuvent intégrer leurs différentes sources d'énergie de deux façons distinctes. La première repose sur des systèmes à couplage lâche, qui combinent les productions de diverses sources d'énergie pour améliorer les performances et la fiabilité globales du système. La seconde, qui n'a pas encore été mise en œuvre pour le bouquet énergétique nucléaire/énergies renouvelables, passe par un système plus intégré à couplage étroit. Ce type de système exploite les forces uniques de chaque composant pour optimiser la production d'énergie et les avantages pour l'environnement.



« Une transition vers des systèmes énergétiques plus intégrés permettrait de satisfaire en permanence la demande du réseau, que la production d'électricité soit d'origine nucléaire, éolienne, hydraulique, solaire, géothermique ou provienne de la biomasse. Dans l'idéal, ces systèmes devraient également intégrer des solutions de stockage d'énergie pour que l'on puisse gérer efficacement les fluctuations de la demande nette d'électricité », précise M^{me} Jevremovic. « En outre, si l'on tient compte des taxes sur le carbone lorsque l'on évalue la pertinence économique des systèmes énergétiques hybrides, les coûts d'exploitation du nucléaire et des énergies renouvelables pourraient être encore plus bas que ceux associés aux énergies fossiles conventionnelles. »

À l'avenir, les systèmes énergétiques hybrides à couplage étroit seront conçus pour maximiser les synergies et optimiser la production d'énergie en tenant compte des conditions en temps réel. Par exemple, les sources d'énergie renouvelable pourraient être mieux intégrées aux centrales nucléaires afin de fournir un supplément d'électricité pendant les pics de demande, ce qui compenserait le fait qu'on ne peut pas modifier rapidement la production d'énergie d'origine nucléaire. Autre exemple : si l'énergie d'origine nucléaire était intégrée aux systèmes hydroélectriques, l'énergie excédentaire produite par les réacteurs nucléaires pendant les heures creuses pourrait être utilisée pour pomper de l'eau dans des réservoirs surélevés, qui pourrait ensuite être utilisée pour actionner des turbines hydroélectriques pendant les périodes de forte demande.

Les systèmes énergétiques hybrides pourraient également être utilisés pour gérer et coordonner la production d'électricité dans des zones isolées ou non raccordées au réseau afin d'assurer l'approvisionnement en électricité d'infrastructures essentielles, telles que des hôpitaux ou des centres de transport. Le Laboratoire national de l'Idaho a récemment présenté un système autonome appelé « Microgrid in a Box » (Microréseau en boîte). L'idée ici serait d'associer un petit réacteur modulaire à l'énergie hydraulique, solaire ou éolienne pour fournir de l'électricité en cas de panne ou de perturbation généralisée du réseau électrique.

Rôle de l'AIEA

L'AIEA a récemment lancé un projet de recherche coordonnée sur l'évaluation technique et l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides nucléaire/énergies renouvelables. L'objectif est d'améliorer les méthodes d'analyse du rôle que ces systèmes pourraient jouer dans les systèmes énergétiques actuels et futurs, de recenser les possibilités d'action, d'encourager la coopération internationale et de partager les connaissances sur le sujet afin d'aider les pays à atteindre leur objectif de zéro émission nette. Parmi les pays qui participent à ce projet figure le Pakistan. « Compte tenu des besoins énergétiques du Pakistan et des défis environnementaux mondiaux, la stratégie d'intégration du nucléaire et des énergies renouvelables s'impose », indique Haseeb ur Rehman, ingénieur principal et professeur assistant à l'Institut pakistanais d'ingénierie et de sciences appliquées (PIEAS). « Le soleil et le vent abondent, et l'énergie nucléaire apporte une base stable. Cette combinaison énergétique permet de réduire les émissions tout en renforçant la sécurité énergétique. »

L'AIEA a créé la Plateforme pour les simulateurs en ligne de tâches partielles dans les centrales nucléaires (HOPS) en coopération avec son centre collaborateur au PIEAS. La plateforme HOPS comprend deux simulateurs basés sur un système énergétique hybride nucléaire/éolien et un système énergétique hybride nucléaire/solaire. Ces simulateurs en ligne permettent aux utilisateurs de s'entraîner dans les conditions de fonctionnement des systèmes et sous systèmes des centrales nucléaires. Les professionnels du nucléaire du monde entier peuvent y accéder gratuitement, sur demande, et avoir également accès aux documents connexes.

Les systèmes énergétiques intégrés sont capables de satisfaire en permanence la demande du réseau, que la production d'électricité provienne du nucléaire ou de sources renouvelables.

(Image : AIEA)



Décarboner la production d'acier grâce à l'hydrogène d'origine nucléaire

Par Mariia Platonova

La production d'acier représente plus de 7 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂). Ce pourcentage devrait grimper en flèche au cours des prochaines décennies, parallèlement à l'augmentation de la demande d'acier, qui est vital pour des secteurs allant de l'énergie et des transports à la construction et aux appareils électroménagers. Toutefois, l'énergie nucléaire pourrait contribuer à mettre la production d'acier sur la voie du zéro émission nette.

Environ deux milliards de tonnes d'acier sont produites chaque année dans le monde. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la demande d'acier devrait augmenter de plus d'un tiers d'ici 2050, principalement dans les pays en développement. Un nombre croissant d'entreprises mondiales cherchent des moyens de décarboner les processus industriels de ce secteur qui consomment beaucoup d'énergie.

L'industrie de l'acier dépend largement du coke pour l'alimentation des hauts fourneaux qui transforment le minerai de fer en acier, un processus qui émet de grandes quantités de CO₂. Cependant, il est possible de créer de l'acier en utilisant une méthode appelée réduction directe du fer, dans laquelle l'hydrogène réagit avec le minerai de fer sans fusion et émet de la vapeur d'eau mais pas de CO₂.

« La quantité d'hydrogène nécessaire pour créer de l'acier vert est stupéfiante. Traditionnellement, les combustibles fossiles ont été utilisés pour produire la quasi-totalité de l'hydrogène, c'est pourquoi trouver la quantité nécessaire d'hydrogène décarboné sera l'une des plus grandes difficultés », déclare Francesco Ganda, responsable technique chargé des applications non électriques à l'AIEA. « La production nucléaire d'hydrogène, sans aucune émission, peut réellement changer la donne pour le secteur, car l'énergie d'origine nucléaire peut fournir suffisamment de chaleur et d'électricité 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 pour produire la quantité d'hydrogène nécessaire. Cela pourrait aider à faire d'énormes progrès dans la transition vers l'énergie propre. »

Couplés à une usine de production d'hydrogène, les réacteurs nucléaires de puissance constituent un système de cogénération qui peut produire efficacement de l'énergie et de l'hydrogène, équipé de composants pour l'électrolyse ou

les processus thermochimiques. L'électrolyse est un processus qui consiste à utiliser un courant électrique continu pour décomposer des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène.

L'électrolyse de l'eau se fait à des températures relativement basses, inférieures à 100 degrés Celsius, tandis que l'électrolyse de la vapeur se fait à des températures beaucoup plus élevées, de l'ordre de 700 à 800 degrés Celsius, et nécessite moins d'électricité que l'électrolyse de l'eau. L'électrolyse de l'eau est un processus dans lequel on utilise de l'électricité pour séparer l'hydrogène de l'oxygène dans l'eau. Ce type de technologie est disponible dans le commerce depuis des décennies. L'électrolyse à haute température repose sur le même principe mais utilise de l'eau sous forme de vapeur, ce qui réduit la quantité d'électricité nécessaire.

Grâce aux progrès réalisés dans les technologies d'électrolyse, la production d'hydrogène à partir de réacteurs nucléaires de puissance traditionnels est plus efficace et moins coûteuse. Dans au moins une centrale nucléaire aux États-Unis – Prairie Island dans le Minnesota –, on est en train d'installer un électrolyseur à haute température et d'utiliser la chaleur issue du réacteur pour réduire la consommation d'électricité et, par conséquent, le coût de la production nucléaire d'hydrogène.

« Le processus à haute température des électrolyseurs à oxyde solide peut tirer parti de l'énergie thermique issue d'une centrale nucléaire sous forme de vapeur, ce qui rend l'électrolyseur incroyablement efficace », déclare Akhil Batheja, directeur du développement commercial de l'hydrogène chez Bloom Energy, une entreprise qui produit des piles à combustible à oxyde solide pour la production d'énergie. « Étant donné que les coûts de l'électricité représentent la plus grande partie des coûts liés à l'hydrogène par électrolyse, il s'agit de la proposition avec le meilleur rapport qualité-coût pour une centrale nucléaire et pour la production d'hydrogène bas carbone. »

Rôle de l'AIEA

L'AIEA aide les pays en soutenant la recherche sur l'utilisation de la capacité nucléaire existante pour la production d'hydrogène, notamment dans le cadre de projets de recherche



L'utilisation de l'énergie d'origine nucléaire bas carbone pour produire de l'hydrogène pourrait avoir un impact sur la décarbonation du secteur industriel de l'acier. (Photo : Adobe Stock)

coordonnée. Pour aider les pays à évaluer, planifier et élaborer des stratégies de développement de projets de production nucléaire d'hydrogène, l'AIEA organise également des réunions techniques et mis au point le programme d'évaluation économique de l'hydrogène, un outil permettant d'évaluer la viabilité technico-économique de la production d'hydrogène à grande échelle à l'aide de l'énergie nucléaire. En outre, en 2022, l'AIEA a lancé une initiative visant à élaborer une feuille de route pour le déploiement commercial de la production d'hydrogène à l'aide de l'énergie nucléaire et a publié une formation en ligne sur la production d'hydrogène dans le cadre de la cogénération nucléaire.

« Plusieurs pays un peu partout dans le monde explorent et testent l'utilisation de l'énergie nucléaire pour produire de l'hydrogène propre, notamment pour produire de l'acier », déclare Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « Avec l'avènement d'une nouvelle technologie d'électrolyseur plus efficace et le déploiement de technologies de réacteurs avancés, comme les réacteurs à haute température, l'énergie nucléaire est bien placée pour jouer un rôle essentiel dans la production d'hydrogène propre et dans la décarbonation de la production d'acier et d'autres secteurs industriels. »

L'énergie d'origine nucléaire au service du dessalement et de la sécurisation des ressources en eau douce

Par Omar Yusuf

L'eau est au cœur de la crise climatique. L'élévation du niveau des mers, les inondations et les sécheresses de plus en plus fréquentes ainsi que la diminution de la couverture glaciaire et neigeuse, sont autant de facteurs qui devraient entraver l'accès aux sources d'eau potable. En l'absence de solutions permettant d'atténuer ces phénomènes et d'autres effets du changement climatique, la pénurie d'eau menacera de plus en plus la qualité de vie sur la planète. Le manque d'eau douce pour la consommation individuelle et industrielle ne se limite pas aux pays enclavés, mais touche également les petits États insulaires en développement et des pays dotés de vastes territoires côtiers.

Les centrales nucléaires pourraient offrir une solution en remplissant une double fonction : produire une électricité bas carbone et transformer l'eau de mer en eau douce. « Les applications non électriques de l'énergie nucléaire, telles que le dessalement, offrent des solutions durables pour diverses activités très gourmandes en eau, et peuvent aider à couvrir les besoins liés à la consommation de millions de ménages, aux applications industrielles, à l'agriculture ou encore à l'élevage, pour les générations actuelles et futures », explique Francesco Ganda, responsable technique des applications non électriques à l'AIEA.

Depuis près de 30 ans, l'AIEA appuie les pays dans leurs efforts pour améliorer l'approvisionnement en eau

propre, la qualité de cette eau et l'accès à celle-ci grâce au dessalement nucléaire, un processus qui utilise la chaleur et l'électricité produites par une centrale nucléaire pour éliminer le sel et les minéraux de l'eau de mer par distillation ou séparation membranaire, le plus souvent par osmose inverse. Le dessalement nucléaire a une intensité de carbone moindre et son coût est intéressant par rapport à celui des autres méthodes, telles que les techniques fondées sur les combustibles fossiles. Forts de centaines d'années-réacteurs d'exploitation réussie, l'Inde, le Japon et le Kazakhstan sont les pays qui ont le plus d'expérience en matière de dessalement nucléaire. Cette solution offre un accès viable et abordable à l'eau potable à des milliers de communautés. « Les centrales nucléaires pourraient aider à répondre à la demande croissante d'eau potable et donner de l'espoir aux régions souffrant de graves pénuries d'eau dans de nombreuses zones arides et semi-arides », ajoute M. Ganda.

