

IAEA BULLETIN

L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Octobre 2024 | www.iaea.org/fr/bulletin

PAS DE NEUTRALITÉ CARBONE SANS NUCLÉAIRE

Le chemin vers l'objectif zéro émission nette commence ici

– entretien avec le Premier Ministre belge, Alexander De Croo, p. 4

[La transition énergétique et la décarbonation industrielle, p. 10](#)

Atoms4NetZero, une initiative de l'AIEA pour aider les pays à mettre la puissance du nucléaire au service de l'objectif zéro émission nette, p. 16



LE BULLETIN DE L'IAEA

est produit par le

Bureau de l'information et de la communication

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne

B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Téléphone : (43-1) 2600-0

iaeabulletin@iaea.org

Rédaction : Kirstie Gregorich Hansen

Direction de la rédaction : Patricia Puhm

Conception et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'IAEA 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'IAEA, 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.

Photo de couverture :

AdobeStock

Suivez-nous sur :



L'atome pour la paix
et le développement

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a pour mission d'aider à 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 des technologies 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 à transférer des connaissances et des 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 établissent les principes fondamentaux, les prescriptions et les recommandations qui permettent de 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.

Le Siège de l'AIEA est au Centre international de Vienne en Autriche. L'Agence a des bureaux extérieurs et des bureaux de liaison à Genève, à New York, à Tokyo et à Toronto, et exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, à Seibersdorf et à Vienne. En outre, l'AIEA apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique à Trieste (Italie).

Il est temps d'agir

Le nucléaire au service d'un avenir zéro émission nette

Par Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

Les conséquences des changements climatiques sont de plus en plus claires. Les sécheresses, inondations et incendies doivent nous pousser à agir à grande échelle de manière décisive.

Des progrès sont accomplis dans les efforts mondiaux de décarbonation de l'énergie, de l'industrie et des transports, notamment en ce qui concerne la reconnaissance du rôle déterminant de l'énergie nucléaire.

L'inclusion du nucléaire dans le bilan mondial publié à la 28^e Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28), organisée l'année dernière à Dubaï, est tout simplement historique. Pour la première fois depuis 1995, année de la toute première COP, les 198 pays signataires de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ont officiellement appelé à accélérer le déploiement du nucléaire. En parallèle, plus de 20 pays se sont engagés à s'efforcer de tripler la capacité électronucléaire mondiale en vue d'aider à concrétiser l'objectif zéro émission nette d'ici 2050.

En mars 2024, l'AIEA et le Gouvernement belge ont organisé à Bruxelles le premier Sommet mondial sur l'énergie nucléaire, qui a rassemblé des dirigeants de plus de 30 pays et des représentants de l'Union européenne. Les participants ont avancé des mesures concrètes d'accélération de l'utilisation de l'électronucléaire pour assurer la sécurité énergétique, atteindre les objectifs climatiques et favoriser le développement durable. Ce tout premier Sommet sur l'énergie nucléaire a marqué un tournant, traçant clairement la voie à suivre – qu'il s'agisse de créer les conditions

nécessaires à l'investissement ou de veiller à ce qu'aucun pays ne soit laissé pour compte.

Face à cet élan, l'AIEA a revu à la hausse ses prévisions de production d'électricité d'origine nucléaire pour la quatrième année consécutive. Dans son hypothèse haute, elle prévoit une multiplication de la capacité nucléaire mondiale par 2,5 d'ici 2050, en supposant que les petits réacteurs modulaires (PRM) seraient à l'origine d'un quart de cette énergie supplémentaire.

Aux quatre coins du monde, de nouveaux pays se tournent vers le nucléaire et les pays qui se sont déjà dotés d'un programme électronucléaire prolongent la durée de vie de leurs centrales et en construisent de nouvelles. Pour alimenter des centres de données énergivores sans pour autant augmenter les émissions nocives, les entreprises technologiques concluent des accords avec des acteurs du secteur nucléaire, y compris des fournisseurs d'électricité d'origine nucléaire reconnus et des start-ups spécialistes des PRM.

Cette édition du Bulletin fait le point sur le paysage actuel de l'électronucléaire, en passant en revue les récents progrès et ce qu'il reste à faire pour que ces projections se concrétisent. Qu'il s'agisse de renforcer la main-d'œuvre, de rationaliser les processus ou d'accélérer le déploiement des réacteurs, la trajectoire que nous devons suivre est claire. Pour atteindre nos objectifs, nous devons faire preuve de détermination et traduire dans les faits les ambitions mondiales que nous avons formulées. Le monde a besoin de plus d'énergie nucléaire, il est temps de passer à l'action.



« Des progrès sont accomplis dans les efforts mondiaux de décarbonation de l'énergie, de l'industrie et des transports, notamment en ce qui concerne la reconnaissance du rôle déterminant de l'énergie nucléaire. »

*Rafael Mariano Grossi,
Directeur général de l'AIEA*



Photos : AIEA



1 Il est temps d'agir

Le nucléaire au service d'un avenir zéro émission nette

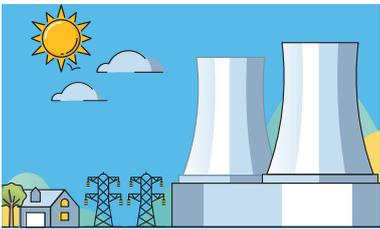


4 Le chemin vers l'objectif zéro émission nette commence ici

Entretien avec le Premier Ministre belge, Alexander De Croo



6 COP29 : poursuivre sur la lancée, de Dubaï à Bakou



8 Les grands réacteurs, futur fer de lance de l'expansion électronucléaire malgré la progression des petits réacteurs modulaires



10 La transition énergétique et la décarbonation industrielle



12 Les centres de données, les entreprises d'intelligence artificielle et les sociétés de crypto-monnaies s'intéressent aux technologies nucléaires avancées qui pourraient satisfaire leurs besoins croissants en électricité



14 Cap sur l'essor de la filière nucléaire :
la polyvalence de l'approche par étapes de l'AIEA



16 Atoms4NetZero, une initiative de l'AIEA pour aider les pays à mettre la puissance du nucléaire au service de l'objectif zéro émission nette



18 Normes de réussite :
une initiative de l'AIEA vise à accélérer le déploiement des PRM



20 Mise en valeur des ressources humaines dans le secteur nucléaire pour un avenir à zéro émission nette



22 Ce que la déclaration sur l'énergie nucléaire de la COP28 signifie pour les activités de vérification de l'AIEA

INFOS AIEA

24 Actualités

28 Publications

Le chemin vers l'objectif zéro émission nette commence ici

Le Premier Ministre belge, Alexander De Croo, a coprésidé le tout premier Sommet sur l'énergie nucléaire avec le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi.

L'énergie nucléaire suscite un intérêt croissant de la part de nombreux pays, car elle peut aider à la fois à réduire la consommation de combustibles fossiles et à répondre à la demande de plus en plus forte d'électricité distribuée bas carbone, nous permettant ainsi de nous rapprocher davantage de la réalisation des cibles de l'objectif zéro émission nette à l'échelle mondiale. Jamais une réunion d'un aussi haut niveau n'avait été consacrée exclusivement à l'énergie nucléaire.

Le Premier Ministre De Croo est revenu avec nous sur l'importance du Sommet et sur le rôle de l'énergie nucléaire dans la réalisation de l'objectif zéro émission nette.



Q : Quels étaient les principaux objectifs du Sommet sur l'énergie nucléaire et quelle influence pensiez-vous qu'il aurait sur les conversations et les actions menées à l'échelle mondiale en rapport avec l'énergie nucléaire et les technologies en cours de développement ?

R : C'était la première fois qu'un sommet mondial sur l'énergie nucléaire était organisé avec des chefs d'État. Ça prouve toute l'importance de cette réunion, organisée à Bruxelles le 21 mars 2024. Le Sommet a offert à tous les dirigeants qui y ont participé l'occasion de faire connaître leur point de vue sur le rôle que la technologie nucléaire devrait jouer – et jouera dans les années à venir – dans la réalisation des objectifs de décarbonation que nous nous sommes collectivement fixés. Il s'agissait d'un signal politique fort, attestant du rôle essentiel que jouait l'électronucléaire pour de nombreux pays du monde entier dans leurs trajectoires vers l'objectif zéro émission nette.

Aborder le sujet, c'est bien. Mais mettre en œuvre des solutions, c'est beaucoup mieux. Voilà pourquoi nous avons décidé de compléter ces discussions au niveau politique par un symposium scientifique où nous avons réuni les grands acteurs de l'industrie afin de leur permettre de présenter leurs dernières innovations et de les aider à construire les ponts et les partenariats qui permettront de concrétiser les projets de demain.

Q : Quel regard portez-vous sur la contribution de l'énergie nucléaire à la transition, à l'échelle mondiale, vers des sources d'énergie plus propres et plus durables, en particulier dans le contexte de la transition vers le zéro émission nette ?

R : L'énergie nucléaire est un élément de la solution. Il y a d'abord lieu de noter que la guerre en Ukraine a ouvert les yeux de l'Europe sur le fait qu'elle ne peut plus compter sur les autres pour répondre à ses besoins en énergie. Nous devons reprendre la main et diversifier

autant que possible nos sources d'énergie. L'Europe a redécouvert la réalité géopolitique des politiques énergétiques. Dans le même temps, il est indispensable que nous accélérions notre transition énergétique si nous voulons atteindre les objectifs climatiques que nous nous sommes fixés à l'horizon 2050.

Q : Pourquoi maintenant ? En quoi ce sommet vous semblait-il nécessaire ?

R : Il n'y a qu'à voir la place centrale qu'a occupée l'énergie nucléaire dans les débats de la COP28 à Dubaï. Il nous incombe à présent de passer des idées et des projets à la mise en œuvre. C'est là le véritable défi. Nous devons profiter de cet élan pour créer l'espace politique et économique qui nous permettra de passer des présentations PowerPoint aux projets concrets, qu'il s'agisse de petits réacteurs modulaires (PRM) ou d'autres solutions innovantes qui fourniront une charge de base stable à nos industries dans le monde entier.

Q : L'énergie nucléaire suscite souvent le scepticisme du public. Quelles sont, selon vous, les stratégies essentielles pour faire mieux comprendre et accepter au public la contribution de l'énergie nucléaire à la lutte contre les changements climatiques ?

R : En un sens, le déclin a déjà eu lieu. C'est la première fois depuis plusieurs décennies que le public est aussi conscient des enjeux liés à l'énergie nucléaire. Même dans des pays comme le mien, où il était question d'abandonner totalement l'énergie nucléaire, on constate un changement radical de l'opinion publique en faveur de la contribution de l'énergie nucléaire au bouquet énergétique. Cette tendance est observée dans d'autres pays également. Nous devons profiter de ce soutien renouvelé pour établir la plus grande transparence possible et gagner la confiance du grand public. Il est hors de question pour nous de minimiser la contribution de l'énergie nucléaire, mais nous ne devons pas non plus la surestimer. Nous devons faire preuve de réalisme quant à nos ambitions et à la place de l'énergie nucléaire dans le bouquet énergétique global des pays, et

« Le Sommet a offert à tous les dirigeants qui y ont participé l'occasion de faire connaître leur point de vue sur le rôle que la technologie nucléaire devrait jouer – et jouera dans les années à venir – dans la réalisation des objectifs de décarbonation que nous nous sommes collectivement fixés. »

– Alexander De Croo,
Premier Ministre belge



Le Premier Ministre belge, Alexander De Croo, et le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, annoncent le premier Sommet mondial sur l'énergie nucléaire à la COP28 à Dubaï.

(Photo : D. Calma/AIEA)

discuter en toute transparence des possibilités et des défis en la matière.

Q : Quels sont les défis et les possibilités que vous entrevoyez pour ce qui est de l'adoption généralisée de l'énergie nucléaire à l'échelle mondiale, et comment peut-on relever ces défis ?

R : Il est important pour moi de parler des possibilités, qui sont immenses. Les changements climatiques constituent le plus grand défi du millénaire. Mais nous pouvons transformer ce défi en résultats positifs, en créant des emplois, en améliorant la qualité et la résilience de nos sociétés et en offrant un véritable avenir à l'innovation et à notre industrie. Pour ce faire, nous devons consolider nos efforts en fédérant les attentes des citoyens, des responsables politiques, de nos industries et de toutes les parties prenantes afin de travailler ensemble à la mise en œuvre de cette réponse, laquelle met en jeu l'énergie nucléaire. L'objectif était de conférer à ce sommet un caractère véritablement mondial et d'y associer des partenaires du monde entier. Les changements climatiques ne connaissent pas de frontières nationales, et ce n'est pas en éliminant progressivement les combustibles fossiles dans une seule partie du monde que l'on parviendra à un résultat satisfaisant. Nous avons besoin d'une réponse collective au niveau mondial qui tienne compte des différences entre les continents et les pays. Le premier Sommet sur l'énergie nucléaire a été une réussite, et ce ne sera certainement pas le dernier.

Q : À vos yeux, comment l'énergie nucléaire peut-elle renforcer la sécurité énergétique et stimuler le développement économique, tant au niveau national que mondial ?

