



**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique

*L'atome pour la paix et le développement*

**Conseil des gouverneurs  
Conférence générale**

**GOV/INF/2025/8-GC(69)/INF/4**

**Distribution générale**

Français

Original : anglais

**Réservé à l'usage officiel**

# **SITUATION ET PERSPECTIVES INTERNATIONALES DE L'ÉLECTRONUCLÉAIRE 2025**

*Rapport du Directeur général*

# Conseil des gouverneurs Conférence générale

**GOV/INF/2025/8-GC(69)/INF/4**  
5 septembre 2025

**Distribution générale**  
Français  
Original : anglais

## Réservé à l'usage officiel

Point 5 de l'ordre du jour provisoire du Conseil  
(GOV/2025/55)

Point 16 de l'ordre du jour provisoire de la Conférence générale  
(GC(69)/1, Add.1, Add.2, Add.3, Add. 4 et Add.5)

# Situation et perspectives internationales de l'électronucléaire 2025

*Rapport du Directeur général*

## Résumé

- Dans sa résolution GC(50)/RES/13, la Conférence générale a prié le Secrétariat de présenter, sur une base biennale, un rapport exhaustif sur la situation et les perspectives internationales de l'électronucléaire à partir de 2008. Dans sa résolution GC(60)/RES/12, datée de septembre 2016, elle a prié le Secrétariat de continuer de publier le rapport sur la situation et les perspectives internationales de l'électronucléaire tous les quatre ans à partir de 2017. Le présent rapport fait suite à la résolution GC(60)/RES/12.



# Situation et perspectives internationales de l'électronucléaire 2025

*Rapport du Directeur général*

## **A. Énergie propre pour le climat et le développement : contexte socio-économique**

### **A.1. Évolution de la situation**

1. De nombreux événements soulignant le rôle de l'électronucléaire dans l'atténuation des changements climatiques et le développement durable sont survenus aux niveaux national et international depuis la publication du rapport intitulé « Situation et perspectives internationales de l'électronucléaire 2021 » (document GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6 et GOV/INF/2021/32/Corr.1-GC(65)/INF/6/Corr.1). La présente section met en évidence certains de ceux ayant le plus de répercussions sur la situation et les perspectives de l'électronucléaire.

#### **A.1.2. Faits nouveaux au niveau international**

2. Le secteur de l'électricité et celui de l'énergie au sens large sont sur le point de subir une transformation complète au cours des prochaines décennies. Pour atteindre la neutralité carbone et limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à bien moins de 2 °C par rapport aux niveaux pré-industriels et poursuivre les efforts pour la limiter à 1,5 °C par rapport à ces mêmes niveaux, conformément à l'Accord de Paris, les investissements dans le secteur de l'énergie doivent être orientés vers des technologies propres et durables. Dans le même temps, la forte augmentation des prix de l'énergie observée en 2022, ainsi que la volatilité des prix, ont placé la question de la sécurité de l'approvisionnement énergétique au cœur des discussions sur la politique énergétique mondiale.

3. De nombreux pays reconnaissent le rôle de l'électronucléaire dans le développement durable et la sécurité énergétique. Les politiques nucléaires ont été mises à jour dans plusieurs pays et l'électronucléaire a été inclus dans les taxonomies de durabilité de l'Union européenne, de la Chine, de la Fédération de Russie, du Japon et de la République de Corée.

4. Un bouquet énergétique diversifié où les sources d'énergie renouvelable variables sont utilisées en conjonction avec une part importante de technologies pilotables bas carbone, telles que l'électronucléaire ou l'énergie hydroélectrique, est essentiel pour parvenir à la décarbonation au coût économique le plus bas et au niveau de fiabilité le plus élevé, et pour minimiser les risques de la transition énergétique.

5. Le passage des combustibles fossiles à des sources d'énergie plus propres peut avoir un impact sur la sécurité énergétique et l'accessibilité financière. Alors que les risques liés à l'approvisionnement en

combustibles fossiles et à la volatilité des prix diminueront, de nouveaux risques liés au recours à des technologies bas carbone, telles que les énergies renouvelables variables, apparaîtront. Ces technologies nécessitent des quantités importantes de minéraux et de matières critiques, qui sont concentrés géographiquement. Les contraintes de la chaîne d’approvisionnement peuvent retarder les investissements dans les infrastructures énergétiques et augmenter les coûts de l’énergie. En outre, les systèmes comportant une part importante d’énergie renouvelable variable deviendront de plus en plus dépendants des conditions météorologiques, ce qui remettra en cause leur capacité de maintenir la stabilité et la fiabilité du réseau pendant les longues périodes de vent faible ou d’absence d’ensoleillement. En revanche, à l’exception des minéraux et matières critiques, la chaîne de valeur des technologies bas carbone peut être implantée au niveau national, ce qui accroît l’autosuffisance des pays importateurs d’énergie.

6. La faible empreinte carbone de l’énergie nucléaire, sa dépendance relativement minime à l’égard de minéraux critiques et sa contribution à la fiabilité du réseau électrique la placent en bonne position pour décarboner le système énergétique. En outre, l’énergie nucléaire est la seule technologie pilotable disponible capable de fournir de la chaleur et de l’électricité bas carbone à grande échelle. Sur la base du cycle de vie, l’empreinte carbone et l’intensité matière par unité de production d’électricité d’origine nucléaire sont parmi les plus faibles de toutes les technologies de production d’électricité. Les centrales nucléaires actuelles peuvent fonctionner à des niveaux de puissance élevés pendant de longues périodes (entre 12 et 24 mois entre les arrêts pour renouvellement du combustible et maintenance), ce qui permet d’assurer la stabilité opérationnelle, si nécessaire. En tant que source pilotable, les centrales nucléaires peuvent être exploitées à un niveau de puissance constant ou la production peut être modulée en fonction des besoins du réseau électrique.