En 1996, l'AIEA a créé son premier groupe consultatif sur le dessalement nucléaire, qui a contribué à stimuler la discussion sur les activités dans ce domaine et a fourni aux pays un forum pour échanger leurs données d'expérience d'utilisation des centrales nucléaires pour le dessalement de l'eau. Depuis lors, l'intérêt pour le dessalement nucléaire n'a cessé de croître et ce, à l'échelle mondiale.

« De plus en plus de pays envisagent sérieusement de recourir au dessalement nucléaire pour parvenir à satisfaire leurs

Les usines de dessalement nucléaire, comme celle photographiée ici au complexe électronucléaire de Karachi (Pakistan), s'avèrent une solution viable pour répondre à la demande croissante d'eau potable.

(Photo : Commission pakistanaise de l'énergie atomique)



besoins en eau sans pour autant émettre de carbone », déclare M. Ganda. « Le dessalement étant une technologie très énergivore, il est impératif d'utiliser des sources d'énergie à grande échelle et sans émission de carbone, telles que l'énergie nucléaire, afin de continuer à assurer l'accès essentiel à une eau propre pour un nombre croissant de personnes dans le monde, tout en luttant contre le changement climatique et en respectant les engagements en faveur d'un objectif "zéro émission nette". L'AIEA joue un rôle de premier plan dans les efforts déployés pour aider les pays à atteindre ces objectifs. »

Pour encourager et accélérer les initiatives dans ce domaine scientifique, l'AIEA a développé et lancé deux logiciels : le logiciel d'évaluation économique du dessalement et le Programme d'optimisation thermodynamique du dessalement. Tous deux sont conçus pour permettre aux experts de mener des analyses économiques et thermodynamiques et des analyses visant à optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie lorsqu'elles sont associées à diverses procédures de dessalement.

Exploiter le potentiel du dessalement

En 2022, dans le cadre de son programme de coopération technique, l'AIEA a organisé un cours national à Amman (Jordanie), en vue de renforcer la capacité à utiliser les petits réacteurs modulaires (PRM) pour dessaler l'eau. Par l'intermédiaire de la Plateforme de l'AIEA sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications, la Commission jordanienne de l'énergie atomique (JAEC) a demandé aux experts en électronucléaire de l'AIEA d'examiner une étude sur le dessalement nucléaire au moyen de PRM.

« En Jordanie, le dessalement est considéré comme la principale solution pour répondre à la demande d'eau douce

attendue et réduire le déficit qui existe entre l'offre et la demande », déclare Khalid Khasawneh, commissaire chargé des réacteurs nucléaires de puissance à la JAEC. L'étude a montré que la Jordanie pouvait utiliser l'énergie nucléaire à des fins de dessalement. M. Khasawneh ajoute que cette solution « offre aux consommateurs finaux de l'eau douce des prix intéressants par rapport aux prix des sources d'énergie importée ».

L'AIEA organisera à Moscou en octobre 2023 un cours interrégional consacré à l'examen des aspects conceptuels des projets de cogénération qui visent à utiliser des PRM et des microréacteurs et à recourir à l'électricité ou à la chaleur pour alimenter le processus de dessalement.

En plus du logiciel d'analyse, de la boîte à outils de l'AIEA sur le dessalement nucléaire et des cours dispensés par l'AIEA, les experts peuvent également consulter une série de publications techniques pour se familiariser avec les aspects conceptuels, économiques et de sûreté du dessalement nucléaire de l'eau de mer. Afin d'encourager l'innovation dans ce domaine, l'AIEA a également mené à bien un certain nombre de projets de recherche coordonnée connexes.

L'AIEA continue d'organiser les efforts pour optimiser la contribution des réacteurs nucléaires existants et futurs à l'amélioration de l'accès à l'eau propre grâce aux technologies de dessalement décarbonées fondées sur l'électronucléaire. L'année dernière, l'AIEA a lancé un nouveau projet de recherche pour examiner diverses applications de la cogénération nucléaire – parmi elles le dessalement nucléaire – et pour étudier pourquoi et comment les pays pourraient envisager cette solution dans leurs palettes d'options pour relever le défi climatique.

Décarboner les industries à l'aide de petits réacteurs modulaires et de microréacteurs

Par Emma Midgley

Qu'il s'agisse de la cimenterie, du transport maritime, de l'exploitation pétrolière et gazière ou de la production d'acier, les secteurs de l'industrie s'interrogent sur leurs pratiques et les modifient afin de réduire les émissions de carbone et de passer à des modes d'exploitation à zéro émission nette. Les nouvelles solutions de génération d'énergie d'origine nucléaire apparaissent comme un choix déterminant.

Les opérations en amont, telles que l'extraction de gaz et de pétrole via le forage, le pompage et la fracturation, requièrent d'énormes quantités d'énergie actuellement produite à partir de combustibles fossiles. Les opérations en aval, telles que le raffinage et la transformation de ces matières en vue de leur utilisation comme combustibles ou dans des produits tels que les produits pharmaceutiques ou les engrais, nécessitent également de la chaleur et de l'électricité générées en grande partie à partir de combustibles fossiles.

« La plupart des opérations pétrolières et gazières nécessitent de brûler des combustibles fossiles pour produire l'énergie nécessaire aux activités en amont et en aval », affirme Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « Pour réduire les émissions de carbone provenant du forage, de la liquéfaction du gaz naturel et du raffinage, l'idéal serait d'utiliser de l'électricité produite à partir de sources à faible teneur en carbone telles que le nucléaire. »

Nombre d'activités pétrolières et gazières, de forage et d'extraction ont lieu dans des endroits isolés et, souvent, il

n'est pas possible de recourir à l'électricité du réseau pour alimenter ces processus. C'est là que les microréacteurs ou les petits réacteurs modulaires (PRM) pourraient fournir une alternative à faible teneur en carbone.

« Les entreprises intervenant dans les processus de raffinage et les opérations de forage ont besoin du nucléaire. Il s'agit d'activités à forte intensité de carbone et, dans 30 % des cas, le réseau électrique ne peut pas être raccordé aux zones d'extraction ou de raffinage », indique Chirayu Batra, directeur de la technologie à Terra Praxis, une organisation à but non lucratif qui se concentre sur les solutions de décarbonation des secteurs dont les émissions sont difficiles à diminuer, notamment le charbon, la chaleur industrielle et les transports lourds. « Brûler du diesel et du gaz pour produire l'énergie nécessaire à ces activités est une perte commerciale pour l'industrie et se traduit par une augmentation des émissions de carbone. Il existe un moyen d'électrifier ces processus grâce à une source d'énergie décarbonée, éloignée et fiable. Les microréacteurs pourraient être utilisés à peu près partout, et notamment en mer s'ils sont installés à bord de navires ou sur des plateformes flottantes. »

Des opérations efficaces et propres

Les PRM et les microréacteurs peuvent non seulement être déployés dans des endroits reculés mais les petits réacteurs modulaires peuvent également avoir des usages importants dans des secteurs tels que la fabrication de plastiques ou d'autres formes de traitement industriel utilisant la chaleur.



La génération actuelle de réacteurs nucléaires de puissance produit de grandes quantités de chaleur, mais environ 60 à 70 % de cette chaleur est rejetée dans l'environnement en raison du taux de transformation de l'énergie de la vapeur en électricité.

L'un des moyens d'utiliser plus efficacement l'énergie d'origine nucléaire tout en réduisant les émissions de carbone consiste à valoriser la chaleur produite par les réacteurs nucléaires dans des processus industriels ou chimiques. Le programme de démonstration de réacteurs avancés du Département de l'énergie des États-Unis soutient la mise au point d'un PRM à haute température refroidi au gaz qui doit être déployé dans un complexe de fabrication de produits de consommation.

L'entreprise Dow, spécialisée dans les produits chimiques, prévoit de remplacer les moteurs à combustion et à vapeur alimentés au gaz par un PRM dans le cadre de son engagement à réduire les émissions de carbone de 30 % d'ici 2030. L'objectif de Dow est de parvenir à la neutralité carbone d'ici 2050.

Un réacteur nucléaire à haute température, capable de produire de la chaleur à 750 degrés Celsius, représente une méthode à faible teneur en carbone particulièrement adaptée à la production des oléfines, composés chimiques pouvant être utilisés comme matières premières pour les plastiques, les détergents et les adhésifs. Le PRM proposé par Dow sera installé sur un site de fabrication qui existe déjà à Seadrift,

au Texas, et devrait réduire les émissions du site d'environ 440 000 tonnes de dioxyde de carbone par an. Il produira de la chaleur industrielle pour fabriquer des produits tels que le polyéthylène, qui est utilisé dans les emballages, les peintures et les mousses.

La construction des quatre réacteurs de ce projet devrait commencer en 2026 et s'achever à la fin de la décennie. Ce projet « permettra à Dow de franchir une étape importante dans la réduction de ses émissions de carbone tout en fournissant à ses clients et à la société des produits à plus faible empreinte carbone », explique Jim Fitterling, président-directeur général de Dow. L'initiative « servira d'exemple de la façon dont il est possible de décarboner le secteur industriel de manière sûre, efficace et abordable », ajoute-t-il.

L'AIEA aide à coordonner les efforts que font des pays du monde entier pour mettre au point des PRM et des microréacteurs en rassemblant les experts, les gouvernements et les organismes de réglementation afin d'améliorer la sûreté et la sécurité du déploiement de cette nouvelle technologie. L'AIEA a lancé son Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI) en juin 2022 et sa Plateforme sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications en 2021. La NHSI vise à faire progresser l'harmonisation et la normalisation de la conception et de la construction des PRM et des approches réglementaires et industrielles les concernant, tandis que la Plateforme soutient tous les aspects de la mise au point et du déploiement des PRM, ainsi que de l'octroi de licences et de la surveillance dans ce domaine.



Le Département de l'énergie des États-Unis soutient la mise au point d'un petit réacteur modulaire devant être déployé dans un complexe de fabrication de produits de consommation au Texas.

(Image : Dow et X-energy)

Réacteurs nucléaires avancés : les possibilités offertes par la fabrication additive

Par Lucy Ashton

Imaginez qu'on puisse imprimer en 3D le cœur d'un réacteur nucléaire ou des pastilles de combustible nucléaire. L'idée que l'impression 3D puisse créer des matériaux suffisamment robustes pour résister aux conditions extrêmes d'un réacteur nucléaire peut sembler farfelue, mais d'après de nombreux experts, c'est pourtant la clé pour accélérer le déploiement de réacteurs avancés et maximiser la contribution de l'énergie nucléaire à la lutte contre le changement climatique.

Déjà utilisée dans certaines industries, l'impression 3D est une forme de fabrication additive qui fait appel à un procédé d'impression par superposition de couches successives de matière pour créer des objets. Ce procédé s'oppose à la fabrication soustractive, qui consiste à découper ou à brûler les matériaux excédentaires. Fonctionnant directement à partir d'un dessin numérique et contrôlée par ordinateur, l'impression 3D permet de produire des formes complexes qui étaient auparavant difficiles à réaliser, voire impossibles. Cette méthode de fabrication est plus rapide, génère moins de déchets, réduit le risque d'erreur et permet souvent aux concepteurs d'alléger le poids des objets – autant d'attributs qui pourraient réduire considérablement les coûts de fabrication.

« À l'avenir, le secteur nucléaire pourrait faire grand usage de l'impression 3D et d'autres techniques de fabrication de pointe, comme le font déjà les secteurs aéronautique et automobile », déclare Aninda Dutta Ray, ingénieur nucléaire travaillant sur la fabrication de pointe à l'AIEA. « Le potentiel est réel. Les premières étapes sont déjà en bonne voie : des recherches et des examens sont menés de manière intense à la lumière des codes et des normes de conception nucléaire existants, et certains organismes de réglementation ont même commencé à rédiger des orientations pour les titulaires de licence. »

Présentation des impressions 3D et essais

Comme pour la plupart des nouveaux procédés de fabrication, on avance à petits pas, lentement et avec précaution. Le secteur nucléaire a enregistré quelques cas de première utilisation d'impression 3D : une hélice de pompe imprimée

en 3D a ainsi été installée dans un réacteur slovène en 2017. Ce composant, qui ressemble à un ventilateur ou à une turbine, propulse l'eau dans la pompe, et a été imprimé en 3D car les dessins originaux n'étaient pas disponibles.