R : Regardez ce que nous avons pu faire en Belgique. Nous avons axé nos actions autour de politiques s'étalant sur 20 ans et nous avons revu notre position sur l'abandon progressif de l'énergie nucléaire. Nous l'avons fait à un moment où nous n'avions jamais autant investi dans les énergies renouvelables. La Belgique ambitionne de quadrupler sa production d'énergie éolienne en mer du Nord pour atteindre 8 gigawatts (GW) d'ici 2040

et de relier son infrastructure offshore aux autres pays de la mer du Nord grâce à la construction de la première île énergétique au monde. À l'horizon 2040, celle-ci couvrira la consommation de 50 % de l'ensemble des ménages belges. Pas mal pour un pays dont la bande côtière ne mesure qu'un peu plus de 60 kilomètres ! Mais cette solution doit être complétée par d'autres sources d'énergie à faible émission de carbone, notamment l'énergie nucléaire. Outre l'exploitation à long terme des réacteurs de Doel 4 et de Tihange 3, nous avons décidé d'investir dans l'innovation nucléaire au Centre belge d'étude de l'énergie nucléaire (SCK CEN) à Mol. La Belgique nourrit l'ambition de participer à la recherche innovante sur le démantèlement des installations nucléaires, les applications médicales des radio-isotopes et la mise au point des PMR de quatrième génération.

Q : Vu les avancées de la technologie nucléaire, notamment les PRM, les grands réacteurs et la technologie de la fusion, comment, selon vous, ces innovations façonneront-elles l'avenir de l'énergie nucléaire et contribueront-elles à un paysage énergétique plus durable ?

R : L'innovation est la clé de l'avenir de tout secteur. Faire la transition vers un avenir où il y aura zéro émission nette implique de restructurer nos systèmes énergétiques. Nos sociétés auront toujours besoin d'une importante charge de base et, à ce titre, l'énergie nucléaire continuera à jouer un rôle essentiel dans de nombreux pays. Mais nous aurons également besoin de systèmes énergétiques plus agiles et plus intelligents si nous voulons réussir. Nos futurs systèmes énergétiques devront être résistants, assurer la sécurité de l'approvisionnement, être neutres en carbone et présenter le coût d'exploitation le plus bas possible. L'essentiel de l'innovation dans le secteur nucléaire vise à relever ces défis. C'est le signe que le secteur est sur la bonne voie.

COP29 : poursuivre sur la lancée, de Dubaï à Bakou

Par Matt Fisher

Une année s'est écoulée depuis la 28^e Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques de Dubaï. L'électronucléaire a depuis progressé à grands pas, et le mouvement international poussant à utiliser cette technologie propre et fiable pour relever les défis climatiques et énergétiques les plus pressants devrait continuer sur sa lancée à la COP29, que l'Azerbaïdjan accueillera à Bakou.

La COP28 a été un événement historique pour l'énergie nucléaire. Après presque trois décennies passées à l'arrière-plan de la conférence annuelle, cette énergie a enfin été mise en avant l'année dernière à Dubaï. Le message de la COP28 était clair : l'essor de l'électronucléaire doit être au cœur des efforts déployés au niveau mondial pour concrétiser l'objectif zéro émission nette.

Cet élan en faveur de l'énergie nucléaire a continué de prendre de l'ampleur au tout premier Sommet de l'énergie nucléaire, organisé par l'AIEA et le Gouvernement belge à Bruxelles en mars 2024. Les dirigeants de plus de 30 pays et de l'Union européenne ont souligné l'importance du nucléaire pour la sécurité énergétique, les

objectifs climatiques et le développement durable.

La COP29 offre une nouvelle occasion de mettre en lumière l'énergie nucléaire, au moment où les pays décident des voies à suivre pour exploiter son potentiel. Alors que les dirigeants se réunissent à Bakou, cette édition du Bulletin de l'AIEA met en lumière le rôle de plus en plus important que joue l'énergie nucléaire dans la transition vers l'énergie propre.

Diversifier les solutions dans le domaine de l'énergie nucléaire

Pour tripler la capacité nucléaire d'ici 2050, le monde devra exploiter toutes les solutions dont il dispose. La quasi-totalité des quelque 60 réacteurs en cours de construction sont de grands réacteurs à eau sous pression. Même si ces technologies constitueront l'essentiel des réacteurs déployés, les technologies émergentes telles que les petits réacteurs modulaires (PRM) et les microréacteurs, notamment les nouveaux modèles utilisant des combustibles et des caloporteurs innovants, pourront également jouer un rôle majeur.

Le message de la COP28 était clair : l'essor de l'électronucléaire doit être au cœur des efforts déployés au niveau mondial pour concrétiser l'objectif du zéro émission nette.



L'énergie nucléaire présente de nombreux avantages : en plus de fournir une charge de base aux réseaux électriques du monde entier, elle peut être utilisée pour décarboner rapidement les secteurs industriels et atténuer leurs effets, sachant que ces secteurs représentent près de 40 % des émissions de gaz à effet de serre.

En outre, les besoins énergétiques liés aux centres de données et à l'intelligence artificielle devraient monter en flèche dans les années à venir, ce qui explique pourquoi des entreprises comme Google et Microsoft s'intéressent activement aux technologies nucléaires avancées en tant que sources d'énergie propre, fiable et flexible pour faire face à l'augmentation de leurs besoins énergétiques. On pourrait ainsi assister à l'ouverture d'un créneau inédit et original de déploiement commercial de technologies électronucléaires avancées sur des marchés où celles-ci peinent actuellement à émerger en raison des difficultés liées à leur financement du fait de leur caractère novateur.

Des tournants essentiels sont à portée de main

Alors que de plus en plus de pays cherchent à ajouter l'atome à leur bouquet énergétique, l'approche par étapes de l'AIEA, qui a récemment été mise à jour pour tenir compte des problématiques propres aux PRM, fournit un processus raisonné qui permet de mettre en place l'infrastructure nécessaire à la mise en œuvre d'un programme électronucléaire sûr, sécurisé et durable. De plus, les orientations de l'AIEA peuvent être utiles aux pays primo-accédants, sachant que la demande concernant l'électronucléaire ne cesse de croître dans les pays en développement.

Par ailleurs, les pays ont besoin d'aide pour établir leur propre trajectoire vers le zéro émission nette. Le point de départ est souvent la modélisation de scénarios énergétiques, qui présentent une vue complète des défis à relever et des possibilités offertes en s'appuyant sur des données. L'initiative Atoms4NetZero de l'AIEA fournit aux décideurs les données dont ils ont besoin pour prendre des décisions éclairées et scientifiquement fondées afin d'exploiter tout le potentiel de l'énergie nucléaire – y compris dans les secteurs non électriques – et de décarboner leur économie nationale.

Canaliser le progrès

Pour optimiser les plans d'expansion, il convient de se tourner vers de nouvelles approches qui permettront d'exécuter les nouveaux projets de construction dans le respect des délais impartis et du budget alloué. L'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires de l'AIEA aide les pays à établir des approches réglementaires harmonisées et à normaliser les normes industrielles en vue de faciliter le déploiement sûr et sécurisé des PRM et autres réacteurs avancés.

Pour surmonter les difficultés actuelles et assurer la viabilité à long terme de l'énergie nucléaire, il est plus que jamais nécessaire de disposer d'une main-d'œuvre qualifiée et diversifiée. L'AIEA aide les pays dans ces domaines dans le cadre d'initiatives telles que l'École de gestion de l'énergie nucléaire, le programme de bourses Marie Skłodowska-Curie, le programme Lise Meitner et divers autres formations, ateliers et services d'examen par des pairs.

L'AIEA est tenue de vérifier l'utilisation pacifique des matières nucléaires. La poursuite de l'expansion de l'électronucléaire viendra contribuer à l'augmentation constante des volumes de matières nucléaires et du nombre d'installations soumis aux garanties de l'AIEA. Soucieux d'utiliser des technologies de pointe et de coopérer avec les États qui cherchent à augmenter leur production d'énergie nucléaire et les « primo-accédants » qui cherchent à ajouter l'énergie nucléaire à leur bouquet énergétique, le personnel de l'AIEA chargé des garanties est prêt à répondre aux demandes de plus en plus importantes de la communauté internationale au moment où le monde entier cherche à atteindre l'objectif zéro émission nette.

Comme l'a clairement illustré la COP28, l'intérêt mondial pour une énergie nucléaire propre et fiable ne cesse de croître. À la COP29, les pays pourront faire en sorte que l'énergie nucléaire atteigne son plein potentiel et devienne un des piliers de notre avenir à zéro émission nette.

COP29

Les grands réacteurs, futur fer de lance de l'expansion électronucléaire malgré la progression des petits réacteurs modulaires

Par Joanne Liou

Porter la production d'énergie d'origine nucléaire au niveau nécessaire pour atteindre l'objectif zéro émission nette est un projet de taille qui comporte de multiples facettes. Et même si de nombreux modèles de réacteurs devraient jouer un rôle à cette fin, ce sont les grands réacteurs qui devraient ouvrir la voie. Les grands réacteurs refroidis par eau ont joué un rôle clé dans l'essor de l'industrie nucléaire au XX^e siècle, et les réacteurs avancés prévus ou en construction aujourd'hui – d'une puissance généralement comprise entre 1 et 1,7 gigawatt électrique (GWe) – devraient fournir l'essentiel de la nouvelle capacité nucléaire.

« Pour les pays qui exploitent déjà des centrales nucléaires, ce sont les grands réacteurs à eau ordinaire, et non les petits réacteurs modulaires (PRM), qui seront le moteur de cette nouvelle capacité nucléaire », explique Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « La technologie des grands réacteurs a déjà fait ses preuves et peut fournir une charge de base importante et fiable, à moindre coût. Mais nous pensons que les pays et les industries exploiteront également le potentiel des PRM. »

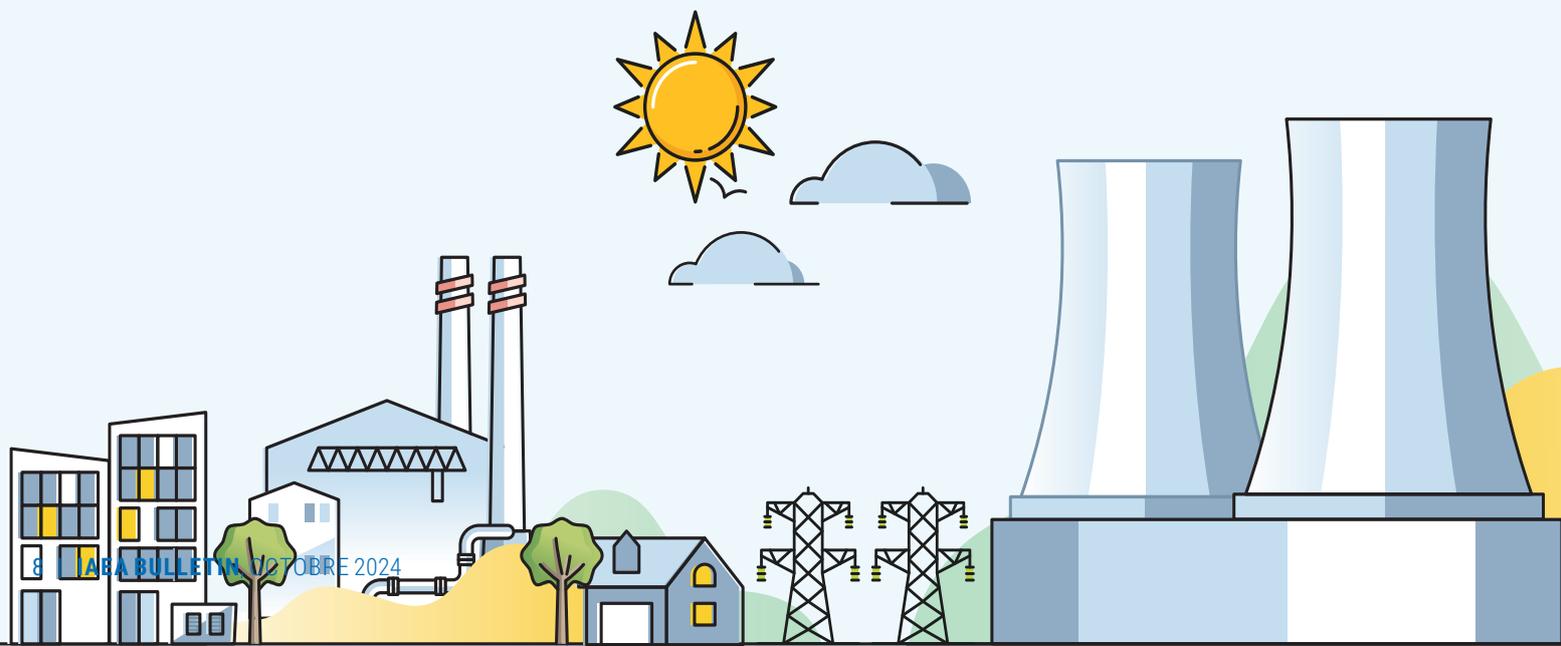
En décembre dernier, dans une déclaration soutenue par des dizaines de pays présentée à la 28^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28), le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, a lancé un appel retentissant en faveur de l'expansion de l'électronucléaire aux fins de la réalisation des objectifs mondiaux zéro émission nette. Cette position a été confirmée dans le bilan mondial, puisque pour la première fois en presque 30 ans d'existence, la Conférence y a inclus l'électronucléaire.

Dans son hypothèse haute, l'AIEA prévoit que la capacité de production d'énergie nucléaire fera plus que doubler d'ici 2050, passant de 371 GWe en 2022 à 890 GWe en 2050 – mais environ 10 % seulement de cette augmentation devrait provenir du déploiement de PRM. Pour atteindre cet objectif, il faut ajouter au moins 20 GWe par an. « Cette projection haute est ambitieuse mais techniquement réalisable », indique Henri Paillère, chef de la Section de la planification et des études économiques de l'AIEA.

Les réacteurs plus petits comme les PRM et les microréacteurs peuvent être particulièrement utiles pour fournir de l'énergie aux utilisateurs finaux industriels et aux communautés isolées disposant de réseaux électriques plus limités, et pour alimenter des applications non électriques telles que la production d'hydrogène et le dessalement de l'eau de mer. Toutefois, les PRM doivent encore faire leurs preuves avant d'être déployés à plus grande échelle. Les réacteurs de plus grande taille continueront à dominer le paysage de l'électronucléaire dans les années à venir.

La quasi-totalité des 58 réacteurs nucléaires actuellement en construction sont de grands réacteurs, et tant les pays qui exploitent déjà l'électronucléaire que les primo-accédants s'intéressent maintenant principalement aux réacteurs d'une capacité de 1 GW ou plus, bien que nombre d'entre eux envisagent également de déployer des PRM. La Pologne, pays primo-accédant qui entend se doter d'une capacité nucléaire d'ici le milieu des années 2030, compte sur les grands réacteurs de puissance pour créer une capacité de production comprise entre 6 et 9 GWe. La Chine, qui exploite actuellement 55 réacteurs, prévoit de multiplier par huit sa capacité nucléaire, pour passer à

Dans son hypothèse haute, l'AIEA prévoit que la capacité de production d'énergie nucléaire fera plus que doubler d'ici à 2050, passant de 371 GWe en 2022 à 890 GWe en 2050 – mais environ 10 % seulement de cette augmentation devrait provenir du déploiement de PRM.



environ 400 GW d'ici 2060, principalement grâce au déploiement de grands réacteurs.

Les défis de l'expansion nucléaire

Selon M. Paillère, les plus grands défis de l'expansion de la capacité nucléaire sont ceux liés aux ressources financières et humaines : « Nous avons besoin de mécanismes pour encourager les investisseurs et le secteur privé à financer de nouveaux projets nucléaires. Il y a suffisamment d'argent pour financer la transition vers les énergies propres. Ce qui incite les investisseurs à la prudence face à l'électronucléaire, c'est le risque – par exemple les retards dans la construction. »

Après plusieurs décennies sans nouvelles constructions nucléaires, les grands projets nucléaires novateurs des pays occidentaux ont souvent été marqués par des dépassements de coûts et des retards, puisqu'il faut réacquérir les compétences et revitaliser les processus. « Certains de ces pays n'avaient construit aucune installation nucléaire depuis 20 ans. Il fallait former les ressources humaines et remettre sur pied les chaînes d'approvisionnement, explique M. Paillère. L'augmentation de la capacité nucléaire suppose des constructions et de nouvelles connexions au réseau, ce qui signifie qu'il faut trouver davantage d'ingénieurs, de techniciens, de soudeurs, etc. La question des ressources humaines n'est pas propre au nucléaire, mais c'est un défi commun à toutes les technologies d'énergies propres. » Pour mener à bien les nouveaux projets de construction dans les délais impartis, il sera important de garder à l'esprit les enseignements tirés des projets passés, notamment en matière de gestion de projet et de participation des parties prenantes.

Dans certains pays, comme le Bélarus, la Chine, les Émirats arabes unis, la Fédération de Russie et la République de Corée, les projets de nouvelles constructions – dont la plupart portent sur des réacteurs avancés refroidis par

eau – ont en grande partie été exécutés dans le respect des délais et du budget. « La conception standardisée des réacteurs avancés permet d'obtenir plus rapidement les autorisations et de réduire à la fois les coûts d'investissement et les délais de construction », explique M^{me} des Cloizeaux.

Essors passés et futurs

Les années 1970 ont été marquées par une montée en flèche de l'énergie d'origine nucléaire, principalement en Amérique du Nord et en Europe. En 1970, 15 pays exploitaient 90 réacteurs nucléaires de puissance, pour une capacité totale de 16,5 GWe. Chaque année au cours de la décennie ouverte en 1970, 25 à 30 projets de construction de tranches de réacteurs nucléaires ont été lancés. En 1980, 22 pays exploitaient 253 réacteurs nucléaires de puissance, pour une capacité totale de 135 GWe. Fin 1990, la capacité nucléaire mondiale avait plus que doublé, atteignant 326 GWe.

« L'industrie nucléaire et la chaîne d'approvisionnement étaient bien établies et capables d'ajouter 30 GW par an, indique M. Paillère. C'est encourageant car, à l'époque, seuls quelques pays étaient à l'avant-garde de cette tendance, comme les États-Unis d'Amérique, la France et le Japon. Aujourd'hui, la Chine et la Fédération de Russie sont devenues des acteurs de premier plan et disposent de la chaîne d'approvisionnement et de l'industrie nécessaires pour soutenir l'expansion de l'électronucléaire. »

La relance et l'expansion de l'électronucléaire pour atteindre les objectifs mondiaux, que ce soit au moyen de grands réacteurs ou de PRM, exigeront un appui politique et une maîtrise rigoureuse des coûts. « L'élan nécessaire à la réalisation des objectifs est là, mais il faudra davantage de volonté politique », estime M^{me} des Cloizeaux.

expansion électronucléaire



La transition énergétique et la décarbonation industrielle

Par Eric Ingersoll et Chirayu Batra

À l'avenir, notre planète aura besoin d'une énergie propre en abondance pour couvrir tous ses besoins. Plus de 30 térawatts électriques (TWe) d'énergie propre et sûre sont nécessaires pour décarboner complètement le système énergétique mondial et permettre à chaque citoyen de la planète de profiter de services énergétiques modernes équivalents à la moyenne fixée par l'Organisation de coopération et de développement économiques. Comment les industries et économies peuvent-elles mener de front leur développement et la décarbonation ? En 2022, le secteur industriel représentait 37 % de la consommation mondiale d'énergie et était directement responsable de l'émission de 9 gigatonnes de dioxyde de carbone, soit 25 % des émissions du système énergétique mondial (hors émissions indirectes provenant de l'utilisation d'électricité à des fins industrielles). Malgré les engagements pris en matière de décarbonation, les émissions des grandes nations industrielles n'ont cessé d'augmenter.



Répondre aux besoins en chaleur et en électricité de l'industrie au fil de la transition énergétique

L'une des grandes tendances de la transition énergétique est la poussée vers l'électrification à grande échelle, même dans les activités industrielles. Néanmoins, cette stratégie d'« électrification généralisée » comporte des obstacles considérables, compte tenu notamment des besoins de l'industrie en matière de chaleur et d'électricité, qui ne s'apparentent pas à ceux des ressources purement électriques raccordées au réseau, puisqu'ils suivent le profil de charge d'un système de production combinée de chaleur et d'électricité « derrière le compteur ». Le premier obstacle à surmonter est celui de l'utilisation simultanée de chaleur et d'électricité, et le deuxième, l'exigence d'une fiabilité, d'une disponibilité et d'une sécurité solides dans le processus. Plusieurs autres aspects, tels que la disponibilité de nouvelles lignes de transmission et l'efficacité et la fiabilité du nouveau processus d'électrification, constituent des obstacles supplémentaires.

Comme indiqué dans un récent rapport du Département de l'énergie des États-Unis, les émissions des secteurs industriels proviennent en grande partie de la chaleur : environ 60 % d'entre elles sont le résultat des besoins en chaleur et de la production d'électricité sur le site. Si l'on tient compte de l'intensité de carbone du réseau électrique, les émissions

industrielles pourraient facilement dépasser 70 % des émissions totales.

À la 28^e Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28), la reconnaissance du nucléaire comme source d'énergie propre nécessitant un développement accéléré a été une première. Plus de 22 pays se sont engagés à tripler la capacité nucléaire mondiale d'ici 2050. Cependant, même en réalisant cet engagement, ils devraient ajouter une capacité d'environ 9 000 térawattheures (TWh), soit l'équivalent de la consommation totale d'énergie du secteur de la sidérurgie en 2022. Pour pouvoir décarboner entièrement les industries très gourmandes en énergie, telles que l'industrie chimique, la pétrochimie, l'industrie du ciment ou encore celle du papier et de la pâte à papier, il faudra bien plus de chaleur et d'électricité propres.

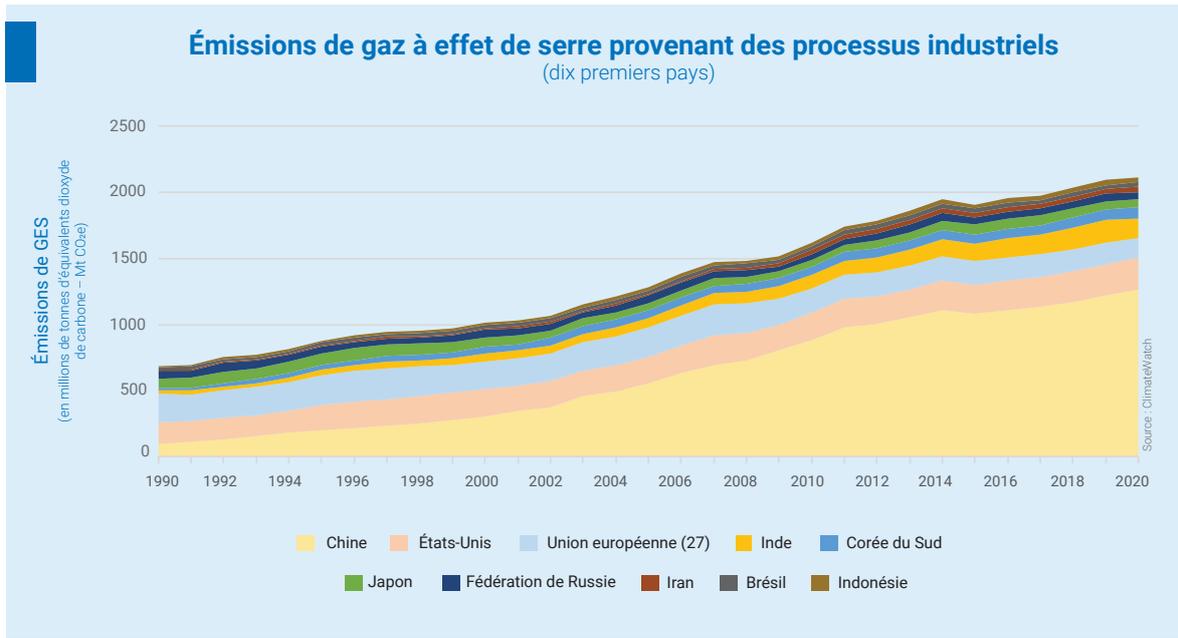
Les sources d'énergie intermittentes exigent un développement massif du réseau, ce qui ne sera pas sans conséquences pour la stabilité et se traduira par une hausse des coûts liés aux systèmes et à l'équilibrage. Ces facteurs sont incompatibles avec les besoins énergétiques de l'industrie et pourraient sérieusement entraver la croissance industrielle. Toutefois, une source décentralisée d'énergie nucléaire – telle qu'un petit réacteur modulaire (PRM) ou un microréacteur sur un site industriel ou sur des pôles industriels – peut fournir assez de chaleur et d'électricité pour couvrir les besoins. Certaines entreprises cherchent déjà à tester ce modèle. Dow Chemicals, par exemple, envisage d'installer des PRM à haute température refroidis par gaz sur l'un de ses sites de production aux États-Unis pour remplacer le gaz naturel par une chaleur et une électricité propres et ainsi décarboner la production.

Un avenir énergétique durable

Le secteur chimique joue un rôle indispensable dans la fourniture de matériaux pour une vaste gamme de produits, comme les plastiques, les engrais et les produits pharmaceutiques. Ses émissions proviennent principalement de trois sources de production de chaleur (environ 40 %), de la consommation d'électricité (environ 29 %) et des émissions directes générées par les processus (environ 24 %). En outre, 80 % des émissions de fonctionnement proviennent de sources fixes sur le site. En adoptant la solution de l'électronucléaire sur

En 2022, le secteur industriel représentait 37 % de la consommation mondiale d'énergie et était directement responsable de l'émission de 9 gigatonnes de dioxyde de carbone, soit 25 % des émissions du système énergétique mondial.

décarbonation



place, on peut disposer d'une chaleur et d'une électricité propres pour ces processus chimiques essentiels.