Aux États-Unis d'Amérique, le Laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL) développe des technologies d'impression 3D pour le nucléaire et d'autres secteurs industriels. Dans le cadre d'un essai inédit, l'ORNL a imprimé des fixations appelées « attaches pour canal ». Les pièces ont été installées dans un réacteur nucléaire en 2021 et y resteront jusqu'en 2027, avant d'en être extraites et d'être inspectées pour évaluer leur performance dans les conditions du réacteur. La multinationale française Framatome a installé le premier composant de combustible en acier inoxydable imprimé en 3D dans la centrale nucléaire de Forsmark (Suède) en 2022. En outre, la Fédération de Russie a récemment construit une imprimante 3D capable d'imprimer des objets d'un diamètre maximum de 2,2 mètres et d'une hauteur de 1 mètre, tandis qu'en République de Corée, l'impression 3D est utilisée pour fabriquer des pièces telles que des composants de vannes de réglage.

Étant donné qu'au départ, l'impression 3D n'a pas été inventée pour le secteur nucléaire, les techniques de fabrication sont adaptées pour répondre aux besoins de ce secteur. À l'heure actuelle, des organismes de normalisation industrielle définissent des normes pour l'impression 3D dans différents secteurs, mais celles qui concernent le secteur nucléaire sont en cours d'élaboration.

Selon M. Dutta Ray, il est plus difficile de trouver les meilleures méthodes d'essai, d'établir des normes y afférentes dans le monde entier et d'obtenir l'agrément des organismes de réglementation que d'innover et de perfectionner les techniques de fabrication. En Europe, dans le cadre du projet NUCOBAM (NUclear COmponents Based on Additive Manufacturing), qui réunit 13 organismes de six pays européens, des recherches sont menées pour élaborer les processus de qualification et d'évaluation qui permettraient d'utiliser l'impression 3D dans les centrales nucléaires.

L'Institut de recherche sur l'énergie électrique (EPRI) collabore avec le Département de l'énergie des États-Unis et



Ces supports d'assemblage combustibles, fabriqués par le Laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL) en partenariat avec Framatome et la Tennessee Valley Authority, sont les premiers composants liés à la sûreté imprimés en 3D à être insérés dans une centrale nucléaire.

(Photo : F. List/ORNL, Département américain de l'énergie)

des fabricants dans le cadre des recherches visant à rationaliser l'acceptation réglementaire des nouvelles technologies, telles que l'impression 3D. Ces recherches sont axées sur l'étude de l'applicabilité des techniques de fabrication de pointe, l'élaboration de codes et de normes, et l'appui aux examens réglementaires en fonction des résultats des tests indépendants de la performance des matériaux face à la dégradation de l'environnement. « La demande d'autres chaînes d'approvisionnement et d'accélération du déploiement est en nette augmentation à mesure que le secteur de l'énergie poursuit sa transition vers des systèmes énergétiques avancés tels que les réacteurs avancés », déclare Marc Albert, chef d'équipe principal de l'EPRI pour les projets de fabrication de pointe. « La fabrication additive ainsi que d'autres procédés de fabrication de pointe permettront d'accélérer le déploiement des technologies propres. »

Rôle de l'AIEA

L'un des rôles de l'AIEA est d'encourager la coopération internationale et le partage des connaissances. En avril 2023, l'AIEA a lancé le Réseau international pour l'innovation à l'appui des centrales nucléaires en exploitation (ISOP), un

réseau inclusif qui permet aux pays de collaborer sur tout un éventail de sujets liés à l'innovation, y compris les techniques de fabrication avancées comme l'impression 3D.

En juin 2022, l'AIEA a également lancé l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI), afin de faciliter le déploiement de réacteurs nucléaires avancés et de petits réacteurs modulaires sûrs et sécurisés. La NHSI vise à harmoniser les approches réglementaires et à établir des approches industrielles plus uniformisées, y compris des approches communes pour les codes et les normes nucléaires applicables à la fabrication additive dans le cas des PRM.

« L'innovation concertée est la clé pour que les techniques nucléaires de la nouvelle génération sortent des laboratoires en toute sûreté et soient mises en œuvre dans le monde le plus tôt possible pour contribuer à la réalisation de l'objectif zéro émission nette », déclare Ed Bradley, chef d'équipe de l'AIEA pour l'exploitation des centrales nucléaires et l'appui technique. « Le partage des résultats, des techniques et des connaissances permet de gagner du temps et d'économiser des ressources car il évite aux pays qui ont des centrales nucléaires de faire les mêmes tests ou de dépenser de l'argent pour surmonter les mêmes obstacles. C'est ainsi que nous réussissons. »

Alimenter les centrales de demain:

création de chaînes d'approvisionnement en combustible pour les PRM et les réacteurs avancés

Par Lucy Ashton

Les ingénieurs se préparent à l'arrivée de la prochaine génération de réacteurs nucléaires, destinés à améliorer la sécurité énergétique et à atténuer le changement climatique. De nombreux modèles de réacteurs avancés, y compris les petits réacteurs modulaires (PRM), auront besoin d'un combustible HALEU, dont la teneur en uranium 235 varie de 5 à 20 % – soit plus que les 5 % du combustible alimentant la plupart des centrales nucléaires en exploitation.

« Le combustible HALEU permettra de développer des réacteurs plus petits, d'allonger le cycle d'exploitation et d'améliorer le rendement », explique Olena Mykolaichuk, directrice de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la technologie des déchets à l'AIEA. « Néanmoins, soucieux de tirer pleinement parti du combustible HALEU, certains pays augmentent leur capacité de production en vue de garantir un approvisionnement suffisant, indispensable au déploiement des PRM. »

Le combustible HALEU est produit aux États-Unis d'Amérique et en Fédération de Russie et est principalement destiné aux réacteurs de recherche et éventuellement aux réacteurs à eau ordinaire en exploitation. L'installation située en Russie est aujourd'hui la seule à fabriquer ce combustible à une échelle commerciale.

L'année dernière, l'Agence d'approvisionnement d'Euratom a établi un rapport sur l'approvisionnement futur en combustible pour les réacteurs de recherche d'Europe convertis à l'HALEU ou en passe de l'être. D'ordinaire, les réacteurs de recherche européens fonctionnent à l'uranium hautement enrichi. Les réacteurs de recherche convertis à l'HALEU sont pour le moment approvisionnés en combustible par les États-Unis et la Russie. Mais les États-Unis disent ne pouvoir garantir l'approvisionnement que jusqu'en 2035 ou 2040, faute de capacités de production suffisantes à l'heure actuelle, ce qui augmente le risque de pénurie pour les réacteurs de recherche à convertir.

L'Agence d'approvisionnement d'Euratom estime que, d'ici à 2035, l'Union européenne (UE) aura besoin de 700 kilogrammes à 1 tonne d'HALEU chaque année pour assurer l'exploitation continue de ses réacteurs de recherche. Ces chiffres ne tiennent compte d'aucune

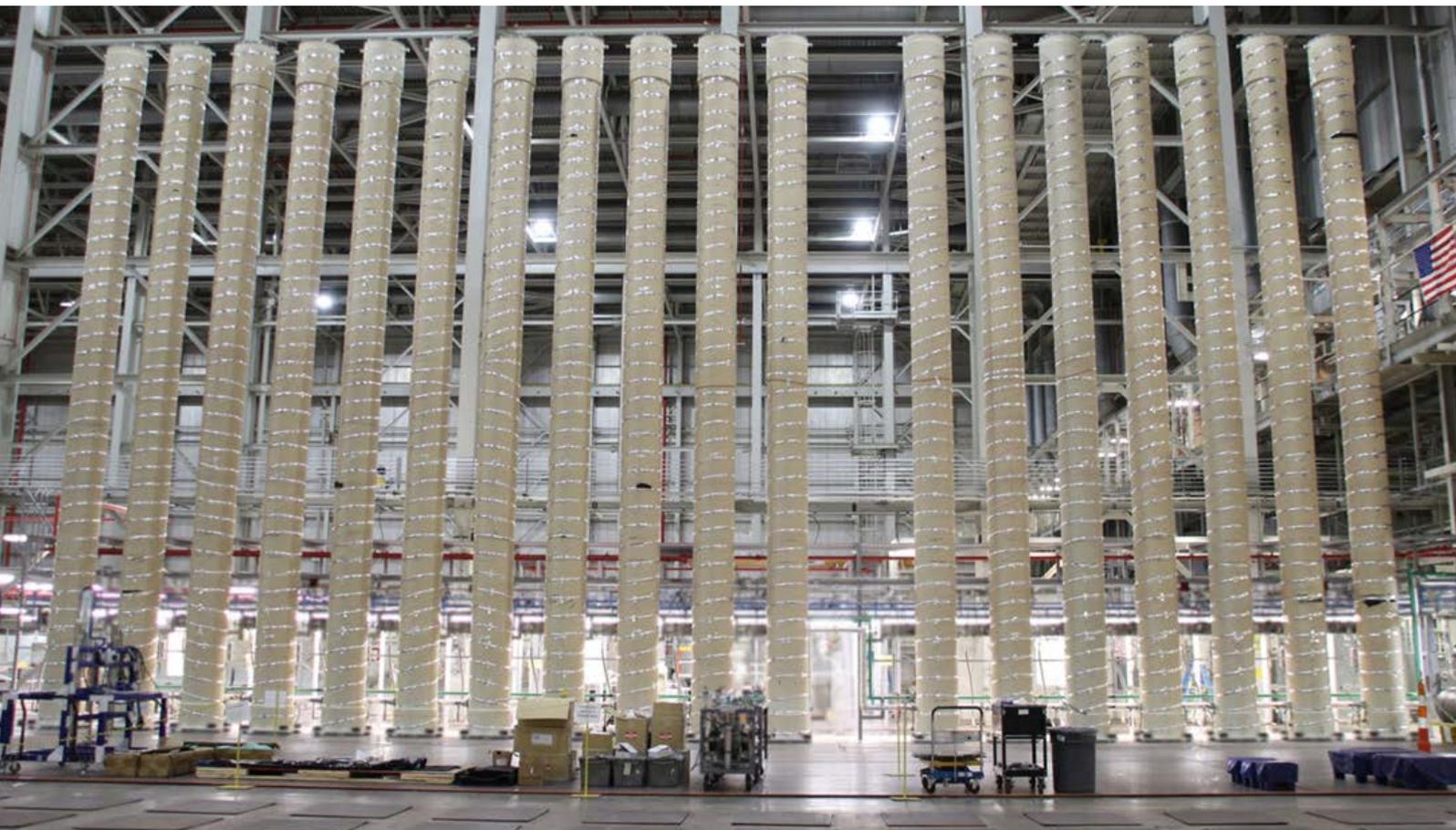
future demande des réacteurs avancés utilisés pour la production d'électricité. Euratom recommande donc que l'UE se dote de sa propre capacité de production de combustible HALEU, en raison des préoccupations liées à la sécurité des approvisionnements futurs.

Si la production de combustible HALEU n'est pas encore à l'ordre du jour en Europe, les plus grands producteurs de combustible nucléaire du continent sont des chefs de file mondiaux dans le domaine de la technologie de l'enrichissement. Capables actuellement d'enrichir l'uranium jusqu'à 6 %, ils pourraient, selon le rapport de l'Agence d'approvisionnement d'Euratom, utiliser la même technologie pour produire du combustible HALEU sans difficultés techniques majeures.

Toutefois, l'autorisation, la construction, la sécurisation et l'exploitation de ces installations exigent d'importants investissements, et les producteurs européens disent avoir encore besoin de s'assurer du bien fondé de ces investissements. Les entreprises européennes pourraient commencer à produire du combustible HALEU d'ici à cinq ans seulement, et des projets d'agrandissement d'une centrale française existante, ainsi que de construction de nouvelles installations aux États-Unis et au Royaume-Uni, sont à l'étude.

Cependant, l'industrie nucléaire américaine appelle l'attention sur le fait que le déploiement de certains modèles de PRM pourrait être retardé de plusieurs années étant donné le manque de combustible HALEU. Pour l'instant, neuf des dix modèles de réacteurs avancés financés par le Gouvernement américain auront besoin de combustible HALEU au cours des dix prochaines années. Selon les projections du Département de l'énergie des États-Unis (DOE), plus de 40 000 kilogrammes de combustible HALEU seront nécessaires d'ici à 2030, et ce chiffre ne devrait qu'augmenter au fil des ans et de la mise en service du nouveau parc de réacteurs avancés.

Pour répondre à ce besoin, le DOE investit dans la chaîne nationale de production du combustible HALEU. Il a créé un consortium à cette fin et a cofinancé une usine de production pilote à Piketon (Ohio). En juin 2023, l'organisme américain de réglementation a autorisé l'installation de Piketon à débiter ses opérations d'enrichissement.



Le Département de l'énergie des États-Unis a investi dans la production nationale de combustible à base d'uranium faiblement enrichi à teneur élevée (HALEU). Son programme pilote, basé à Piketon (Ohio), devrait produire 20 kilogrammes d'HALEU d'ici à la fin 2023. (Photo : Centrus Energy Corporation)

La cascade de centrifugeuses de Piketon devrait produire 20 kilogrammes de combustible HALEU d'ici à la fin 2023 et 900 kilogrammes en 2024. Une cascade complète de 120 centrifugeuses dispose d'une capacité combinée de production d'environ 6 000 kilogrammes de combustible HALEU par an.

En complément, un autre type de combustible HALEU commence à être produit, au moyen d'un procédé de dilution par mélange des stocks nationaux d'uranium hautement enrichi. Le combustible tri structural isotropique à particules (TRISO) est constitué d'uranium, de carbone et d'oxygène recouverts de trois couches de matériaux à base de carbone et de céramique qui empêchent le rejet de produits de fission radioactifs. Ces particules peuvent être façonnées pour former des sphères de la taille d'une boule de billard, appelées

boulets, ou des pastilles cylindriques. Le combustible TRISO HALEU est utilisé dans les réacteurs à haute température refroidis par gaz, et certains vendeurs prévoient d'en utiliser pour leurs modèles de PRM et de microréacteurs.

« La prochaine génération de technologies nucléaires nécessitera de nouvelles chaînes d'approvisionnement pour de nouveaux types de combustible », explique Ki Seob Sim, spécialiste de l'ingénierie du combustible nucléaire à l'AIEA. « Des efforts sont actuellement déployés pour mettre en place ces chaînes d'approvisionnement, mais il reste encore beaucoup à faire – notamment pour prouver clairement que ces réacteurs avancés présentent un intérêt dans de nombreuses régions – si nous voulons garantir l'approvisionnement nécessaire en combustible HALEU. Je suis toutefois convaincu que nous pouvons y parvenir. »

Renforcer la production d'énergie nucléaire grâce à l'intelligence artificielle

Par Wolfgang Picot

L'intelligence artificielle (IA) présente un potentiel prometteur pour ce qui est de faire progresser la production d'énergie nucléaire. Ces systèmes informatiques sophistiqués simulent la logique humaine pour résoudre des problèmes et prendre des décisions. Grâce à sa capacité à améliorer l'efficacité, l'automatisation, la sûreté et la maintenance prédictive, ainsi qu'à optimiser les processus, l'IA progresse déjà dans certains domaines du secteur nucléaire.

L'IA est un terme générique qui englobe diverses technologies développées au fil des décennies. Elle peut aller de simples programmes informatiques, tels que les filtres antipourriels, à des concepts plus avancés comme l'apprentissage automatique par lequel les ordinateurs apprennent à partir de leurs expériences passées au moyen d'un entraînement intensif utilisant de grandes quantités de données. Avec l'arrivée de circuits intégrés très puissants est apparu l'apprentissage profond, qui fait appel à des réseaux neuronaux artificiels calqués sur le cerveau humain.

L'IA générative, sous-ensemble de l'apprentissage profond, capable de créer des textes, des images et des vidéos originaux, a captivé l'attention du public. Elle est très polyvalente et peut être adaptée à de nombreuses fonctions ou activités différentes. « On est en droit d'être enthousiasmé par ce que les outils génératifs peuvent faire », déclare Jeremy Renshaw, qui dirige les travaux concernant l'IA, les technologies quantiques et l'innovation nucléaire à l'Institut de recherche sur l'énergie électrique (EPRI). « Les modèles actuels sont déjà très puissants et de nombreux efforts sont actuellement déployés pour développer de nouveaux outils plus performants. » Même si l'IA générative peut faciliter des tâches administratives, comme c'est le cas dans d'autres secteurs, elle ne peut pas encore être utilisée dans le cadre

de l'exploitation des centrales nucléaires en raison de son caractère nouveau et opaque. En effet, on ne comprend pas encore très bien comment les réseaux artificiels fonctionnent et parviennent à des conclusions.

Des systèmes plus transparents, appelés « IA explicable », laissent présager une utilisation plus large dans l'exploitation des centrales nucléaires. Des progrès sont réalisés en ce sens et M. Renshaw est convaincu qu'une fois concrétisés, ils permettront d'utiliser l'IA dans les centrales nucléaires dans un avenir proche.

Applications d'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique est utilisé dans le secteur nucléaire depuis un certain temps déjà et s'est avéré utile dans divers domaines. Les exploitants se servent des algorithmes d'apprentissage automatique pour la surveillance en temps réel et la maintenance prédictive. Les modèles d'apprentissage automatique passent au crible les nombreuses données fournies par les capteurs, ce qui permet aux analystes humains de se concentrer sur les irrégularités éventuelles, dans une fraction de l'ensemble des données. « L'inspecteur n'a besoin d'évaluer que les données pertinentes. Au lieu de chercher une aiguille dans une botte de foin, nous éliminons la botte de foin », explique M. Renshaw.

Cette technologie ne remplace pas l'analyse humaine. Cependant, elle peut fournir des résultats plus rapides et plus fiables tout en s'appuyant sur une interaction humaine moindre, bien que toujours indispensable. L'apprentissage automatique est déjà utilisé pour détecter les fissures dans les citernes et les tuyaux métalliques des centrales nucléaires. Il permet

d'accroître la précision, de réduire les coûts et d'optimiser la surveillance humaine, ce qui pourrait présenter de gros avantages dans le secteur de l'électronucléaire.

Il existe de nombreuses applications possibles de l'IA dans les centrales nucléaires. L'IA permettrait, par exemple, de renforcer l'efficacité et d'assurer un approvisionnement régulier en électricité en ajustant la production d'électricité en fonction de données recueillies en temps réel, telles que la demande des consommateurs, les conditions météorologiques et la performance des équipements. L'automatisation à l'aide de la robotique et de systèmes d'IA permettrait de gérer les tâches courantes, de concentrer l'intervention humaine sur les tâches à forte valeur ajoutée et d'améliorer l'efficacité de la centrale. Elle permettrait également d'optimiser la consommation de combustible et de maximiser la production d'énergie des réacteurs.

« Associée à d'autres technologies, comme les jumeaux numériques, l'IA pourrait considérablement accroître l'efficacité de la production d'énergie d'origine nucléaire », indique Nelly Ngoy Kubelwa, ingénieure nucléaire spécialisée dans les technologies innovantes à l'AIEA. Un jumeau numérique est une représentation numérique d'un objet physique, d'une personne ou d'un processus, capable de simuler des situations réelles et leurs résultats.

Selon M^{me} Ngoy Kubelwa, les solutions d'IA suscitent un vif intérêt dans la filière. Cela étant, avant qu'une nouvelle technologie puisse être utilisée dans les centrales nucléaires, il faut que les organismes de réglementation en connaissent et en comprennent parfaitement le fonctionnement pour être en mesure d'élaborer des lignes directrices et de délivrer des autorisations et des permis pour son utilisation.

« Il existe de nombreuses discussions autour de la question de savoir si l'IA, et en particulier l'IA générative, est quelque chose de radicalement différent qui nécessite que nous changions complètement notre approche pour réglementer son utilisation ou bien si nous pouvons adapter les normes actuelles », explique M^{me} Ngoy Kubelwa. « Pour étendre l'utilisation de cette technologie, nous devons définir des cadres en collaboration avec les organismes de réglementation. »

L'AIEA soutient l'application potentielle de l'IA dans les centrales nucléaires depuis 2021. Elle a élaboré un rapport sur l'IA et créé par la suite des groupes de travail sous les auspices du Réseau international pour l'innovation à l'appui des centrales nucléaires en exploitation (ISOP), qui se concentrent sur les aspects réglementaires et techniques du déploiement de l'IA. Les publications à venir sur les applications de l'IA dans le secteur nucléaire et leurs implications en matière de sûreté dans les centrales nucléaires soulignent cet engagement dans ce domaine. L'AIEA dirige également un projet de recherche coordonnée visant à étudier comment l'IA et les technologies innovantes peuvent contribuer à accélérer le déploiement des petits réacteurs modulaires, et elle envisage la création de centres collaborateurs de l'AIEA axés sur l'IA.

Pour M^{me} Ngoy Kubelwa, il ne s'agit pas seulement d'un sujet technique. « L'utilisation de l'IA et d'autres technologies émergentes sera le signe que le secteur nucléaire est à l'affût des derniers développements », déclare-t-elle. « Il est essentiel de nous engager sur ce terrain de manière proactive pour susciter l'intérêt de la jeune génération, ce qui est crucial pour assurer l'avenir de la production d'énergie d'origine nucléaire. »

L'AIEA mène un projet de recherche coordonnée qui étudie comment l'intelligence artificielle peut faciliter le déploiement de petits réacteurs modulaires.

(Image : Adobe Stock)



Déchets nucléaires : un atout et non un fardeau

Par Lucy Ashton

Et si les déchets nucléaires de haute activité issus des centrales nucléaires pouvaient alimenter une économie circulaire dans le secteur de l'énergie ? Les réacteurs à neutrons rapides qui fonctionnent dans un cycle fermé de combustible permettraient d'atteindre cet objectif.

Les réacteurs à neutrons rapides, qui utilisent des neutrons non ralentis par un modérateur tel que l'eau pour maintenir la réaction de fission en chaîne, présentent des avantages par rapport aux réacteurs nucléaires à neutrons thermiques existants. Lorsqu'ils fonctionnent dans un cycle du combustible entièrement fermé, dans lequel le combustible nucléaire est recyclé et réutilisé, les réacteurs à neutrons rapides peuvent extraire 60 à 70 fois plus d'énergie que les réacteurs à neutrons thermiques à partir de la même quantité d'uranium naturel, ce qui réduit considérablement la quantité de déchets radioactifs de haute activité.

« Lorsque l'on utilise des réacteurs à neutrons rapides dans un cycle fermé du combustible nucléaire, il est possible de recycler plusieurs fois un kilogramme de déchets nucléaires jusqu'à ce que tout l'uranium soit utilisé et que les actinides – qui restent radioactifs pendant des milliers d'années – soient consommés. Il subsiste alors une trentaine de grammes de déchets qui resteront radioactifs pendant 200 à 300 ans », explique Mikhail Chudakov, Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de l'énergie nucléaire.

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 ont fini par devenir la norme. Cela étant, plusieurs pays ont entrepris de faire progresser la technologie des réacteurs à neutrons rapides, notamment sous la forme de petits réacteurs modulaires (PRM) et de microréacteurs.

Cinq réacteurs à neutrons rapides sont actuellement en exploitation : deux réacteurs opérationnels (le BN 600 et le BN 800) et un réacteur d'essai (le BOR 60) en Fédération de Russie, le surgénérateur à neutrons rapides d'essai en Inde et le réacteur à neutrons rapides expérimental en Chine. Des projets de réacteurs à neutrons rapides, dont des PRM et des microréacteurs, adaptés à divers objectifs et fonctions sont en cours aux États-Unis d'Amérique, au Japon, au Royaume-Uni, dans l'Union européenne ainsi que dans d'autres pays.

Certains pays considèrent que l'exploitation de réacteurs à neutrons rapides dans un cycle de combustible entièrement fermé est la voie à suivre pour assurer la viabilité à long terme de l'énergie d'origine nucléaire.

Le Complexe énergétique de démonstration pilote de la Russie, en cours de construction à Seversk, comprend un réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb, le BREST OD 300, une usine de fabrication et de refabrication de combustible et une usine de retraitement du combustible usé mixte à base de nitrure d'uranium et de plutonium. Un dépôt géologique profond sera également construit. L'importance de ce projet pilote réside non seulement dans le fait de faire la démonstration de la fabrication de nouveaux combustibles, de leur irradiation et de leur recyclage, mais aussi dans le fait de réaliser tout cela sur un seul et même site.

« Le fait que l'ensemble du processus du cycle fermé du combustible se déroule sur un seul site est avantageux pour la sûreté, la sécurité et les garanties nucléaires », note Amparo Gonzalez Espartero, responsable technique du cycle du combustible nucléaire à l'AIEA. « Cela devrait également être plus intéressant d'un point de vue économique, car les déchets et les matières nucléaires n'ont pas besoin d'être déplacés d'un endroit à un autre – comme c'est le cas actuellement dans certains pays –, ce qui réduit les problèmes de transport et de logistique au minimum », ajoute-t-il.

Pour l'exploitation d'un cycle fermé du combustible à quelque échelle que ce soit, il faut des réacteurs à neutrons rapides et des infrastructures de retraitement et de recyclage. Pour des questions économiques et liées aux garanties notamment, il est difficile d'installer des usines de retraitement dans chaque pays. Pour limiter les coûts, les installations de retraitement fournissent des services à d'autres pays, ou les pays partagent leurs installations.