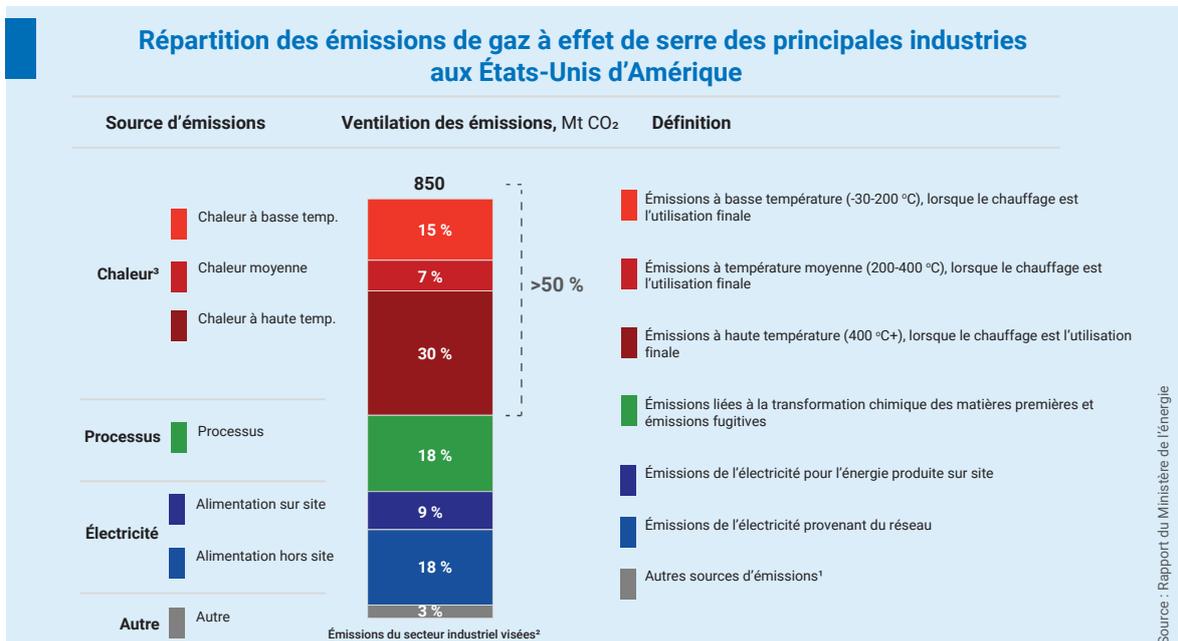
Autre secteur en expansion : les centres de données, qui font gonfler la demande mondiale d'électricité. La consommation d'électricité combinée d'Amazon, de Microsoft, de Google et de Meta a plus que doublé entre 2017 et 2021. La consommation d'électricité des centres de données devrait, selon les prévisions, dépasser les 1 000 TWh d'ici 2026 et augmentera encore avec l'essor de l'intelligence artificielle (IA). Voilà pourquoi plusieurs grandes entreprises technologiques envisagent des solutions électronucléaires avancées, comme les PRM, pour assurer une énergie propre à l'avenir.

Les PRM pourraient aider à répondre aux besoins de l'industrie, car ils reposent sur un modèle de déploiement fondé non pas sur un grand projet personnalisé, mais sur des produits fabriqués en usine selon une conception, une chaîne d'approvisionnement et un processus de livraison préétablis. Une telle approche permet de réduire les coûts, d'améliorer l'efficacité et de garantir un calendrier

de construction fiable. Elle offrirait une solution peu risquée sur le plan commercial, économique, reproductible et évolutive, qui s'alignerait sur les objectifs de l'industrie et contribuerait à la réalisation des objectifs mondiaux de décarbonation.

L'industrie ne pourra être décarbonée avec les seules centrales nucléaires traditionnelles. De nouveaux modèles sont nécessaires, des modèles adaptés aux processus de déploiement rapide et prévisible des actifs que suivent les entreprises aujourd'hui.

Il sera nécessaire de moderniser radicalement la conception, l'autorisation et la livraison des technologies d'énergie propre, tout en tirant parti des nouveaux outils numériques, pour mettre les solutions nucléaires avancées au service d'un avenir énergétique durable, équitable et résilient.



Les centres de données, les entreprises d'intelligence artificielle et les sociétés de crypto-monnaies s'intéressent aux technologies nucléaires avancées qui pourraient satisfaire leurs besoins croissants en électricité

Par Jeffrey Donovan

La consommation d'électricité des centres de données, des entreprises d'intelligence artificielle (IA) et des sociétés de crypto-monnaies étant appelée à s'accroître dans les années à venir, les grandes entreprises technologiques comptent vivement sur les technologies nucléaires avancées, telles que les petits réacteurs modulaires (PRM), pour leur approvisionnement en électricité propre, fiable et flexible. Il pourrait en résulter un nouveau schéma de commercialisation des PRM et d'autres réacteurs avancés sur des marchés où ces technologies en sont encore à l'état embryonnaire.

Les centres de données (qui abritent les serveurs et les dispositifs informatiques nécessaires au stockage des informations numériques), les entreprises d'intelligence artificielle et les sociétés de crypto-monnaies font gonfler la demande d'électricité dans plusieurs régions. Pris ensemble, ils représentaient 2 % de la consommation mondiale d'électricité en 2022, un chiffre qui pourrait doubler d'ici 2026, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE). La consommation cumulée d'électricité de quatre entreprises – Amazon, Microsoft, Google et Meta – a plus que doublé entre 2017 et 2021 pour s'établir à environ 72 térawattheures (TWh).

Dans leur quête de solutions pour répondre à leurs besoins croissants en électricité, les grandes entreprises technologiques sont également soucieuses de décarboner leurs activités, soit pour se conformer aux législations, soit en vue de réaliser leurs propres objectifs de durabilité. Pour y parvenir, elles misent non seulement sur des sources d'électricité renouvelables variables telles que le solaire et l'éolien, mais aussi sur des technologies nucléaires de pointe telles que les PRM. On peut observer une tendance similaire dans d'autres industries, telles que la pétrochimie, qui veulent disposer d'une électricité et d'une chaleur propres 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

« Dans certaines régions, le déploiement de technologies électronucléaires avancées peut très bien passer par les grandes entreprises utilisatrices des secteurs industriels technologiques », explique Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « Les PRM et les autres réacteurs nucléaires avancés sont tout indiqués pour jouer un rôle clé pour ces entreprises en ce qu'ils peuvent leur fournir, avec souplesse et fiabilité, l'énergie bas carbone dont elles ont besoin pour mener à bien leurs activités. »

Les centres de données avaient consommé environ 460 TWh d'électricité en 2022, selon les chiffres de l'AIE.

Cette consommation pourrait s'élever à plus de 1 000 TWh d'ici 2026, soit plus d'un tiers de l'électricité produite par les centrales nucléaires du monde entier l'année dernière, et à peu près l'équivalent de la consommation d'électricité du Japon.



Les centres de données avaient consommé environ 460 TWh d'électricité en 2022, selon les chiffres de l'AIE. Cette consommation pourrait s'élever à plus de 1 000 TWh d'ici 2026, soit plus d'un tiers de l'électricité produite par les centrales nucléaires du monde entier l'année dernière, et à peu près l'équivalent de la consommation d'électricité du Japon.

En Chine, la demande d'électricité des centres de données devrait doubler d'ici 2030 par rapport à son niveau de 2020, pour s'établir à 400 TWh. Dans le nord-est des États-Unis d'Amérique, les centres de données devraient de plus en plus stimuler la demande d'électricité. En Europe, le marché des centres de données connaît également un essor rapide. En Irlande, par exemple, la demande d'électricité des centres de données se chiffrait à 5,3 TWh en 2022, soit 17 % de la consommation totale d'électricité du pays. L'AIE a fait savoir qu'« à ce rythme, les centres de données irlandais pourraient doubler leur consommation d'électricité d'ici 2026, et vu la vitesse à laquelle les applications d'IA pénètrent le marché, nous prévoyons que le secteur devrait absorber 32 % de la demande totale d'électricité du pays en 2026 ».

Dans leur recherche de solutions à ces nouveaux besoins, Google et Microsoft ont récemment publié des rapports dans lesquels sont examinés les voies et moyens de mettre à contribution les technologies nucléaires avancées et d'autres sources d'électricité propre pour atteindre leurs objectifs commerciaux et de durabilité. « Nous savons que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et les batteries joueront un rôle essentiel dans la décarbonation de notre consommation d'énergie. Mais nous avons également besoin de technologies d'électricité stables, répartissables et neutres en carbone pour décarboner de manière rentable notre consommation d'électricité », souligne Devon Swezey, directeur principal pour l'énergie et le climat chez Google.

Le fait que les centres de données, les entreprises d'IA et les sociétés de cryptomonnaies veuillent trouver des sources d'énergie de base propres et fiables pour mener à bien leurs activités et atteindre les objectifs de décarbonation ne passe pas inaperçu aux yeux des fournisseurs de technologies nucléaires avancées. « L'énergie nucléaire est de toute évidence la meilleure solution à ces deux problèmes. La question est donc celle de savoir comment la fournir avec le plus d'efficacité possible », fait remarquer Bret Kugelmann, fondateur et directeur général de Last Energy, un fournisseur de microréacteurs basé aux États-Unis d'Amérique.

Les utilisateurs finaux d'électricité, notamment les entreprises technologiques, ont besoin du type d'énergie propre et stable que peuvent leur fournir les technologies nucléaires avancées. Ces entreprises peuvent en même

temps contribuer à surmonter les obstacles au déploiement qui entravent la mise sur le marché de ces technologies.

Dans sa récente note d'information sur l'utilisation de la fission et de la fusion nucléaires avancées comme outil de décarbonation, Microsoft a cité un certain nombre de domaines dans lesquels l'entreprise et d'autres parties prenantes peuvent intervenir en faveur de la levée de ces obstacles. Il s'agit notamment d'accélérer la recherche-développement, de mettre en place des programmes visant à tester les nouvelles technologies et à les modéliser aux fins de leur intégration à d'autres sources d'énergie bas carbone, de faire progresser les approches réglementaires en vue d'un déploiement sûr et rentable, et de tirer parti de la puissance des technologies numériques, y compris l'IA, dans la gestion des nouvelles technologies énergétiques et du réseau électrique.

Google se voit jouer un rôle similaire : « Les entreprises acheteuses peuvent contribuer à réduire les obstacles à la commercialisation de ces technologies, y compris le nucléaire avancé, affirme M. Swezey. Nous espérons travailler avec d'autres acheteurs d'énergie propre pour développer ces technologies dans les décennies à venir et parvenir à l'obtention d'une énergie propre 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, non seulement en ce qui concerne Google, mais aussi pour tout le monde. »

Le financement de nouveaux projets nucléaires reste un défi sur plusieurs marchés dans le monde, eu égard à leurs coûts d'investissement généralement élevés et à la longueur des délais de construction. En revanche, les PRM et les microréacteurs, qui sont plus petits et construits en usine, ne nécessiteront sans doute que des coûts initiaux moindres et des délais de construction plus courts. À l'instar des entreprises du secteur technologique, celles d'autres industries, telles que Dow Chemicals, cherchent à déployer des PRM pour pouvoir mener leurs activités en utilisant non seulement de l'électricité décarbonée, mais aussi de la chaleur à haute température.

Selon M. Kugelmann, il pourrait en résulter un nouveau schéma de déploiement de l'électronucléaire : « Offrir du nucléaire plus petit – en fait, à micro-échelle – et modulaire constitue la clé de son accessibilité pour l'industrie privée. Et surtout, c'est également la clé pour développer des projets financés uniquement par des capitaux privés. Lorsque nous parviendrons à créer un modèle pour l'énergie nucléaire qui repose uniquement sur le financement privé, nous serons en mesure de développer des projets plus efficacement et de concrétiser les avantages du nucléaire à grande échelle. »

technologies
nucléaires
avancées

Cap sur l'essor de la filière nucléaire : la polyvalence de l'approche par étapes de l'AIEA

Par Wolfgang Picot

Le cheminement vers l'électronucléaire étant une entreprise complexe, l'approche par étapes de l'AIEA s'est imposée en donnant un cadre essentiel aux pays qui s'engagent sur cette voie ardue. Pour nombre d'entre eux – qu'il s'agisse de pays primo-accédants comme le Ghana ou l'Estonie ou d'acteurs établis en quête d'expansion ou de planification stratégique –, le caractère structuré de l'approche par étapes a démontré sa polyvalence et son caractère indispensable.

L'approche par étapes de l'AIEA repose sur une méthode progressive et complète conçue pour aider les pays à élaborer leurs programmes électronucléaires. Cette méthode joue un rôle décisif, car elle fournit une feuille de route aux pays, des premiers stades de l'étude de l'option électronucléaire à la phase d'exploitation, un processus qui s'étend sur environ 10 à 15 ans.

Seth Kofi Debrah, de la Commission ghanéenne de l'énergie atomique, explique l'importance de l'approche par étapes : « L'approche par étapes fournit une feuille de route de très haut niveau et des orientations sur la manière de se préparer. L'élaboration d'un projet d'infrastructure d'une telle ampleur représente un défi pour les pays primo-accédants et l'approche par étapes propose une structure formelle complète pour y parvenir. »

Le Ghana, l'un des pays disposés à adopter l'électronucléaire, a créé l'Organisation du programme électronucléaire du Ghana qui est chargée de coordonner des activités préparatoires. La feuille de route du pays, qui s'étale sur 15 ans, s'articule autour des trois phases de l'approche par étapes de l'AIEA et prévoit de fournir 700 à 1 000 mégawatts électriques (MWe) supplémentaires au réseau national d'ici 2030.

L'Estonie, quant à elle, considère également que l'électronucléaire est un choix énergétique à la fois fiable et bas carbone. Reelika Runnel,

coordinatrice du groupe de travail sur l'énergie nucléaire de l'Estonie, souligne que l'approche par étapes leur a servi de point de départ : « Elle donne un aperçu de l'ampleur des travaux nécessaires à la mise en place d'un programme nucléaire et couvre tous les sujets liés à l'énergie d'origine nucléaire. Elle permet de rassurer les décideurs politiques, car ils peuvent prendre des décisions sur la base de l'expérience acquise par l'AIEA, qui s'appuie elle-même sur celle de nombreux États Membres. »

À mesure que le paysage énergétique évolue, les projets électronucléaires à grande échelle traditionnels cèdent en partie la place aux petits réacteurs modulaires (PRM). Consciente de cette évolution et compte tenu des limites que comporte l'intégration de grands réacteurs dans son réseau électrique relativement petit, l'Estonie étudie la possibilité de recourir aux PRM. « L'approche par étapes est aussi pleinement applicable aux PRM. Même si le modèle des PRM diffère de celui des réacteurs classiques, les mêmes ensembles de règlements sont applicables », explique M^{me} Runnel.

Seth Kofi Debrah partage cet avis et souligne que l'approche par étapes reste un outil essentiel, quelle que soit la taille du réacteur : « Qu'il s'agisse d'un grand ou d'un petit réacteur, vous aurez besoin de l'approche par étapes pour vous guider. Le gouvernement doit prendre des décisions et établir les lois et les règlements nécessaires, et il faut un exploitant pour financer et faire fonctionner le réacteur, tout comme pour les réacteurs de plus grande taille. Tout est là et l'approche par étapes reste un outil utile aux pays primo-accédants. »

Les PRM sont des installations nucléaires et, à cet égard, les 19 questions liées à l'infrastructure de l'approche par étapes s'appliquent généralement. Cependant, une prochaine version révisée de la publication intitulée « Étapes du développement d'une

approche par étapes

infrastructure nationale pour l'électronucléaire » – publication d'orientation relative à l'approche par étapes – traitera des aspects de l'infrastructure qui peuvent faire l'objet d'une mise en œuvre ou de considérations différentes dans le contexte du déploiement des PRM, selon les cas. Cette publication comporte une annexe qui expose les considérations en matière d'infrastructure qui se rapportent spécifiquement aux PRM.

Les PRM se distinguent également de leurs grands « frères » par le fait que les réacteurs sont traditionnellement construits et exploités dans le même pays. La méthode de construction modulaire utilisée pour les PRM signifie quant à elle qu'ils peuvent être construits dans un pays puis expédiés, assemblés et exploités dans un autre. De ce fait, il faudra peut-être intégrer les prescriptions applicables dans un système plus internationalisé dans le cadre d'un accord et d'une reconnaissance mutuelle de la réglementation entre les parties prenantes. À cet égard, l'approche par étapes fonctionne en synergie avec l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI) de l'AIEA.

Initialement conçue à l'intention des pays qui se lancent dans des programmes nucléaires, l'approche par étapes s'avère tout aussi pertinente pour les acteurs établis qui cherchent à optimiser ou à planifier stratégiquement leurs capacités nucléaires. Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire à l'AIEA, rappelle son rôle dans l'évaluation des infrastructures nucléaires : « On constate qu'en Europe, plusieurs pays envisagent actuellement de relancer des projets ou d'étendre des projets existants. La méthodologie de l'approche par étapes peut contribuer à l'évaluation de leur infrastructure nucléaire actuelle. »

Même pour les pays ayant une expérience de l'exploitation nucléaire, il convient de réévaluer la maturité des infrastructures existantes à la fin de la phase 2 pour voir si elles présentent des lacunes par rapport au niveau recommandé par l'AIEA avant d'entamer la construction de nouveaux réacteurs. Lorsque des lacunes apparaissent, l'AIEA peut aider les pays qui développent leur programme électronucléaire

dans des domaines tels que les chaînes d'approvisionnement, les réseaux énergétiques, les ressources humaines et d'autres aspects de l'infrastructure au sens large.

L'adaptabilité et la polyvalence de l'approche par étapes sont d'autant plus pertinentes au regard des prévisions annuelles de l'AIEA sur l'électronucléaire, lesquelles prévoient une augmentation significative de la capacité nucléaire installée pour atteindre 890 gigawatts (GW) d'ici 2050, ce qui souligne la contribution potentielle de la filière à l'objectif de neutralité carbone. La tendance devrait s'accroître : les dirigeants de 22 pays de quatre continents se sont réunis le 2 décembre 2023 pour annoncer la signature d'une déclaration visant à faire progresser l'objectif mondial de tripler la capacité mondiale d'énergie d'origine nucléaire d'ici 2050. Une trentaine de pays participeront au tout premier Sommet de l'énergie nucléaire, qui se tiendra à Bruxelles en mars 2024 et sera coprésidé par le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et le Premier Ministre belge, Alexander De Croo, ce qui souligne le nouvel élan donné à l'électronucléaire.

Grâce à son adaptabilité et sa polyvalence, l'approche par étapes continuera à jouer un rôle important dans tout ce qui touche à l'avenir de l'énergie nucléaire et à sa contribution essentielle à la résolution des enjeux mondiaux, tels que la réduction de la consommation de combustibles fossiles et le renforcement de la sécurité énergétique.

« L'élaboration d'un projet d'infrastructure d'une telle ampleur représente un défi pour les pays primo-accédants et l'approche par étapes propose une structure formelle complète pour y parvenir. »

– Seth Kofi Debrah,
Commission ghanéenne de
l'énergie atomique

es de l'AIEA

Atoms4NetZero, une initiative de l'AIEA pour aider les pays à mettre la puissance du nucléaire au service de l'objectif zéro émission nette

Par Jeffrey Donovan

L'objectif zéro émission nette passe par une série de choix complexes. Les décideurs doivent tracer une trajectoire énergétique en fonction des ressources disponibles, des technologies énergétiques (y compris celles encore en cours de développement) et des coûts. L'initiative Atoms4NetZero (L'atome au service de l'objectif zéro émission nette) s'appuie sur des modélisations avancées de scénarios énergétiques pour aider les pays à prendre des décisions scientifiquement fondées sur tout ce que l'énergie nucléaire peut offrir – au-delà de la génération d'électricité – dans la transition vers l'objectif zéro émission nette de gaz à effet de serre (GES).

« La première étape pour un pays qui souhaite atteindre cet objectif est de faire le point sur son infrastructure énergétique existante, notamment ses sources d'énergie, ses réseaux de transmission et ses habitudes de consommation », explique Henri Paillère, chef de la Section de la planification et des études économiques de l'AIEA. « En analysant les données passées et présentes et en modélisant la demande énergétique future, les décideurs peuvent recenser les points à améliorer et définir les priorités en matière d'investissement pour construire des systèmes énergétiques propres et résilients. »

De plus en plus de pays envisagent d'adopter ou de développer l'électronucléaire ou ont déjà sauté le pas. À la COP28 à Dubaï, plus de 20 pays se sont engagés à tripler la capacité nucléaire pour atteindre l'objectif zéro émission nette. À l'heure actuelle, on compte environ 60 réacteurs nucléaires de puissance en construction dans 17 pays, pour une capacité totale d'environ 60 gigawatts électriques (GWe). Plus d'un tiers d'entre eux sont situés

en Chine, premier constructeur mondial en la matière. Selon l'Agence internationale de l'énergie, si nous voulons concrétiser l'objectif zéro émission nette, la capacité nucléaire mondiale devra plus que doubler d'ici 2050 – ce qui correspondrait à l'hypothèse haute des projections annuelles de l'AIEA concernant l'électronucléaire à cet horizon.

Pour autant, il faudra plus que de l'électricité propre pour atteindre l'objectif zéro émission nette. Il faudra également utiliser des vecteurs caloriques et énergétiques bas carbone comme l'hydrogène pour décarboner les secteurs aux émissions difficiles à réduire, tels que les industries pétrochimique et sidérurgique, l'industrie du ciment et les transports, qui, pris ensemble, représentent près de 60 % des émissions de GES.

L'initiative Atoms4NetZero évalue le potentiel du nucléaire en vue d'établir des scénarios crédibles pour atteindre cet objectif. Pour ce faire, on utilise des outils d'analyse de l'AIEA comme le Modèle pour l'étude de stratégies d'approvisionnement énergétique de substitution et de leur impact général sur l'environnement (MESSAGE), qui couvre à la fois les technologies et les combustibles pour aider à construire des « chaînes énergétiques » permettant de cartographier les flux d'énergie de l'offre (extraction des ressources) à la demande (services énergétiques). Parmi les autres outils de modélisation utilisés figurent le Modèle pour l'analyse de la demande d'énergie, qui recense les changements structurels nécessaires pour parvenir au zéro émission nette, et le Cadre de modélisation des systèmes énergétiques, qui examine le rôle et quantifie la valeur des technologies énergétiques propres,

ZERO EMISSIONS

dont le nucléaire, dans la planification et l'exploitation des systèmes énergétiques.

La stratégie de modélisation des scénarios énergétiques suivie dans le cadre de l'initiative Atoms4NetZero se distingue nettement des pratiques mondiales actuelles. « Jusqu'à présent, l'énergie nucléaire n'avait qu'un rôle limité dans les études de scénarios énergétiques utilisées par les gouvernements et les investisseurs pour planifier la transition vers l'objectif zéro émission nette », explique Carolynn Scherer, cheffe de la Section de l'AIEA chargée du Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants. « Cette initiative vise à combler cette lacune en donnant une image plus complète du potentiel de l'énergie nucléaire, laquelle a déjà fait ses preuves en matière d'atténuation des causes des changements climatiques et d'adaptation à ses conséquences, mais également en matière d'amélioration de la sécurité énergétique et de développement durable. »

Bien entendu, les sources renouvelables variables comme l'éolien et le solaire sont appelées à jouer un rôle central dans la transition vers des systèmes énergétiques propres. Ici aussi, les modélisations énergétiques d'Atoms4NetZero peuvent se révéler essentielles, et aider les décideurs à intégrer au mieux les renouvelables dans le bouquet énergétique grâce à l'évaluation de la disponibilité des ressources, d'une part, et des effets sur la stabilité du réseau, d'autre part. « En associant le nucléaire aux renouvelables, les pays peuvent créer un système énergétique plus sécurisé, résilient et durable », indique M. Paillère.

« Les scénarios de modélisation énergétique envisagés dans le cadre de l'initiative Atoms4NetZero sont importants car, en particulier en Afrique, nous faisons face à un grave déficit énergétique et nos décideurs envisagent différentes options », explique Enobot Agboraw, Secrétaire exécutif de la Commission africaine de l'énergie nucléaire. « Ils s'intéressent à la fois à l'électronucléaire et aux énergies renouvelables, et il est très important qu'ils soient bien informés pour prendre les meilleures décisions possibles. Grâce aux modélisations énergétiques, ils peuvent fonder leurs décisions sur des données scientifiques, et non sur des rumeurs ou des sentiments, pour nous permettre de réussir à relever les défis des changements climatiques et du déficit énergétique. »

L'initiative Atoms4NetZero s'appuie sur les travaux bien établis que l'AIEA a menés avec les pays sur la planification énergétique

technologiquement neutre, une stratégie visant à évaluer et à choisir de façon impartiale les sources d'énergie sur la base de leurs performances. Dans le cadre de son programme de coopération technique, l'AIEA facilite la planification énergétique des pays grâce à des outils de modélisation tels que le modèle MESSAGE ou le modèle de test de planification des systèmes. Depuis 2021, l'AIEA s'emploie avec l'Agence internationale pour les énergies renouvelables à aider l'Union africaine à élaborer une stratégie de développement de l'infrastructure énergétique, connue sous le nom de Plan directeur pour les systèmes électriques continentaux. L'idée est de permettre aux pays africains de comparer différents scénarios énergétiques et de mutualiser les ressources pour investir dans des sources d'énergie durables et ainsi résoudre les problèmes énergétiques croissants du continent.

L'initiative Atoms4NetZero permettra en outre de réaliser des analyses et des études technico-économiques (par exemple, une analyse comparative des sources d'énergie bas carbone pour un pays ou une région), éventuellement en collaboration avec des parties prenantes telles que les pays, les utilisateurs finaux, les organismes de recherche, l'industrie, les établissements financiers et d'autres organisations et agences internationales. L'initiative vise également à aider les pays concernant d'autres aspects de leur transition vers des énergies propres, notamment en proposant un service consultatif, des ateliers et des formations pour le renforcement des capacités, la sensibilisation du public et la participation des parties prenantes.

Les acteurs de l'initiative travaillent actuellement avec des chercheurs estoniens pour intégrer des contraintes strictes en matière de carbone dans le modèle national MESSAGE visant à assurer une production d'électricité et de chaleur à zéro émission nette à l'horizon 2050. L'Estonie, dont la production d'électricité provient essentiellement de combustibles fossiles, envisage d'adopter l'électronucléaire, et notamment des petits réacteurs modulaires.