La Russie projette aussi d'installer après 2035 un réacteur à neutrons rapides nouvelle génération de 1 200 MWe dans le cadre d'un système autonome comprenant également des réacteurs à eau ordinaire. Grâce au 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 cycle de combustible nucléaire ordinaire.

Des projets vont bon train dans d'autres pays. La Chine construit deux réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (CFR 600) dans le comté de Xiapu, dans la province de Fujian. La première tranche est en cours de mise en service et devrait être raccordée au réseau en 2024. Aux États-Unis, un projet de réacteur à neutrons rapides soutenu par Bill Gates, cofondateur de Microsoft, est en cours de développement. Bien que ce pays redouble d'efforts pour travailler sur des cycles fermés du combustible nucléaire et utiliser ses déchets nucléaires existants pour développer son propre approvisionnement en combustible, ce projet ne fonctionnera pas en cycle fermé du combustible. En Europe,



La centrale nucléaire de Beloyarsk (Fédération de Russie) abrite deux réacteurs à neutrons rapides.

(Photo : Rosenergoatom)

le projet belge MYRRHA vise à construire un système hybride refroidi au plomb bismuth d'ici 2036 et à tester sa capacité à décomposer les actinides mineurs dans le cadre d'un futur cycle du combustible entièrement fermé.

« Les pays cherchent de plus en plus à recycler des ressources telles que le combustible nucléaire utilisé pour alimenter leur économie en énergie propre », indique Vladimir Kriventsev, chef d'équipe chargé du développement technologique des réacteurs à neutrons rapides à l'AIEA. « Le fait est que les innovations technologiques dans les domaines de la science des matériaux, de la physique des réacteurs et de l'ingénierie ont conduit à de meilleures conceptions, avec des caractéristiques de sûreté renforcées et des coûts de construction et d'exploitation réduits, ce qui améliore les

aspects économiques de l'exploitation d'une centrale nucléaire alimentée par un réacteur à neutrons rapides. »

L'AIEA joue un rôle central dans le soutien à la mise au point et au déploiement des réacteurs à neutrons rapides en partageant des informations et des données d'expérience grâce à des projets de recherche coordonnée, de publications techniques, de groupes de travail techniques et des conférences. Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants de l'AIEA contribue également à promouvoir des réacteurs à neutrons rapides et des cycles du combustible nucléaire connexes en aidant les pays à planifier et à collaborer.

Le potentiel à long terme du thorium pour la production d'énergie nucléaire

Par Artem Vlasov

Les sables de l'Inde regorgent de ressources qui pourraient assurer au pays un avenir sans carbone. L'Inde abrite les plus grandes réserves de thorium au monde. Sa stratégie électronucléaire à long terme vise l'exploitation de ce métal argenté, peu radioactif, considéré comme plus propre et plus efficace que les combustibles nucléaires conventionnels.

« Depuis le début du programme électronucléaire de l'Inde, la recherche développement s'est principalement portée sur le thorium », déclare Anil Kakodkar, chancelier de l'Institut national Homi Bhabha de Mumbai (Inde). L'Inde a conçu et développe un réacteur alimenté au thorium – le réacteur avancé à eau lourde – qui, selon M. Kakodkar, servira non seulement de dispositif de démonstration pour le cycle du combustible au thorium, mais aussi pour le dispositif de sûreté passive.

L'Inde n'est pas la seule à vouloir profiter des propriétés uniques du thorium. En juin 2023, la Chine a délivré un permis d'exploitation pour un réacteur nucléaire expérimental au thorium à sels fondus. Construit au milieu du désert de Gobi, dans le nord du pays, le réacteur sera soumis à des essais dans les prochaines années. La recherche sur les éventuelles utilisations du thorium dans l'électronucléaire a également suscité un intérêt aux États-Unis d'Amérique, au Japon, au Royaume-Uni et dans d'autres pays.

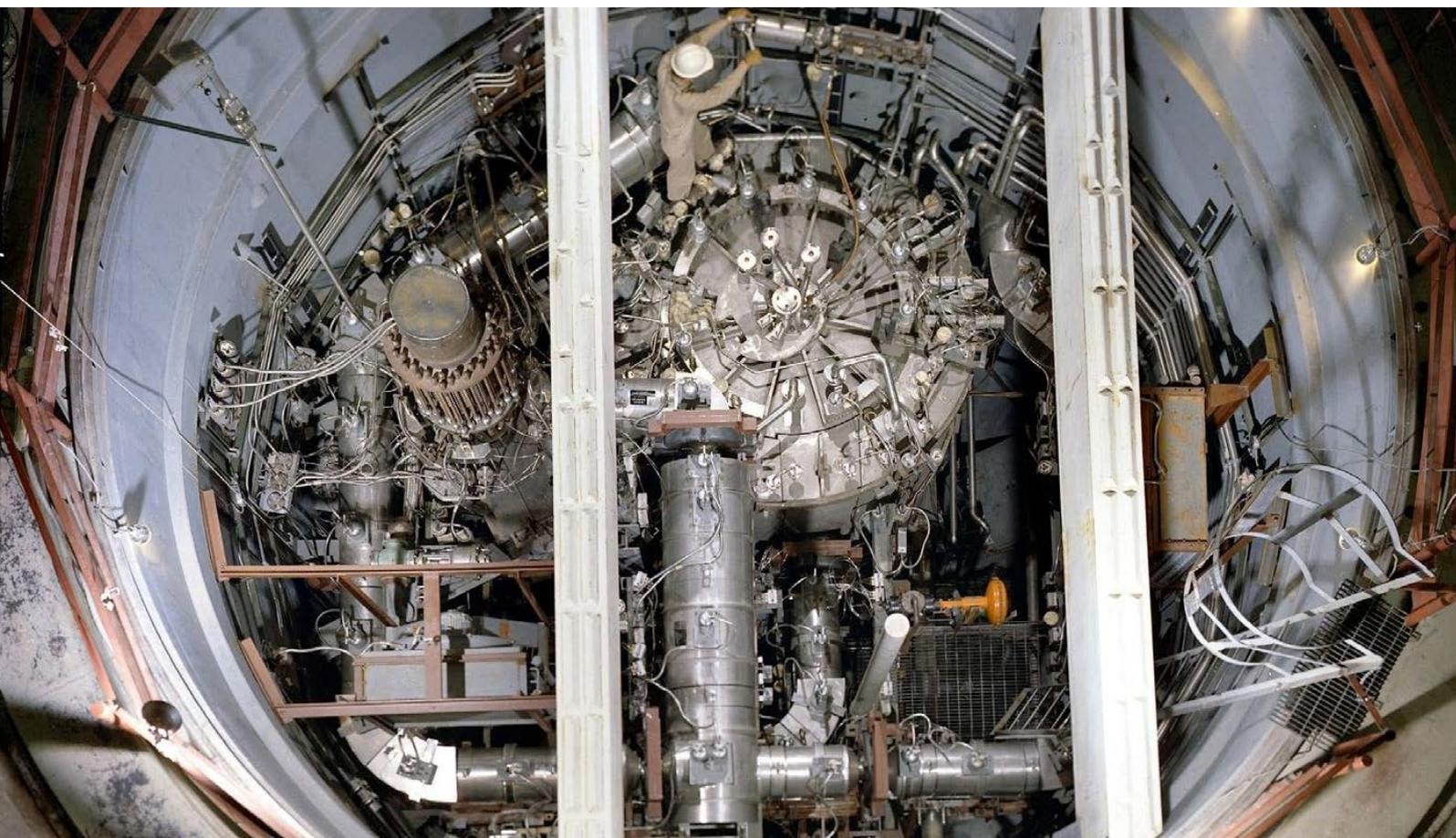
Défis à relever pour produire de l'énergie à partir du thorium

Le thorium, que l'on trouve généralement dans les roches ignées et les sables à métaux lourds, tire son nom de « Thor », dieu du tonnerre dans la mythologie nordique. Bien que trois fois plus abondant dans la nature que l'uranium, le thorium est peu utilisé dans l'industrie ou la production d'électricité, notamment parce qu'il n'est pas lui-même un combustible nucléaire, mais un élément permettant de créer un tel combustible. Le thorium 232, unique isotope naturel du thorium, est considéré comme « fertile » pour la fission, c'est à dire qu'il a besoin d'un catalyseur, comme l'uranium ou le plutonium, pour déclencher et maintenir une réaction en chaîne. Lorsqu'il est irradié, le thorium 232 est soumis à plusieurs réactions nucléaires et finit par produire de l'uranium 233, qui peut libérer de l'énergie par réaction de fission pour alimenter un réacteur nucléaire.

L'utilisation du thorium pour la production énergétique n'est toutefois pas sans difficultés. Plusieurs obstacles économiques et techniques rendent difficile l'exploitation du thorium. Bien qu'abondant, le thorium présente actuellement un coût d'extraction élevé. « La monazite est l'une des principales sources de terres rares, mais également de thorium », explique Mark Mihalasky, spécialiste des ressources en uranium à l'AIEA. « Si l'on n'avait pas actuellement besoin de terres rares, la monazite ne serait pas exploitée pour sa seule teneur en thorium. Le thorium est un sous produit et son extraction est plus coûteuse que celle de l'uranium. Mais la donne pourrait changer si la demande en thorium et son utilisation dans l'électronucléaire venaient à augmenter. »

La recherche développement et les essais concernant les installations nucléaires alimentées au thorium sont tout aussi onéreux, tant en raison du manque d'expérience concernant cet élément que du fait que l'uranium a toujours prévalu dans la filière électronucléaire. « La manipulation du thorium après irradiation s'avère complexe, ce qui ajoute une autre difficulté », indique Anzhelika Khaperskaia, responsable technique chargée de l'ingénierie du combustible et des installations du cycle du combustible à l'AIEA. « Le combustible au thorium rend nécessaires des processus de fabrication de combustible à distance qui sont plus coûteux que ceux liés au combustible à l'uranium, en raison de la présence dans le thorium de produits de filiation qui sont de puissants émetteurs gamma. En outre, le retraitement du combustible au thorium usé est complexe. La dissolution du dioxyde de thorium et la manipulation des produits gazeux posent des difficultés et nécessitent des développements à l'échelle industrielle. Du fait de l'utilisation de fluorures pour la dissolution, le matériel de retraitement est également exposé à la corrosion. »

Un projet de recherche coordonné de l'AIEA, d'une durée de quatre ans, s'est concentré sur les possibilités de produire de l'énergie nucléaire à partir du thorium en examinant les avantages et les défis liés à ce combustible et en analysant son utilisation dans différents types de réacteurs – des réacteurs refroidis par eau, les plus courants, aux réacteurs à sels fondus. Les résultats de ce projet ont été publiés récemment dans un rapport intitulé *Near Term and Promising Long Term Options for the Deployment of Thorium Based Nuclear Energy* (IAEA TECDOC 2009).



Vue plongeante sur un réacteur nucléaire expérimental alimenté au thorium dans les années 1960.

(Photo : Laboratoire national d’Oak Ridge, Département de l’énergie des États-Unis d’Amérique)

Quels sont les avantages du thorium ?

Le thorium présente plusieurs avantages par rapport au combustible nucléaire classique, l’uranium 235. Il peut générer plus de matière fissile (uranium 233) qu’il n’en consomme pour alimenter les réacteurs nucléaires refroidis par eau ou à sels fondus et il génère moins d’actinides mineurs à longue période que les combustibles au plutonium. On estime que la couche supérieure de la croûte terrestre compte en moyenne 10,5 parties par million (ppm) de thorium contre environ 3 ppm d’uranium.

« Du fait de son abondance et de sa capacité à produire des matières fissiles, le thorium pourrait offrir une

solution à long terme pour répondre aux besoins énergétiques de l’humanité », explique Kailash Agarwal, spécialiste des installations du cycle du combustible à l’AIEA et l’un des auteurs du rapport de l’AIEA.

Outre le fait que lorsqu’ils sont en service, les réacteurs alimentés au thorium – et l’énergie d’origine nucléaire en général – n’émettent pas de gaz à effet de serre, l’un des autres avantages que présentent ces réacteurs est qu’ils génèrent moins de déchets nucléaires à longue période que les réacteurs actuels alimentés à l’uranium.