IAEA

ATOMS 4 NET ZERO

L'initiative Atoms4NetZero aide les pays à prendre des décisions scientifiquement fondées pour exploiter tout le potentiel de l'énergie nucléaire.



Scannez ce code QR
pour en savoir plus

ION NETTE

Normes de réussite :

une initiative de l'AIEA vise à accélérer le déploiement des PRM

Par Matt Fisher, Pekka Pyy et Brett Rini

Alors que la communauté mondiale s'efforce d'atteindre les objectifs ambitieux fixés dans l'Accord de Paris de 2015, le consensus qui se dégage de plus en plus clairement est que l'énergie nucléaire a un rôle important à jouer dans la décarbonation des secteurs énergétiques et industriels. Toutefois, pour déployer l'électronucléaire à plus grande échelle, notamment grâce à des technologies avancées telles que les petits réacteurs modulaires (PRM), il faut appliquer des stratégies innovantes si l'on veut mettre en œuvre des projets de nouvelles constructions de façon durable, sans dépasser les coûts prévus et en garantissant un niveau élevé de sûreté et de sécurité.

Lancée en 2022, l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI) de l'AIEA vise à faciliter le déploiement de PRM et d'autres réacteurs avancés sûrs et sécurisés grâce à l'harmonisation des approches réglementaires et à la mise en place de normes industrielles.

Pour ce qui est des normes de mise au point, de fabrication et de construction, les membres du volet industriel de la NHSI devraient publier deux livres blancs dans le courant de l'année : l'un fournissant des orientations sur les défis liés à l'harmonisation des inspections des composants de haute intégrité importants en matière de sûreté, et l'autre soulignant la nécessité de mieux harmoniser les codes et les normes non nucléaires des différentes juridictions. En outre, un troisième livre est prévu et devrait porter sur les mesures concrètes qui permettront de nouer le plus tôt possible un dialogue sur l'utilisation de composants industriels de haute qualité dans les systèmes de sûreté. Les membres du volet réglementaire de la NHSI, qui se consacrent à l'élaboration de processus permettant d'améliorer la coopération en matière de réglementation, préparent actuellement une publication exhaustive qui vise à faciliter la coopération en ce qui concerne les examens de la conception et lancent un processus d'examen réglementaire multinational qui permettra aux organismes de réglementation de mener des examens conjoints portant sur la conception des PRM.

Vers une efficacité accrue

Les PRM sont conçus pour être fabriqués en usine puis assemblés sur place, ce qui permet de réduire les coûts et les délais de construction, et du fait de leur taille relativement petite, de l'ordre de 300 mégawatts électriques (MWe) par tranche, ils peuvent être déployés dans des régions qui ne se prêtent pas à l'installation de grands réacteurs. Toutefois, les spécificités de nombreux composants nucléaires peuvent entraîner des engorgements dans la chaîne d'approvisionnement, car la fabrication de pièces sur mesure associée aux procédures d'inspection connexes actuelles peut allonger considérablement le processus de production.

En passant à un modèle de réacteur conçu à partir de pièces produites en série et en harmonisant les prescriptions entre les organismes de réglementation et les utilisateurs finaux de différentes juridictions, il serait possible de réduire considérablement le temps et les efforts nécessaires à la mise en service de PRM et d'autres réacteurs avancés.

« L'obtention de l'autorisation d'utiliser des technologies sur mesure est un processus difficile et souvent long, car actuellement, les organismes de réglementation nucléaire n'autorisent pas l'utilisation de composants industriels non nucléaires standard pour des applications de sûreté dans des installations nucléaires », explique Matheus Abbt, conseiller principal en technologie nucléaire de la compagnie d'électricité suédoise Vattenfall. « L'alignement des prescriptions de sûreté nucléaire sur les normes industrielles pertinentes pourrait contribuer à résoudre les difficultés rencontrées dans la chaîne d'approvisionnement et permettre un déploiement plus rapide des PRM. »

Rationaliser le processus

Parmi les autres sources de préoccupation figurent les différences dans les protocoles d'inspection pour les articles à long délai de livraison ou la production d'articles dont les délais de production sont suffisamment longs pour avoir une incidence sur la date de livraison finale du projet. Les cuves sous pression, par exemple, doivent généralement être

IAEA

NUCLEAR
HARMONIZATION
STANDARDIZATION
INIATIVE

La NHSI vise à faciliter le déploiement de PRM et d'autres réacteurs avancés sûrs et sécurisés par la mise en place d'approches réglementaires harmonisées et par la normalisation industrielle.



Scannez ce code QR pour en savoir plus



inspectées par le client final avec la participation des organismes de réglementation ou de leurs organismes notifiés, et ce, à chaque phase de fabrication depuis la sélection des matériaux. Outre que cela entraîne une charge considérable en termes de délai, cela peut aboutir à des inspections potentiellement redondantes. En revanche, l'achèvement d'un processus rationalisé bien avant le dépôt d'une demande de permis de construire permettrait une mise en œuvre plus rapide des projets de PRM.

« Grâce à la reconnaissance mutuelle de certaines activités d'inspection d'articles à long délai de livraison, il serait possible de réduire considérablement la durée des projets et les risques liés à la fabrication », estime Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « Cela pourrait s'avérer particulièrement utile en cas d'augmentation de la production et de fabrication simultanée d'articles de PRM à long délai de livraison destinés à être utilisés dans des juridictions différentes. Il y a là une excellente occasion d'optimiser les ressources. »

Les centrales nucléaires sont soumises à un large éventail de réglementations, dont beaucoup ne sont pas du ressort des organismes de réglementation nucléaire. Lors d'une réunion technique qui s'est tenue fin 2023, un groupe de travail du volet industriel de la **NHSI** a examiné de possibles solutions aux problèmes posés par les codes et normes non nucléaires. Parmi les propositions examinées figurait le fait d'encourager les propriétaires et les exploitants à se mettre très tôt en contact avec les organismes gouvernementaux concernés et de collaborer le plus tôt possible avec les fournisseurs pour renforcer la chaîne d'approvisionnement en réduisant les risques commerciaux et les risques liés à la gestion de projet et à la gestion de la qualité qui pourraient exister dans les régions de déploiement envisagées. En outre, il est essentiel de comprendre la dynamique d'approvisionnement et de veiller au respect des réglementations locales et nationales pour que les projets soient menés à terme dans les délais et le budget impartis.

Un cadre mondial pour l'examen de la réglementation

L'ambition à long terme du volet réglementaire de la **NHSI** est de parvenir à la mise en place d'un cadre mondial régissant l'examen de la réglementation des modèles de réacteurs nucléaires avancés, et en particulier des PRM. Ce cadre mondial pourrait se présenter sous la forme d'un ensemble de documents et de procédures décrivant les prescriptions réglementaires communes et permettant de comprendre ce qu'il faut faire pour les respecter, ce qui permettrait d'entreprendre des examens réglementaires conjoints des réacteurs avancés. Ce cadre mondial faciliterait également la mise en commun des examens et des ressources ainsi que la production de résultats d'examen communs.

« La première étape de l'élaboration d'un tel cadre implique que les organismes de réglementation coopèrent les uns avec les autres lors des examens réglementaires des modèles de réacteurs avancés. Des

stratégies de collaboration relatives aux examens réglementaires ont été élaborées dans le cadre du volet réglementaire de la **NHSI**. Elles sont le fruit du travail d'experts des organismes de réglementation, et tiennent compte du retour d'expérience de l'industrie », déclare Anna Bradford, directrice de la Division de la sûreté des installations nucléaires de l'AIEA.

Dans le cadre du volet réglementaire de la **NHSI**, on cherche des solutions qui permettraient aux organismes de réglementation de mettre en commun les informations lors des examens, et il est prévu de rédiger un protocole de coopération – un accord global et non contraignant qui démontrerait la volonté des organismes de réglementation signataires de travailler ensemble et de mettre en commun les informations. En outre, toujours dans le cadre du volet réglementaire, des travaux sont en cours pour mettre au point un examen réglementaire multinational de la conception préalable à l'autorisation qui permettrait aux organismes de réglementation d'évaluer conjointement les domaines techniques spécifiques d'un modèle de réacteur proposé et de recenser les questions techniques susceptibles de présenter des difficultés ou de soulever des questions au cours de l'évaluation réglementaire nationale ultérieure. Ce processus permettrait aux participants de recenser les domaines dans lesquels il existe des différences réglementaires importantes entre les pays, ainsi que ceux dans lesquels des efforts supplémentaires seraient nécessaires pour contribuer à la normalisation de la conception.

En outre, dans le cadre de la **NHSI**, des travaux sont en cours pour élaborer des processus qui permettraient aux organismes de réglementation de collaborer dans le cadre d'exams nationaux et de tirer parti des examens d'autres organismes de réglementation, ce qui signifierait une économie de ressources pour les organismes de réglementation et les industriels.

Ainsi, la **NHSI** poursuit son objectif qui consiste à maximiser sa contribution dans les efforts visant à atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 : ses travaux progressent comme prévu et les conclusions des volets industriel et réglementaire seront présentées lors de la séance plénière de la **NHSI** en juin et à la Conférence internationale sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications de l'AIEA, qui se tiendra à Vienne en octobre 2024.

Mise en valeur des ressources humaines dans le secteur nucléaire pour un avenir à zéro émission nette

Par Matt Fisher

La mise en valeur des ressources humaines est fondamentale pour assurer la durabilité et l'expansion à long terme de l'électronucléaire. Or il s'agit de l'un des défis les plus importants auxquels ce secteur fait face en raison des fortes exigences pesant sur le personnel.

Pour contribuer à la constitution et au maintien des effectifs nécessaires à l'expansion de l'électronucléaire à l'échelle envisagée, l'AIEA propose des initiatives de renforcement des capacités telles que les sessions de l'École de gestion des connaissances nucléaires, des programmes de formation à la planification stratégique, des visites d'aide et des bourses. Ces initiatives visent à former la prochaine génération de professionnels et à renforcer les compétences des effectifs actuels pour que l'électronucléaire continue à progresser dans le monde entier alors que nous nous efforçons d'atteindre notre objectif zéro émission nette.

Le secteur de l'énergie d'origine nucléaire continue d'évoluer, tout comme les difficultés auxquelles il fait face. Selon un rapport de l'AIEA publié en 2023, les membres du personnel des installations nucléaires sont généralement plus âgés que ceux d'autres grandes installations industrielles, ce qui souligne l'accent à mettre sur la rétention des connaissances, au moment où de plus en plus d'employés de longue date approchent de l'âge de la retraite. Les technologies complexes associées aux centrales nucléaires nécessitent des processus de formation du personnel plus longs et les activités ayant trait à l'énergie nucléaire requièrent des niveaux de supervision extrêmement élevés. Dès lors, il convient de disposer de processus solides de mise en valeur des ressources humaines pour résoudre ces problèmes, entre autres choses.

« Il est absolument vital pour l'expansion de l'électronucléaire que le renforcement des capacités soit pensé comme un processus continu et de plus en plus pointu », déclare Mikhaïl Chudakov, Directeur général adjoint de l'AIEA et Chef du Département de l'énergie nucléaire. « Grâce à

l'expérience considérable qu'elle a acquise depuis plus de soixante-dix ans, l'AIEA est bien équipée pour aider ses États Membres à mettre en valeur les ressources humaines dont ils ont besoin pour atteindre leurs objectifs ambitieux en matière d'électronucléaire. »

Il est impératif de gérer efficacement les connaissances pour conserver le savoir acquis au fil des ans dans des domaines tels que la conception, l'octroi d'autorisation et l'exploitation, car ce savoir est indispensable au maintien et au renforcement des compétences. L'École de gestion des connaissances nucléaires est un cours spécialisé d'une semaine qui allie formation théorique et pratique sur la mise en œuvre de programmes de gestion des connaissances nucléaires dans les organismes scientifiques et technologiques du secteur. Couvrant des domaines tels que les principes fondamentaux de la gestion des connaissances, les orientations pratiques et les meilleures pratiques, l'École s'adresse aux jeunes professionnels de la gestion des connaissances ; différentes sessions ont été accueillies par plusieurs États Membres, la dernière en date s'étant tenue en 2023 à l'Université A&M du Texas (États-Unis d'Amérique). L'année 2024 marque le 20^e anniversaire de l'École de gestion des connaissances nucléaires organisée conjointement par l'AIEA et le Centre international Abdus Salam de physique théorique. À ce jour, 1 139 professionnels ont été formés à l'École de gestion des connaissances nucléaires.

Le service de visite d'aide à la gestion des connaissances propose des examens réalisés par des experts aux États Membres qui souhaitent mettre en œuvre un programme de gestion des connaissances ou améliorer le leur. Les visites sont adaptées au niveau de maturité du programme de gestion des connaissances concerné et les experts peuvent fournir des conseils stratégiques, une formation spécialisée et d'autres formes de soutien.

Les équipes performantes sont toujours dirigées par des responsables motivés et tournés vers l'avenir. Épaulé par le programme de coopération technique (CT) de l'AIEA, le



programme de l'École de gestion de l'énergie nucléaire aide les dirigeants actuels et futurs du secteur de l'énergie nucléaire à mettre à profit leurs propres talents et à tirer le meilleur parti de leurs équipes. Le programme, qui s'étale sur deux semaines de cours conçus pour les jeunes professionnels présentant une aptitude à diriger, comprend des exposés, des visites techniques et des études de cas qui contribuent au renforcement des compétences techniques et des compétences d'encadrement et à la diffusion des connaissances de l'AIEA dans les domaines se rapportant au cycle de vie de l'énergie nucléaire. En novembre 2023, le Ministère des mines de l'Afrique du Sud a accueilli une session de l'École de gestion de l'énergie nucléaire, la 52^e session depuis le lancement du programme en 2010. Depuis 13 ans, plus de 2 000 personnes provenant de diverses disciplines ont consolidé leurs compétences professionnelles grâce à ce programme et près de la moitié des participants aux sessions organisées en 2023 étaient des femmes.

« J'ai eu l'occasion de découvrir les différentes technologies qui contribuent à l'objectif zéro émission nette, notamment l'électronucléaire, et j'ai beaucoup appris sur l'intégration de la culture de sûreté et du leadership dans une organisation », déclare Zeridah Kimanywenda, ingénieure civile au Ministère de l'énergie et du développement minier de l'Ouganda ayant participé à la session de l'École de gestion de l'énergie nucléaire organisée en Afrique du Sud en novembre dernier. « Le contenu est très pertinent et utile par rapport à mes fonctions. »

Bien que les femmes aient réalisé certaines des percées scientifiques les plus révolutionnaires de l'histoire, elles restent sous-représentées dans la plupart, voire la totalité des domaines techniques, y compris le nucléaire. Pour renverser la situation, l'AIEA a lancé le programme de bourses Marie Skłodowska-Curie (MSCFP) en 2020 et le programme Lise Meitner en 2023. Le MSCFP encourage les jeunes femmes à entamer une carrière dans le domaine nucléaire en offrant aux candidates retenues des bourses leur permettant de suivre des programmes de master et la possibilité d'effectuer un stage à l'AIEA ou dans un organisme partenaire. En 2023, 200 bourses ont été attribuées, soit le nombre le plus élevé de tous les cycles de demandes d'admission à ce jour. Le programme Lise Meitner offre aux femmes en début ou en milieu de carrière la possibilité de renforcer leurs compétences en effectuant des visites professionnelles de plusieurs semaines. Les visites durent généralement deux à quatre semaines et peuvent comprendre l'élaboration et la mise en œuvre de projets, ainsi que des tâches et des échanges techniques.

Outre ces programmes, l'AIEA aide chaque année plus d'un millier de boursiers de la coopération technique et de visiteurs scientifiques dans le cadre de son programme de CT. Étant le principal mécanisme par lequel l'AIEA contribue au développement des États Membres, le programme de CT – qui est axé sur les résultats et adapté aux difficultés particulières rencontrées par les pays et les régions – vise à faciliter la coopération entre les pays afin de renforcer durablement les capacités, notamment grâce à la coopération Sud-Sud.

La formation des professionnels de demain dans le domaine de l'énergie nucléaire passe par des programmes d'enseignement spécifiques. Créé en 2013, le système de l'Académie internationale de la gestion nucléaire (INMA) aide les universités à concevoir et à faire fonctionner des programmes de master en gestion de la technologie nucléaire pour le secteur nucléaire (programmes électronucléaires, applications nucléaires et technologies radiologiques). Les programmes portent à la fois sur des aspects avancés de la gestion et de l'encadrement et sur les technologies nucléaires, offrant une formation de haut niveau et un soutien aux futurs dirigeants du secteur nucléaire. Les bons résultats obtenus dans le cadre des missions d'examen par des pairs de l'AIEA dans les universités candidates débouchent sur l'approbation par l'INMA du programme diplômant. En 2024, dix universités de huit pays font partie de ce système.

Enfin, l'AIEA gère la Cyberplateforme d'apprentissage pour la formation théorique et pratique en réseau (CLP4NET), une mine de ressources d'apprentissage en ligne accessibles au public. La plateforme contient plus de 1 400 cours et près de 200 webinaires couvrant un large éventail de sujets dans le domaine de l'énergie nucléaire et permet aux utilisateurs de choisir entre l'auto-apprentissage ou l'apprentissage dirigé.

Pour contribuer à la constitution et au maintien des effectifs nécessaires à l'expansion de l'électronucléaire à l'échelle envisagée, l'AIEA propose des initiatives de renforcement des capacités telles que les sessions de l'École de gestion des connaissances nucléaires, des programmes de formation à la planification stratégique, des visites d'aide et des bourses.

ON NETTE

Ce que la déclaration sur l'énergie nucléaire de la COP28 signifie pour les activités de vérification de l'AIEA

Par Eva Morela Lam Redondo

Le 2 décembre 2023, lors de la 28^e Conférence annuelle des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28), des représentants d'une vingtaine de pays ont signé ensemble la Déclaration relative au triplement de la production d'énergie nucléaire, avec pour but d'atteindre cet objectif d'ici 2050. Alors que le monde est impatient d'exploiter les avantages de l'énergie nucléaire, le triplement de la capacité nucléaire mondiale contribuera à une autre tendance mondiale : l'augmentation constante des volumes de matières nucléaires et du nombre d'installations soumises à la vérification nucléaire de l'AIEA.

L'AIEA remplit sa mission de vérification nucléaire en appliquant des mesures techniques communément appelées « garanties » nucléaires. Ces mesures permettent à l'AIEA de vérifier de manière indépendante que les États respectent leurs obligations internationales de n'utiliser les matières nucléaires qu'à des fins pacifiques.

« Entre 2010 et 2022, nous avons constaté une augmentation de 34 % de la quantité de matières nucléaires et de 15 % du nombre d'installations nucléaires et d'emplacements hors installation soumis aux garanties de l'AIEA », déclare Massimo Aparo, Directeur général adjoint de l'AIEA et Chef du Département des garanties. « La Déclaration relative au triplement de la production d'énergie nucléaire accélérera encore ces tendances. L'AIEA est prête à relever ce défi et à continuer à tirer des conclusions sur l'utilisation pacifique des matières nucléaires, mais cela nécessitera des échanges et une coopération soutenue avec toutes les parties prenantes et l'adoption de technologies de vérification innovantes. »

Ses services étant de plus en plus sollicités, le Département des garanties de l'AIEA s'efforce en permanence, pour répondre à la demande, d'accroître l'efficacité et l'efficience des garanties de l'AIEA. En outre, l'AIEA est légalement tenue, en vertu des accords de garanties généralisées, de prendre pleinement en compte les évolutions technologiques touchant aux garanties. Récemment, par exemple, des travaux d'exploration et d'exploitation de l'intelligence artificielle et de la robotique ont été menés dans le cadre des processus de vérification nucléaire.

Pour se tenir au courant des nouvelles technologies ayant des applications potentielles prometteuses pour les garanties, l'AIEA travaille avec ses programmes d'appui

d'États Membres (PAEM), ce qui lui permet de bénéficier d'un appui sous diverses formes, notamment en matière de R-D, de mise en commun des connaissances, de transfert de technologie, de collaboration d'experts et de soutien financier.

Le dispositif d'observation de l'effet Tcherenkov de nouvelle génération est un résultat notable et tangible des efforts de conception d'instruments pour les garanties que déploie l'AIEA, et de la facilitation par les PAEM des essais sur le terrain. Le dispositif améliore considérablement l'efficience de la vérification et la qualité des données des images prises par les inspecteurs des garanties de l'AIEA pour vérifier la présence et l'intégrité des matières nucléaires dans les piscines d'entreposage du combustible usé. En 2023, le dispositif a été utilisé pour la plus grande campagne de vérification du combustible usé de l'histoire de l'AIEA. Il a permis de multiplier par huit l'efficience de la procédure de vérification du combustible nucléaire usé par rapport aux méthodes précédentes.

L'application des garanties est le fruit d'une collaboration entre l'AIEA et les États. À cette fin, l'AIEA aide également les États à renforcer les connaissances et les capacités de leurs autorités nationales chargées de l'application des garanties (ANR) et de leurs systèmes respectifs de comptabilité et de contrôle des matières nucléaires (SNCC). Pour ce faire, l'AIEA dispose de divers mécanismes d'assistance, notamment des missions de service consultatif, des formations, des modules d'apprentissage en ligne et des webinaires, une assistance juridique et réglementaire et le programme de stages dans le domaine des garanties. L'intégration de l'Initiative globale de création de capacités de l'AIEA pour les SNCC et les ANR (COMPASS) au dispositif d'assistance aux États de l'AIEA en matière de garanties constitue une évolution importante dans ce domaine. Lancée en 2020, et bénéficiant d'un soutien à la fois financier et en nature de la part des États Membres de l'AIEA, l'initiative COMPASS permet à l'Agence de s'associer aux États pour les aider à renforcer l'efficacité de leurs ANR et de leurs SNCC. COMPASS constitue une entreprise pluriannuelle qui vise à renforcer durablement les capacités des États en leur proposant un soutien adapté à leurs besoins spécifiques dans les domaines de l'information active des parties prenantes, de la formation au niveau national, des logiciels, des questions juridiques et réglementaires et des ressources humaines.

La Déclaration relative au triplement de la production d'énergie nucléaire traduit un engagement collectif à faire progresser l'énergie nucléaire dans le cadre d'un avenir durable et axé sur la sobriété en carbone. Cet objectif ambitieux implique aussi une augmentation de la quantité de matières nucléaires et du nombre d'installations soumises aux garanties de l'AIEA.

« L'initiative COMPASS a changé la donne pour la Malaisie. Elle nous a vraiment aidés à repérer les lacunes dans l'application des garanties », déclare Nurul Hafiza binti Mohamed Aliasrudin, directrice adjointe de la Division des installations nucléaires au Département de l'énergie atomique de la Malaisie. « En deux ans, COMPASS nous a aidés à revoir la réglementation en matière de garanties, à élaborer des directives techniques et des critères d'autorisation, ainsi qu'à mieux former le personnel de l'autorité nationale chargée des garanties. »

L'AIEA se tourne également vers l'avenir : dans le cadre de l'intégration des garanties dans la conception, elle fournit des orientations aux autorités étatiques, aux concepteurs, aux fournisseurs d'équipements et aux acheteurs potentiels sur l'importance de prendre en compte les garanties internationales lors de la conception d'une installation ou d'un processus nucléaire. Meilleure pratique facultative, l'intégration des garanties dans la conception permet de faire des choix de conception éclairés qui optimisent les facteurs économiques et opérationnels ainsi que les facteurs liés à la sûreté et à la sécurité, tout en tenant compte des garanties internationales. Elle s'applique à tous les aspects du cycle du combustible nucléaire, de la planification et de la conception initiales à la construction, l'exploitation, la gestion des déchets et le déclassé. Pour les

nouvelles installations nucléaires, en particulier les conceptions ou procédés innovants, il est préférable que les discussions sur les garanties aient lieu le plus tôt possible. L'intégration des garanties dans la conception permet que les garanties soient intégrées à la conception au lieu de devoir s'y adapter.

La Déclaration relative au triplement de la production d'énergie nucléaire traduit un engagement collectif à faire progresser l'énergie nucléaire dans le cadre d'un avenir durable et axé sur la sobriété en carbone. Cet objectif ambitieux implique aussi une augmentation de la quantité de matières nucléaires et du nombre d'installations soumises aux garanties de l'AIEA. Soucieux d'utiliser des technologies de pointe et de coopérer avec les États qui cherchent à augmenter leur production d'énergie nucléaire et ceux qui débutent tout juste dans ce domaine, le personnel de l'AIEA chargé des garanties est prêt à répondre aux demandes de plus en plus importantes de la communauté internationale au moment où le monde entier cherche à atteindre l'objectif zéro émission nette.



L'AIEA lance un projet de recherche sur les microplastiques en Antarctique

En janvier, des scientifiques de l'AIEA se sont rendus en Antarctique pour y mesurer l'ampleur de la pollution par les microplastiques.

Ils ont recueilli des échantillons d'excréments de manchots, d'eau et de boue ainsi que des patelles destinés à être envoyés aux laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA à Monaco à des fins d'analyse.

Là-bas, les chercheurs de l'AIEA vont mesurer, à l'aide de techniques nucléaires, la présence de microplastiques – soit les particules de plastique d'un diamètre inférieur à cinq millimètres – dans l'espoir de découvrir la principale source de ce type de pollution.

Bien que la première découverte de microplastiques sur ce continent remonte à 2009 – en Antarctique de l'Est –, il n'existe pratiquement aucune information permettant d'évaluer l'ampleur du problème et d'en déterminer l'origine (vêtements, pneus, bouteilles, processus industriels ou autres).

Il existe très peu de données sur la quantité de plastique absorbée par les organismes de l'Antarctique et sur la manière dont les microplastiques parviennent jusqu'à ce continent (charriés par les courants

océaniques, présents dans les dépôts atmosphériques ou liés à la présence d'êtres humains).



La première expédition de recherche scientifique de l'AIEA en Antarctique, à l'extrême sud de la planète, s'inscrit dans le cadre de la lutte contre ce problème environnemental croissant, qui se pose même aux confins du monde.