Réglementer les modèles de réacteurs innovants

Par Nayana Jayarajan et Volha Piotukh

Les réglementations qui régissent actuellement l'industrie nucléaire ont été conçues pour les types de réacteurs utilisés depuis la mise en service des premières centrales nucléaires commerciales dans les années 1960. Elles ont évolué à la lumière de l'expérience acquise au cours des six dernières décennies. À mesure que de nouveaux réacteurs nucléaires avancés, y compris les petits réacteurs modulaires (PRM), sont mis au point, les organismes de réglementation s'efforcent de veiller à ce que leurs processus, leurs réglementations et leurs orientations intègrent également des innovations afin que des technologies inédites puissent être déployées en toute sûreté et en toute sécurité.

Pour Brian Smith, directeur de la Division des octrois et renouvellements d'autorisations de la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis d'Amérique et Président du Forum des responsables de la réglementation des petits réacteurs modulaires de l'AIEA, l'élaboration de réglementations et d'orientations technologiquement neutres est une priorité. « Aux États-Unis, les seuls modèles que nous avons connus pendant plus de 50 ans sont ceux des grands réacteurs à eau ordinaire. C'est donc sur eux que se fondent nos réglementations », explique-t-il. Il ajoute : « Si certains PRM utilisent aussi de l'eau ordinaire à des fins de refroidissement, d'autres sont totalement différents. Nous devons créer presque de toutes pièces un nouveau cadre pour ces réacteurs, un cadre technologiquement neutre, qui tienne compte des risques et qui soit fondé sur les résultats. »

Pour relever les défis liés à la réglementation de ces technologies innovantes, les organismes de réglementation eux-mêmes envisagent différentes stratégies, telles que l'examen de l'applicabilité des réglementations existantes, le recrutement prioritaire de personnel technique aux spécialisations diverses et l'apprentissage fondé sur l'expérience des demandeurs et d'autres organismes de réglementation.

« Certains de ces nouveaux modèles n'utilisent pas les mêmes matériaux dans le réacteur, et utilisent par exemple du graphite. D'autres atteignent aussi de plus fortes températures que celles atteintes par le parc existant (de réacteurs à eau ordinaire). Il faut prendre tout cela en compte », indique M. Smith. « Se doter d'un personnel technique adapté a également été un défi, non seulement pour nous, mais pour tous les organismes de réglementation. Pour ces nouveaux modèles, il faut pouvoir compter sur des experts techniques qui connaissent bien

les diverses nouvelles technologies, afin d'être en mesure d'évaluer les aspects de sûreté du réacteur lui-même. »

Une autre stratégie fructueuse a consisté à encourager des discussions préalables à la demande, également connues sous le nom d'examen du modèle proposé par le vendeur ou d'examen préalable à l'autorisation. L'idée ici est de permettre à l'organisme de vérifier que sa réglementation peut s'appliquer aux spécifications techniques des modèles innovants, et de permettre aux demandeurs de se faire une idée plus précise des prescriptions réglementaires, avant le début de la procédure officielle d'autorisation. Le Forum des responsables de la réglementation des PRM recommande aux organismes de réglementation et vendeurs de réacteurs de profiter de leurs échanges en amont de l'octroi de l'autorisation pour anticiper ou repérer les aspects qui exigeront de plus hauts niveaux d'intervention réglementaire et pourraient donc contraindre le titulaire de licence à interrompre ou retarder ses activités.

L'harmonisation par la collaboration

Les coûts d'investissement initiaux moins élevés, les besoins moindres en ressources et le potentiel d'applications non électriques des PRM renforcent leur attractivité aux yeux des pays qui se lancent dans des programmes électronucléaires ou qui envisagent de le faire. Par exemple, Khaled Tukan, Président de la Commission jordanienne de l'énergie atomique, explique que la Jordanie envisage de recourir aux PRM en partie parce qu'il s'est avéré difficile de trouver des ressources en eau suffisantes pour refroidir une centrale nucléaire conventionnelle dans ce pays aride et enclavé.

Pour ces pays, la collaboration internationale et la possibilité d'apprendre d'autres organismes de réglementation expérimentés sont essentielles pour garantir un programme électronucléaire sûr et sécurisé. Le Forum des responsables de la réglementation des petits réacteurs modulaires, créé en 2015, est un groupe international d'organismes de réglementation qui cherche et propose des solutions aux problèmes de sûreté communs susceptibles d'entraver les examens réglementaires des PRM.

Pour M. Smith, le Forum constitue une plateforme importante pour l'échange de connaissances et de données d'expérience sur la réglementation des PRM. Le Forum organise des ateliers régionaux et arrête des positions communes sur des sujets clés, que « nous pouvons ramener

dans nos pays respectifs pour voir comment nous pourrions changer ou modifier nos propres orientations ».

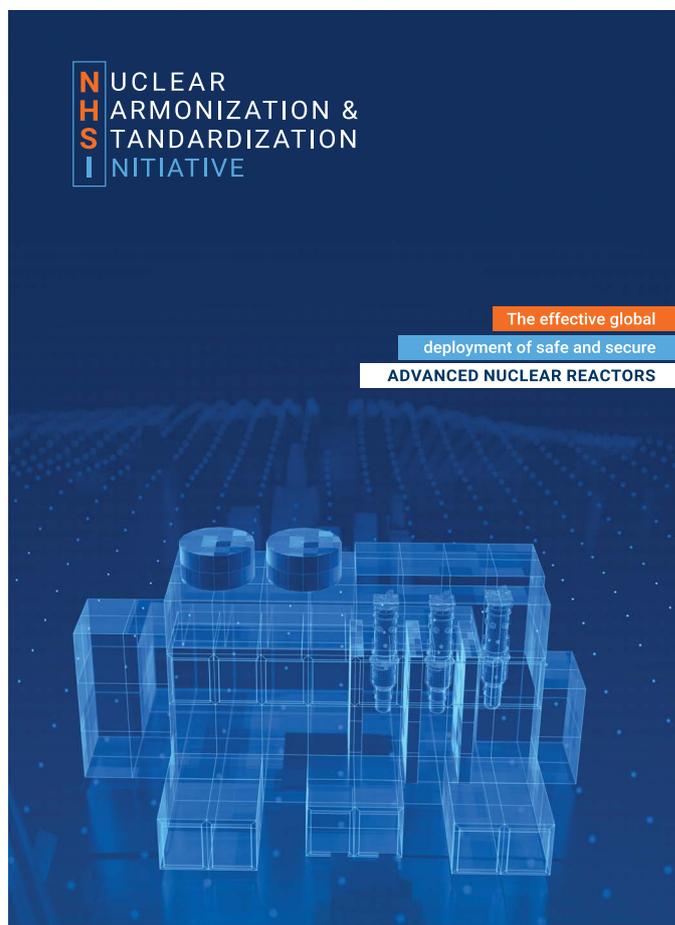
Alors que plus de 80 modèles de PRM sont en cours de développement dans le monde, l'AIEA s'emploie à définir des stratégies industrielles communes et à harmoniser les stratégies réglementaires via l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI), pour favoriser le déploiement mondial efficace de réacteurs nucléaires avancés sûrs et sécurisés.

Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, a rappelé l'importance de cette initiative de l'AIEA lors de la séance plénière de la NHSI en juin 2023. « L'harmonisation des stratégies facilite le commerce international des PRM et des composants, car on conçoit et fabrique les réacteurs en suivant un ensemble de normes internationales plus uniformes, au lieu de devoir se conformer à de multiples prescriptions, parfois contradictoires, dans différents pays », a-t-il indiqué.

Le Directeur général a ajouté que l'AIEA, forte de ses décennies d'expérience en tant que pilier central pour les questions liées à sûreté et à la réglementation, se trouvait dans une position idéale pour favoriser la coopération internationale en matière de cadres réglementaires nationaux. « Une plus grande harmonisation des approches réglementaires permettra une meilleure collaboration internationale et donnera aux pays les moyens d'appliquer des normes élevées en matière de sûreté et de sécurité », a-t-il estimé. La NHSI, lancée en juin 2022, s'articule autour de deux volets distincts mais complémentaires : le volet réglementaire et le volet industriel. Le Forum des responsables de la réglementation des PRM appuie le volet réglementaire et élabore des processus pour tirer parti des examens d'autorisation d'autres organismes de réglementation et mener des examens conjoints.

Le volet réglementaire de la NHSI comprend également un groupe de travail sur l'élaboration d'un cadre pour le partage d'informations entre les organismes de réglementation, et un autre axé sur un examen multinational préalable à l'autorisation. Dans le cadre d'un tel examen, les organismes de réglementation travailleraient ensemble pour recenser les problèmes que comporterait un nouveau modèle de réacteur, avant l'examen national d'autorisation.

L'information et la participation du public sont des pierres angulaires du développement de l'électronucléaire. L'information du public sur la sûreté des modèles de réacteurs innovants, tels que les PRM, et l'engagement des



L'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires, lancée en juin 2022, vise à harmoniser les approches réglementaires et à définir des approches industrielles communes.

parties prenantes en faveur de cette sûreté seront essentiels au déploiement réussi de ces réacteurs. « Étant donné que ces réacteurs pourront être situés beaucoup plus près de la population, l'une des priorités pour les organismes de réglementation est de dialoguer avec la population et de l'écouter, en particulier dans les pays primo-accédants, où il s'agira du premier réacteur », précise M. Smith. « Les organismes de réglementation s'attachent donc à instaurer une solide culture d'ouverture, de professionnalisme et de sûreté, et à souligner leur indépendance, leur transparence et leur rôle en tant que source crédible d'informations rapides, fiables et facilement accessibles. »

Vérification du combustible nucléaire utilisé dans les dépôts géologiques profonds

Par Eva Morela Lam Redondo

Alors que dans le monde entier, on cherche des alternatives aux combustibles fossiles pour lutter contre le changement climatique, plusieurs pays élaborent des programmes électronucléaires capables de leur fournir une source d'énergie durable à faible émission de carbone. Il incombe aux pays qui exploitent des réacteurs nucléaires de mettre en place une capacité de stockage géologique pour les déchets radioactifs de haute activité. L'approche bien établie au niveau international pour ce type de stockage définitif est celle des mines de dépôt géologique profond. Les pays qui ont les programmes de dépôt géologique profond les plus avancés sont le Canada, la Finlande, la France, la Suède et la Suisse.

Parmi les nouvelles installations en cours de mise en place, citons l'exemple de l'usine d'encapsulation et du dépôt géologique profond en Finlande. Dans la première, le combustible utilisé sera scellé de manière sûre dans des conteneurs de stockage définitif, tandis que dans le second, les conteneurs seront entreposés de manière permanente et sûre. Ces deux installations doivent respecter les obligations juridiques internationales de la Finlande pour permettre à l'AIEA d'effectuer sa vérification de l'utilisation pacifique des matières nucléaires.

L'AIEA s'acquitte de sa mission de vérification nucléaire en mettant en œuvre une série de mesures techniques – les garanties – pour surveiller les installations, les matières et les activités nucléaires. Ces mesures permettent à l'AIEA de vérifier de manière indépendante que les États s'acquittent de leur responsabilité juridique de n'utiliser les matières nucléaires qu'à des fins pacifiques. Les États acceptent ces mesures en concluant des accords de garanties avec l'AIEA. Par conséquent, en appliquant des garanties, l'AIEA peut donner au monde entier des assurances crédibles que les États respectent leurs engagements en matière de non prolifération nucléaire.

« La collaboration de la Finlande avec l'AIEA témoigne de son ferme engagement à remplir ses obligations internationales en matière de non prolifération grâce à des garanties efficaces », déclare Marko Hämäläinen, chef de la Section des garanties sur les matières nucléaires de l'Autorité de sûreté radiologique et nucléaire (STUK) en Finlande.

L'usine d'encapsulation et le dépôt géologique profond présentent aussi bien des défis à relever que des occasions à saisir pour l'application des garanties. Des solutions innovantes sont en cours d'élaboration pour que les inspecteurs des garanties de l'AIEA puissent vérifier les stocks de matières nucléaires entreposées. L'un des défis à relever concerne l'accès au dépôt géologique profond qui se trouve

à près de 500 mètres de profondeur et dont l'exploitation est prévue pour durer une centaine d'années. Lorsqu'ils seront mis en service, l'usine d'encapsulation et le dépôt géologique profond seront les premières installations de ce type dans le monde à être sous le régime d'un accord de garanties généralisées avec l'AIEA. Les inspecteurs de l'AIEA doivent donc concevoir des méthodes de contrôle nouvelles et durables pour vérifier, dès maintenant mais aussi dans un avenir lointain, les matières nucléaires difficiles d'accès.

« En tant qu'inspecteurs des garanties, nous devons être en mesure de vérifier le combustible nucléaire utilisé avant qu'il ne soit transféré vers les installations de l'usine d'encapsulation et du dépôt géologique profond. Ensuite, nous appliquerons des mesures de contrôle afin de confirmer que le combustible utilisé n'est pas détourné ou substitué, et que les installations ne sont pas utilisées à des fins non déclarées », indique Courtney Ames, inspectrice des garanties nucléaires à l'AIEA. « Les installations de l'usine d'encapsulation et du dépôt géologique profond présentent un défi à relever pour les inspecteurs des garanties de l'AIEA en termes de maintien de la continuité des connaissances pendant et après le transfert du combustible utilisé, en particulier compte tenu de l'accès physique limité au dépôt géologique. En utilisant des techniques inédites, en travaillant en équipe et en procédant à des analyses minutieuses, nous pourrions atteindre nos objectifs en matière de garanties. »

La collaboration entre l'AIEA, la Commission européenne et la STUK est essentielle pour mettre au point des mesures et des techniques de contrôle, notamment grâce à l'élaboration et aux essais de technologies de vérification du combustible nucléaire utilisé avant son stockage définitif.

En 2012, l'AIEA a lancé le projet d'usine d'encapsulation et de dépôt géologique spécifiquement pour répondre aux défis posés par ces nouveaux types d'installations en matière d'application des garanties. En étroite collaboration avec les contreparties, elle a adopté pour ce projet une approche globale axée sur les principes de l'intégration des garanties dans la conception, ce qui permet de réduire au minimum les répercussions sur l'exploitation du dépôt géologique profond. L'intégration des garanties dans la conception consiste à prendre en compte des considérations relatives aux garanties dès les phases de planification et de conception d'une installation, et à poursuivre cette intégration tout au long de la construction, de l'exploitation et du déclassement de l'installation. Dans le cas de la Finlande, l'intégration des garanties dans la conception permet aux inspecteurs de l'AIEA et d'Euratom, ainsi qu'à l'autorité nationale (STUK), de s'acquitter efficacement de leurs fonctions sans perturber le fonctionnement de l'usine d'encapsulation et du dépôt géologique profond.



Entrée d'ONKALO, le dépôt géologique profond de la Finlande pour le combustible nucléaire usé.

(Photo : Posiva Oy)

« Dans le cadre du projet d'usine d'encapsulation et de dépôt géologique, nous avons mis en place l'intégration des garanties dans la conception. Cette approche prévoyante réduit la nécessité de procéder à des mises en conformité et permet à l'exploitant, à la STUK, à l'AIEA et à la Commission européenne d'économiser de précieuses ressources », déclare M. Hämäläinen.

D'autres concepts et mesures récemment mis au point, notamment des systèmes de télésurveillance, sont en cours d'installation. En utilisant des systèmes de télésurveillance pour observer l'emplacement des matières nucléaires, l'AIEA peut réduire le nombre d'inspections sur le terrain et, par conséquent, les émissions de carbone liées aux déplacements pour se rendre aux installations et en revenir. Des techniques comme la surveillance sismique et les enveloppes de confinement à laser pourraient également contribuer à réduire le nombre d'inspections. La surveillance sismique permet de détecter toute pénétration non déclarée dans la roche aux alentours du dépôt géologique profond, tandis que les enveloppes de confinement à laser analysent le profil

de soudage du couvercle du conteneur pour enregistrer sa « signature » naturelle unique qui, en cas de modification, indiquerait que le conteneur a été ouvert.

D'ici à 2025, en Finlande, l'usine d'encapsulation et le dépôt géologique profond seront pleinement opérationnels et prêts à accueillir du combustible nucléaire usé. Grâce à la collaboration et à l'innovation, l'AIEA, la Commission européenne et la STUK appliquent ensemble, de manière efficace et efficiente, des garanties qui permettent d'atteindre les objectifs de vérification de l'AIEA, tout limitant autant que possible les incidences sur l'exploitation des installations. Avec l'intégration des garanties dans la conception, les installations de l'usine d'encapsulation et du dépôt géologique profond offriront une solution pour le traitement et le stockage définitif du combustible nucléaire usé, et contribueront à la transition vers une énergie d'origine nucléaire à faible émission de carbone et faciliteront la vérification par l'AIEA des matières et des technologies nucléaires.

Façonner les perceptions de l'énergie nucléaire

Par Irena Chatzis

Les préoccupations liées au changement climatique et à la sécurité énergétique ainsi qu'à la justice énergétique et au développement durable ont fait évoluer les perceptions du public concernant l'énergie nucléaire. Dans le même temps, les défenseurs de l'énergie d'origine nucléaire trouvent des moyens innovants et attrayants de mettre en avant les avantages de cette source d'énergie propre. Parmi ces défenseurs figure Isabelle Boemeke, influenceuse pro-énergie nucléaire et mannequin.

Connue sous le nom d'Isodope sur les médias sociaux, M^{me} Boemeke se dit convaincue que l'énergie d'origine nucléaire est vitale pour bâtir un avenir dans lequel l'humanité ne se contentera pas de survivre, mais pour prospérer. Dans l'entretien reproduit ci-après, M^{me} Boemeke explique comment elle utilise son personnage en ligne pour informer les jeunes générations sur l'énergie d'origine nucléaire.

Comment en êtes-vous venue à vous intéresser à l'énergie nucléaire ?

En 2015, un scientifique que je suis sur les médias sociaux a publié un tweet sur les réacteurs au thorium à sels fondus. J'ai fait quelques recherches, mais je n'ai pas trouvé d'informations que quelqu'un comme moi, qui n'a pas de formation technique, puisse comprendre. Cela a éveillé ma curiosité concernant l'énergie d'origine nucléaire et j'ai demandé aux gens ce qu'ils en pensaient. En gros, les réponses peuvent se résumer ainsi : en fait, c'est une bonne technologie. Nous en avons absolument besoin pour résoudre le problème du changement climatique, mais les gens ne veulent pas en entendre parler.

Avec les incendies de 2019 en Australie, en Amazonie et en Californie, j'ai réalisé que nous n'allions pas assez vite dans la lutte contre le changement climatique et j'ai commencé à chercher des solutions, et c'est là que je suis retombée sur l'énergie d'origine nucléaire. J'ai été frappée par le fait que tout ce que les gens pensaient savoir sur l'énergie d'origine nucléaire était faux, et la raison expliquant cela était qu'ils tiraient leurs informations principalement de références culturelles, de films et de dessins animés, comme Les Simpson. Je me suis demandé comment on pourrait faire savoir aux gens que l'énergie d'origine nucléaire est la deuxième source d'énergie propre au monde et que les pays qui ont décarboné leur électricité l'ont fait principalement grâce à l'énergie hydroélectrique ou à l'énergie d'origine nucléaire.

C'est ainsi qu'est née Isodope ?

Nous vivons dans un monde façonné par les médias sociaux et truffé d'influenceurs. J'ai compris que le meilleur moyen de faire passer le message sur le nucléaire était de créer du contenu qui interpelle et parle aux gens sur les médias sociaux. Je savais que mon contenu devait être très différent, car je ne voulais pas créer une vidéo parmi tant d'autres. J'ai imaginé un personnage qui s'habille de manière futuriste,

utilise un langage accessible et des visuels colorés. Je l'appelle « Isodope », un jeu de mots sur le terme « isotope » utilisé en chimie.

Quel est votre public principal ?

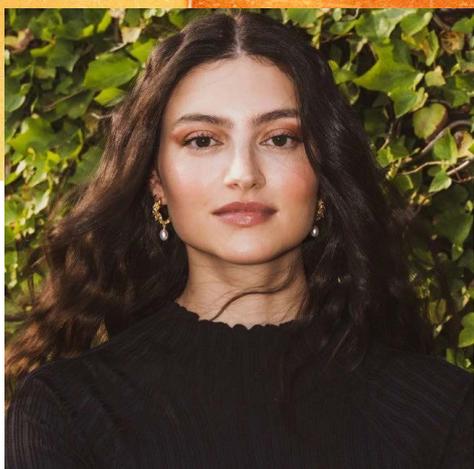
Je m'adresse surtout aux millennials (les personnes nées dans les années 1980 et 1990) et aux plus jeunes. Les moyens de subsistance des jeunes sont en jeu. C'est nous, et nos enfants, qui subirons les pires effets du changement climatique.

Comment faites-vous pour toucher un public plus large, au-delà de la communauté pro-nucléaire ?

Les médias sociaux sont très utiles à cet égard. Non seulement vous pouvez créer du contenu, et c'est ce que je fais, mais vous pouvez aussi dialoguer avec les gens par l'intermédiaire de ce contenu. Vous pouvez répondre à ceux qui ont des questions et qui sont curieux.

Toutes les occasions sont bonnes pour aborder le sujet de l'énergie d'origine nucléaire. Lorsque je vais chez le médecin, par exemple, et que quelqu'un m'interroge sur mon travail, je dis que je travaille dans le domaine de l'énergie nucléaire, et cela débouche toujours sur une conversation intéressante. Il est également très important de dialoguer avec les populations locales vivant autour des centrales nucléaires. Parce que leurs communautés bénéficient grandement de cette installation, ces personnes sont les meilleurs défenseurs du nucléaire.

Un autre sujet qui devrait être expliqué en détail est celui des déchets radioactifs, car c'est l'un des principaux problèmes soulevés par les gens. Quiconque a vu des déchets nucléaires peut vous dire qu'il s'agit de la chose la plus inintéressante du monde : ce sont juste des fûts en béton, simplement posés là. Il serait vraiment utile de continuer à montrer aux gens à quoi ressemblent les déchets nucléaires et de faire passer le message qu'ils sont gérés de façon sûre et, honnêtement, qu'il s'agit d'une chose bien plus banale qu'on ne le pense.



Quelle a été votre plus grande réussite dans votre carrière d'influenceuse dans le domaine de l'énergie nucléaire ?

Le sauvetage de la centrale nucléaire de Diablo Canyon en Californie de la fermeture en 2022 est ma grande fierté, et ce pour de nombreuses raisons. Lorsque j'ai commencé à travailler comme influenceuse dans le domaine de l'énergie nucléaire, j'ai fait des recherches sur les centrales qu'il était prévu de fermer de façon prématurée aux États-Unis d'Amérique. Il y en avait cinq à l'époque, et Diablo Canyon se distinguait, non seulement parce que c'était une belle installation et qu'elle pouvait continuer à fonctionner pendant encore 20 ans, mais aussi parce qu'elle était le symbole du mouvement anti-nucléaire aux États-Unis d'Amérique. Lors de la construction de Diablo Canyon à la fin des années 1960 et dans les années 1970, de nombreuses manifestations ont été organisées, dont un rassemblement auquel ont participé quelque 30 000 personnes.

Sauver cette centrale c'était envoyer un message au public et aux responsables politiques : le vent a tourné, les gens sont désormais favorables à l'énergie d'origine nucléaire. J'ai

pensé que c'était une bonne cause et j'ai collaboré avec un grand nombre d'organisations diverses aux États-Unis. Nous avons organisé le plus grand rassemblement pro-nucléaire qu'ait connu le pays. J'ai également créé une organisation à but non lucratif appelée Save Clean Energy, et j'ai écrit au Gouverneur de Californie une lettre signée par 80 experts et entrepreneurs de premier plan dans le domaine de l'énergie et du climat, pour l'exhorter à maintenir ouverte la centrale de Diablo Canyon. Grâce à ces actions, la centrale restera ouverte pendant au moins cinq ans après 2025, l'année initialement prévue pour sa fermeture.

Quels sont vos projets et plans récents pour Isotope ?

J'écris actuellement un livre, intitulé Rad Future, sur l'énergie d'origine nucléaire ; il est rédigé dans un style proche de celui d'Isotope, facile à comprendre. En ce qui concerne les activités bénévoles, je me concentre sur la transition charbon-nucléaire, car je pense que c'est probablement notre meilleure chance d'accélérer le déploiement de l'énergie d'origine nucléaire, du moins aux États-Unis d'Amérique.

Enfin, je pense que l'industrie de la mode peut nous permettre de toucher un public totalement différent. J'ai rédigé des éditoriaux et réalisé des interviews sur l'énergie d'origine nucléaire dans le secteur de la mode, et je continuerai à le faire. Beaucoup de collaborations intéressantes peuvent se nouer dans ce secteur à l'avenir.