La mission est une composante de l'initiative NUTEC Plastics de l'AIEA, qui met la technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique.

Par l'intermédiaire de ses laboratoires de surveillance, le réseau NUTEC Plastics se sert de techniques nucléaires et isotopiques pour échantillonner les microplastiques dans l'environnement et en analyser la prévalence, en vue de produire des données sur leur répartition dans le milieu marin.

Ces données sont particulièrement utiles pour élaborer des systèmes visant à limiter la pollution par le plastique.

Le Président argentin, Javier Milei, et le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, ont rejoint l'équipe scientifique de l'AIEA sur la base antarctique argentine Marambio pour marquer le début de la mission.

Aux yeux du Directeur général de l'AIEA, la découverte de microplastiques dans l'environnement autrefois intact de l'Antarctique montre à quel point ce polluant pernicieux s'est répandu : « Les microplastiques affectent le monde entier. Or, la communauté internationale ne dispose toujours pas des données scientifiques dont elle a besoin pour pouvoir prendre des décisions éclairées à cet égard. C'est là l'objectif de NUTEC Plastics : si nous comprenons l'origine, la trajectoire et les effets des plastiques, nous disposons des informations nécessaires pour traiter le problème. »

Depuis leur création en 1961, les laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA à Monaco apportent aux pays les outils et connaissances indispensables pour comprendre et résoudre les problèmes les plus urgents touchant l'environnement marin. L'AIEA dispose du seul laboratoire de l'environnement marin du système des Nations Unies.

NUTEC Plastics fournit des données scientifiques pour l'évaluation de la pollution marine par les microplastiques et montre comment il est possible de recycler le plastique et de transformer les déchets plastiques en ressources réutilisables à l'aide des rayonnements ionisants.

Pour cette mission d'analyse et de suivi de la présence de microplastiques en Antarctique, l'AIEA travaille en coopération avec l'Argentine.

– Par Katy Laffan

(Photo : K. Laffan/AIEA).

Le Président argentin, Javier Milei, et le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, donnent le coup d'envoi du projet **NUTEC Plastics**, mené en collaboration avec l'Argentine, à la base Marambio en janvier.



Le continent glacé de l'Antarctique est considéré comme l'une des dernières régions vierges de la planète, mais certaines recherches montrent qu'il est déjà lui aussi touché par les microplastiques.

Les scientifiques de l'AIEA tentent de déterminer l'ampleur du phénomène et son origine.



Les scientifiques de l'AIEA ont recueilli des échantillons d'excréments de manchots dans le cadre de leurs recherches consacrées aux effets des microplastiques sur les animaux en Antarctique.



(Photo : M. Klingenboeck/AIEA)

Mise à jour des documents relatifs à l'approche par étapes de l'AIEA pour tenir compte des petits réacteurs modulaires



Une nouvelle version de la publication de l'AIEA intitulée *Étapes du développement d'une infrastructure nationale pour l'électronucléaire* est parue. Le document traite maintenant également des questions propres aux petits réacteurs modulaires (PRM).

Cette publication de l'AIEA vise à fournir des orientations essentielles sur la préparation du lancement d'un programme électronucléaire ou de l'expansion d'un programme existant. La version révisée contient une nouvelle annexe pour couvrir les aspects propres au déploiement des PRM et retrace l'expérience récente de plusieurs pays ayant achevé les trois étapes avec d'autres types de réacteurs que ceux décrits dans l'approche par étapes de l'AIEA ou bien ayant réalisé des progrès importants à cet égard.

Initialement parue en 2007, puis révisée en 2015, cette publication s'inscrit dans la lignée des autres orientations et documents que l'AIEA consacre au

développement de l'électronucléaire en abordant des sujets tels que la sûreté, la sécurité et les garanties nucléaires. On trouvera également dans ce document les enseignements tirés des récentes missions d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) menées dans des pays qui lancent des programmes électronucléaires ou élargissent leurs programmes existants.

Même si, dans les années à venir, les grands réacteurs refroidis par eau devraient toujours représenter la majeure partie des nouvelles capacités, les PRM semblent de mieux en mieux placés pour jouer un rôle important dans la réduction des émissions et dans la promotion d'une prospérité durable. Les PRM étant conçus pour produire au maximum 300 mégawatts électriques (MWe), ils pourraient être particulièrement bien adaptés aux régions isolées ou dotées de petits réseaux électriques. Grâce à la conception modulaire de ces réacteurs, les systèmes et composants peuvent être assemblés en usine, puis acheminés en tant qu'unité vers un lieu d'installation. Cette méthode pourrait contribuer à réduire les délais de construction. Par ailleurs, les possibilités d'applications sont nombreuses : d'une part, de nouveaux utilisateurs finaux, tels que les centres de données, envisagent de recourir à l'énergie d'origine nucléaire pour répondre à leurs besoins croissants en électricité et, d'autre part, de nombreuses applications industrielles doivent être décarbonées. Le déploiement des PRM pourrait être accéléré et ceux-ci pourraient jouer un rôle plus important, en fonction de leur vitesse d'homologation et de préparation à l'exploitation commerciale.

« L'assistance que nous fournissons doit évoluer au même rythme que le paysage de l'énergie d'origine nucléaire. La dernière mise à jour de l'approche

par étapes de l'AIEA intervient à un moment charnière, alors que de plus en plus de pays envisagent d'ajouter l'énergie d'origine nucléaire à leur bouquet énergétique pour atteindre l'objectif zéro émission nette », explique Aline des Cloizeaux, directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA. « Il ne fait aucun doute que les PRM joueront un rôle essentiel dans la transition vers l'énergie propre, et nous devons veiller à ce que les pays qui s'intéressent à cette technologie aient une solide compréhension des étapes à suivre pour mener à bien des projets de PRM. »

Les PRM partagent de nombreuses caractéristiques avec les réacteurs des catégories supérieures. Ils sont constitués de nombreux systèmes analogues et fonctionnent selon les mêmes principes que ceux qui régissent les réacteurs nucléaires depuis des décennies. Les exigences relatives aux PRM sont aussi essentiellement les mêmes que pour les réacteurs traditionnels, à savoir des cadres juridiques et réglementaires solides, une participation proactive des parties prenantes et des considérations relatives à la protection de l'environnement. Mais en raison de leurs caractéristiques uniques, notamment une puissance plus faible et des modèles simplifiés, ils peuvent avoir certaines exigences d'infrastructure particulières.

Certains PRM, en particulier ceux qui utilisent d'autres caloporteurs que l'eau, peuvent produire de nouvelles formes de déchets radioactifs. Les pays qui envisagent de déployer des PRM doivent donc planifier la gestion de ces nouveaux types de déchets. Si de nouveaux types de combustibles sont utilisés, il sera important de mettre en place une chaîne d'approvisionnement pour garantir une disponibilité constante du combustible. Il pourra également être nécessaire

d'élaborer de nouvelles méthodes de contrôle pour tenir compte de certaines caractéristiques de conception novatrices des PRM, en veillant à ne pas entraver les solides mesures de comptabilité et de contrôle des matières nucléaires déjà en place.

Actuellement, une trentaine de pays primo-accédants envisagent de recourir à l'énergie d'origine nucléaire ou progressent dans leur premier projet de construction d'une centrale. Le Bangladesh, l'Égypte et la Türkiye sont en passe de construire leur première

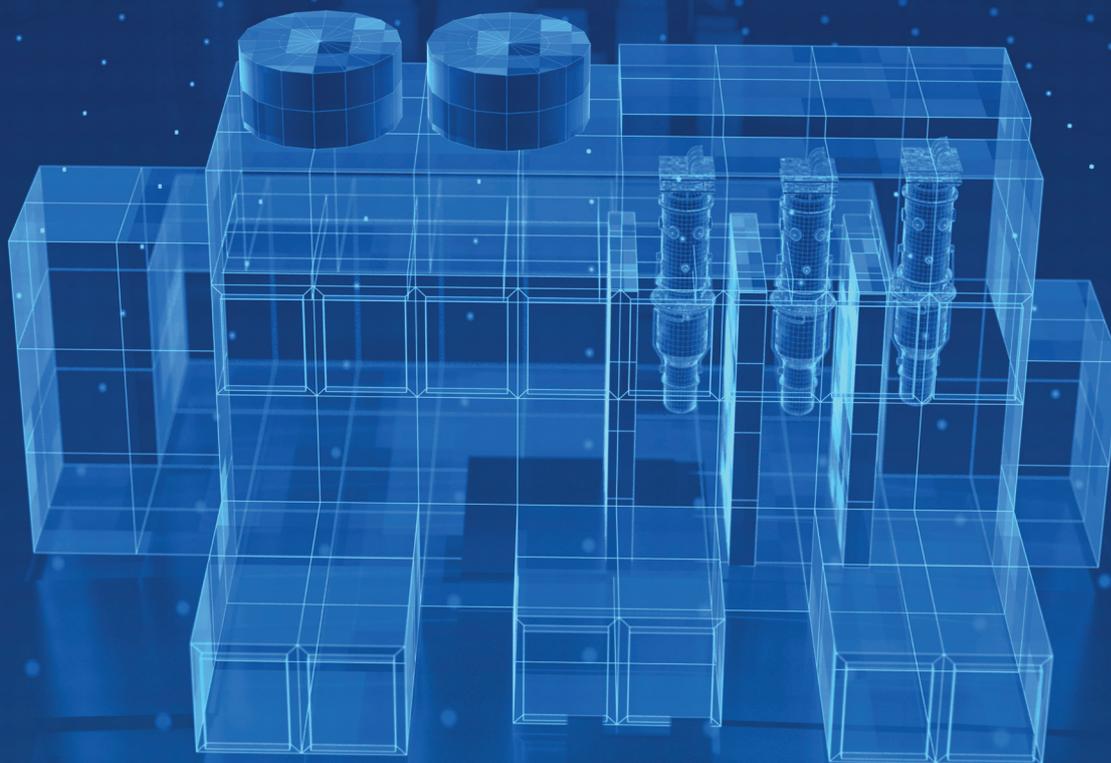
centrale nucléaire et plusieurs autres pays devraient leur emboîter le pas au cours de la prochaine décennie.

Des PRM sont en construction en Argentine, en Chine et en Fédération de Russie, ces deux derniers pays ayant déployé leurs premiers PRM en 2019 et 2021, respectivement. Plusieurs pays primo-accédants, dont l'Estonie, la Jordanie et la Pologne, ont décidé d'intégrer les PRM dans leurs futurs systèmes d'énergie propre. En octobre dernier, une mission INIR axée sur les PRM a été menée en Estonie. De son

côté, la Jordanie étudie la possibilité d'utiliser des PRM pour répondre à ses besoins en matière de dessalement de l'eau de mer, depuis une rencontre avec des experts de l'AIEA en août dernier.

– Par Matt Fisher

Les PRM pourraient être la solution idéale pour les régions isolées ou les régions dotées de petits réseaux électriques.



Le saviez-vous ?

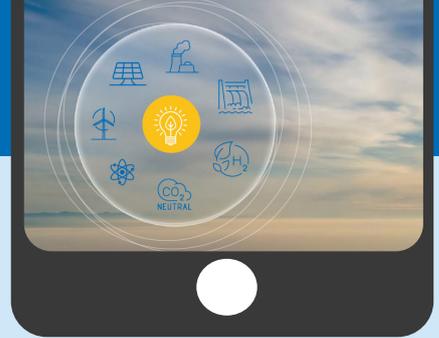
L'énergie nucléaire est à l'origine d'un quart de la production mondiale d'électricité bas carbone.

Scannez et découvrez

le rôle clé que peut jouer l'énergie nucléaire dans les efforts pour atteindre zéro émission nette.



L'énergie nucléaire dans les trajectoires d'atténuation vers l'objectif zéro émission nette



Parcourir toutes les publications de l'AIEA

accessibles gratuitement en ligne



www.iaea.org/publications

Pour commander un ouvrage, veuillez écrire à l'adresse suivante :

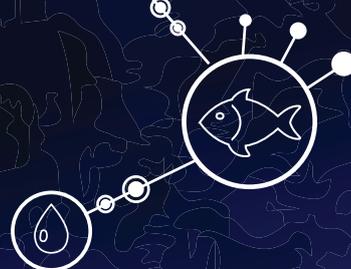
sales.publications@iaea.org

Publications de l'AIEA

Conférence ministérielle sur

la science, les technologies et sur le programme de coopération technique

26-28 novembre 2024
Vienne (Autriche)



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique



CN-328

Faites équipe avec nous

pour un avenir meilleur

L'AIEA invite

les États Membres, les acteurs industriels, les institutions financières et autres parties prenantes à travailler avec elle dans le cadre de ses initiatives phares et à partager leurs compétences spécialisées, leurs outils de modélisation, leurs connaissances industrielles, leurs activités de sensibilisation et leurs ressources financières.

SANTÉ HUMAINE



LES FEMMES DANS LE NUCLÉAIRE



ÉNERGIE



ENVIRONNEMENT



ALIMENTATION ET AGRICULTURE



Pour en savoir plus sur les
initiatives phares
de l'AIEA



IAEA

L'atome pour la paix
et le développement