OSART : 40 ans au service de l'amélioration de la sûreté des centrales nucléaires dans le monde



Des membres de l'équipe OSART réalisant le 200^e examen OSART à Almaraz (Espagne) en 2018. (Photo : M. Klingenboeck/AIEA)

L'AIEA célèbre le 40^e anniversaire de l'Équipe d'examen de la sûreté d'exploitation (OSART), l'un des plus importants services d'examen de la sûreté par des pairs proposés par l'AIEA à ses États Membres. Le programme OSART vise à aider les pays à renforcer la sûreté de leurs centrales nucléaires durant les phases de mise en service et d'exploitation en comparant leurs pratiques aux normes de sûreté de l'AIEA. Depuis la première mission, menée à la centrale nucléaire de Kori (République de Corée) en août 1983, l'AIEA a effectué 218 missions OSART dans 37 pays, auxquels elle a fourni des évaluations objectives et indépendantes de la performance en matière de sûreté d'exploitation.

« Grâce à ces missions, des milliers d'experts ont contribué à l'amélioration constante de la sûreté des centrales nucléaires du monde entier », déclare Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA.

Les missions OSART visent à aider les exploitants nucléaires à renforcer la sûreté d'exploitation de leurs centrales en indiquant les domaines qui devraient être améliorés et en recommandant des moyens d'y parvenir.

Lors d'une mission OSART, des experts des États Membres et de l'AIEA évaluent la performance en matière de sûreté de l'installation nucléaire à l'aune des normes de sûreté de l'AIEA, les normes internationalement reconnues de sûreté nucléaire, et formulent des recommandations et des suggestions spécifiques pour améliorer la sûreté. Au cours de la mission, l'application de ces normes est évaluée dans de nombreux domaines comme la direction de la centrale, la formation et les qualifications du personnel, l'exploitation et la culture de sûreté.

Les missions OSART aux centrales nucléaires en exploitation peuvent se dérouler à tout moment après le début de l'exploitation commerciale de ces dernières. La visite de suivi a généralement lieu environ 18 mois après la mission principale. Les missions pré-OSART ont lieu pendant la phase de mise en service d'une centrale nucléaire, en général quelques mois avant le chargement du premier lot de combustible nucléaire dans le réacteur nucléaire. En complément de ces missions, des missions OSART entrepreneuriales sont également effectuées afin d'examiner les fonctions centralisées de différents aspects liés à la sûreté d'exploitation du parc nucléaire,

telles que la gestion de l'entreprise, le contrôle de la performance en matière de sûreté et la supervision, les achats ou les ressources humaines.

Le programme OSART aujourd'hui

D'après les résultats d'une récente analyse, les exploitants d'installations nucléaires donnent rapidement suite aux conclusions des missions OSART et plus de 95 % des problèmes relevés sont résolus ou des progrès satisfaisants ont été accomplis au moment des missions de suivi.

Ces dernières années, le programme a mis davantage l'accent sur des domaines tels que la gestion des accidents et les interactions entre les personnes, la technologie et les organismes.

Le programme accorde également beaucoup d'importance à la culture de sûreté, à savoir la manière dont un organisme fixe les priorités en matière de sûreté et la valeur qu'il lui accorde. Le programme OSART s'efforce d'instiller une culture de sûreté qui encourage les organisations hôtes à identifier et à résoudre elles-mêmes les problèmes de sûreté à un stade précoce.

Promouvoir le partage d'informations, la transparence et la confiance

À ce jour, les missions OSART ont permis d'identifier 1 350 bonnes pratiques, qui peuvent également être consultées par le public sur le site web de l'AIEA. Les organismes exploitants se réfèrent fréquemment à ces bonnes pratiques et mettent en œuvre celles qui sont pertinentes.

Pour garantir la transparence, les lignes directrices OSART sont mises à la disposition du public, tout comme les normes de sûreté de l'AIEA sur lesquelles le service s'appuie.

« Les missions d'examen par des pairs de l'AIEA sont aujourd'hui plus importantes que jamais, car

elles jettent les bases de l'essor nécessaire de l'énergie nucléaire à la réalisation des objectifs climatiques

mondiaux », déclare le Directeur général Grossi.

– Par Nayana Jayarajan

L'AIEA met en avant son soutien aux objectifs de développement durable lors du forum politique de haut niveau pour le développement durable des Nations Unies

L'AIEA a participé au forum politique de haut niveau pour le développement durable des Nations Unies de 2023 qui s'est tenu au Siège de l'ONU, à New York, du 10 au 19 juillet, et souligné les contributions essentielles de la science et de la technologie nucléaires à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD).

« Nous sommes face à un avenir incertain, où convergent les crises de l'eau, de l'énergie et du climat. Nous devons rechercher ensemble des solutions viables pour répondre aux priorités des pays, accroître leur résilience et réduire les inégalités mondiales », déclare Hua Liu, Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de la coopération technique.

L'AIEA s'efforce d'aider les pays à atteindre leurs cibles des ODD et lors du forum politique de haut niveau de 2023, cinq ODD ont fait l'objet d'un examen, en particulier l'eau propre et l'assainissement (ODD 6) et l'énergie propre à un coût abordable (ODD 7). L'AIEA promeut l'utilisation de la science et de la technologie nucléaires pour créer une énergie propre, fiable et à un coût abordable ainsi que l'utilisation de techniques nucléaires telles que l'hydrologie isotopique pour améliorer la gestion des ressources en eau.

Cette année, nous nous trouvons à mi-chemin de la mise en œuvre des 17 ODD, des objectifs interdépendants à atteindre à l'horizon 2030 pour relever les défis auxquels le monde fait face. L'AIEA a organisé une exposition et une manifestation parallèle sur l'amélioration de l'accès à l'eau et à l'énergie propres au moyen de la coopération Sud-Sud et triangulaire.

La directrice du Bureau des Nations Unies pour la coopération Sud-Sud, Dima Al-Khatib, a souligné l'importance de cet axe de réflexion. « La coopération Sud-Sud et triangulaire est un moyen innovant de renforcer les capacités et d'atténuer les difficultés auxquelles les pays du Sud sont confrontés, qu'il s'agisse de la gestion de l'eau, de l'énergie, de la numérisation ou de la pauvreté. Elle est un mécanisme de collaboration inestimable qui a des effets à tous les niveaux », a-t-elle déclaré.

L'Ambassadeur d'Afrique du Sud, M. Xolisa Mabongo, a souligné l'importance de la coopération Sud-Sud dans la planification énergétique compte tenu du niveau élevé de compétences techniques nécessaires. Avec l'aide de l'AIEA, l'Afrique du Sud a organisé des sessions de l'École de gestion de l'énergie nucléaire pour aider les experts des pays africains à consolider leurs connaissances sur le cycle de vie de l'énergie nucléaire et leurs compétences en la matière.

« En nous associant à des partenaires de confiance, nous pouvons faire face à la crise climatique et à la crise de l'énergie en élargissant l'applicabilité de solutions qui ont fait leurs preuves et qui ont été rendues possibles par la science et la technologie », déclare Vivian Okeke, Représentante du Directeur général de l'AIEA auprès de l'Organisation des Nations Unies et directrice du Bureau de liaison de l'AIEA à New York.

D'après le Rapport sur les objectifs de développement durable 2023 : Édition spéciale, bien que l'accès à l'énergie propre se soit amélioré à l'échelle mondiale, 675 millions de

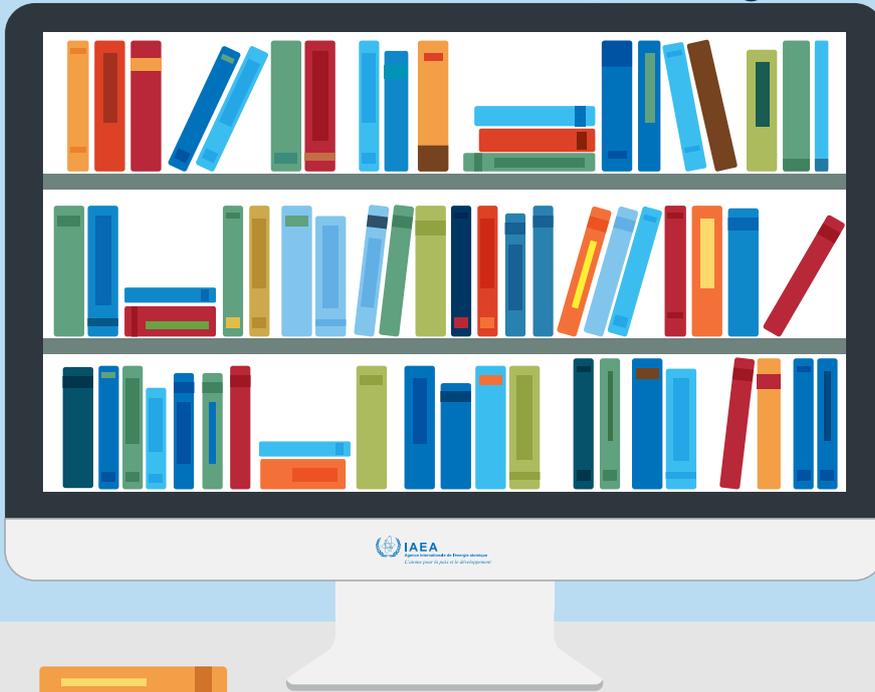
personnes restent privées d'accès à l'électricité et 2,3 milliards n'ont pas accès à des sources de combustible sûres pour cuisiner. L'AIEA aide les pays à atteindre les ODD au moyen de son programme de coopération technique.

S'exprimant lors d'une manifestation parallèle sur l'évaluation scientifique de l'eau organisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, Hua Liu, Directeur général adjoint de l'AIEA, a souligné qu'« en s'appuyant sur une évaluation scientifique, les scientifiques étaient en mesure de fournir aux décideurs politiques les informations nécessaires à la gestion, à la protection et à la préservation des ressources en eau ; [et que] rendre l'eau propre accessible à tous serait crucial pour le développement durable ».

Dans le monde, 2,2 milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'eau potable et 3,5 milliards ne disposent pas de services d'assainissement. Le changement climatique et les conflits ont aggravé les problèmes de pénurie d'eau dans certaines régions. Le Représentant permanent du Tadjikistan auprès de l'ONU, l'Ambassadeur Jonibek Hikmat, a expliqué que son pays faisait face actuellement à des problèmes de sécurité de l'eau, exacerbés par le changement climatique. Dans le cadre du programme de coopération technique, l'AIEA a fourni un appui sur mesure au Tadjikistan pour évaluer les ressources en eaux souterraines dans le bassin de la mer d'Aral, et un projet national sur les glaciers vient de débiter.

– Par Melissa Evans

Publications de l'AIEA gratuites en ligne



télécharger ici



<https://www.iaea.org/fr/publications>



Pour commander un ouvrage, veuillez contacter :
sales.publications@iaea.org

TÉLÉCHARGER

Changements climatiques et énergie nucléaire 2022

et autres publications de l'AIEA sur les solutions innovantes pour
l'objectif zéro émission nette :

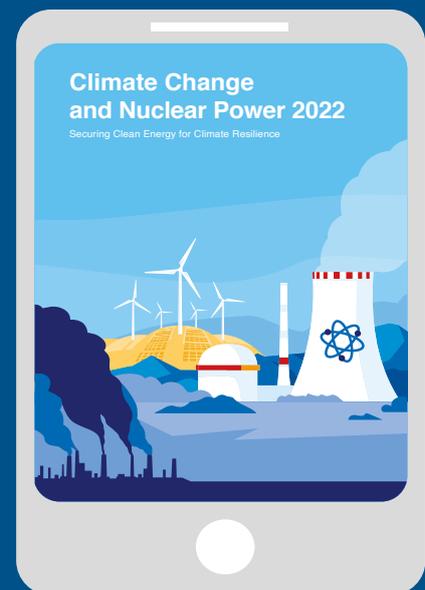
Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment

Nuclear–Renewable Hybrid Energy Systems

Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors



www.iaea.org/fr/bulletin/64-3



Créons ensemble

des systèmes énergétiques à zéro émission nette

ATOMS4 NETZERO

L'AIEA invite les États Membres, les acteurs industriels, les institutions financières et autres parties prenantes à travailler avec elle et à partager leur expertise, leurs outils de modélisation, leurs connaissances industrielles, leurs activités de sensibilisation et leurs ressources financières.

www.iaea.org/fr/Atoms4NetZero



SCIENTIFIC FORUM

NUCLEAR ENERGY FOR CLIMATE

26-27 SEPTEMBRE 2023

POUR EN SAVOIR PLUS, CONSULTEZ



atoms.iaea.org/SciFoNetZero

Le Bulletin de l'AIEA est disponible en ligne à l'adresse
www.iaea.org/fr/bulletin

Pour plus d'informations sur l'AIEA et ses activités, rendez-vous sur le site
www.iaea.org/fr

ou suivez-nous sur