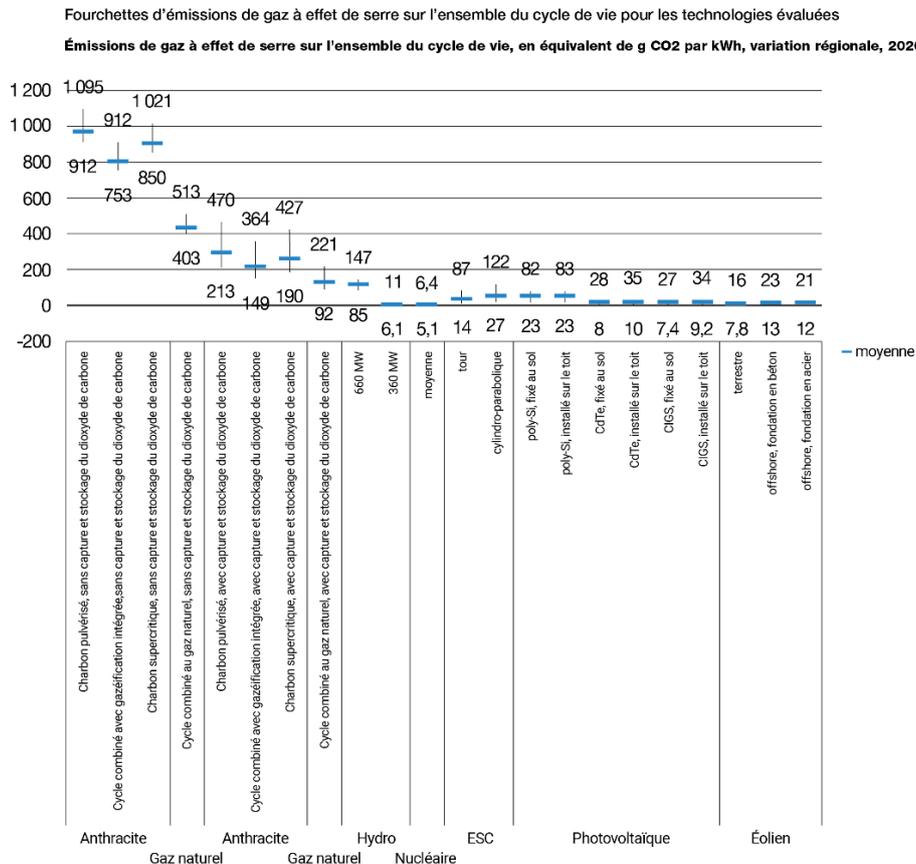


Fig. A.1. Fourchettes d’émissions de gaz à effet de serre sur l’ensemble du cycle de vie pour les technologies évaluées. (Source : CEE-ONU)

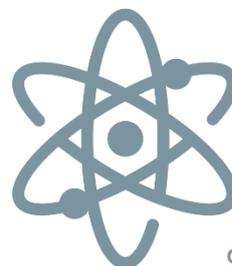
7. Les coûts d'exploitation de l'électronucléaire sont stables, prévisibles dans le temps et relativement insensibles aux fluctuations des prix de l'uranium. Les ressources en uranium sont abondantes et diversifiées à l'échelle mondiale et il existe un potentiel important de découverte de nouvelles ressources, si les conditions du marché sont favorables. Toutefois, même si les ressources devraient être suffisantes pour soutenir les scénarios de développement nucléaire les plus ambitieux, des investissements et une expertise technique importants seront nécessaires pour mettre ces ressources sur le marché. Grâce à la haute teneur en énergie de l'uranium, une grande quantité d'énergie peut facilement être stockée sur le site des centrales nucléaires, protégeant ainsi les producteurs d'électricité d'éventuelles ruptures d'approvisionnement en combustible. L'utilisation de réacteurs à spectre de neutrons rapides avec des cycles fermés du combustible peut aussi répondre à toute préoccupation future concernant la disponibilité de l'uranium.

## B. L'électronucléaire aujourd'hui

8. Comme indiqué dans le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025, fin décembre 2024, la capacité électronucléaire mondiale des 417 réacteurs en exploitation dans 31 États Membres s'établissait à 377 GWe. S'y ajoutaient 19,7 GWe provenant de 23 réacteurs autorisés à être exploités qui sont restés à l'arrêt pendant l'année, à savoir 4 réacteurs en Inde et 19 au Japon.

En 2024, la production totale d'électricité d'origine nucléaire était de 2 617,5 TWh. Les trois premiers producteurs étaient les États-Unis d'Amérique (30 %), la Chine (16 %) et la France (14 %).

9. Fin 2024, 64,5 GWe de capacité nucléaire (62 réacteurs) étaient en construction dans 15 pays, la Chine représentant 46 % de cette expansion. La construction de neuf réacteurs à eau pressurisée a commencé en Chine, en Égypte, en Fédération de Russie et au Pakistan, pour un total de 10,2 GWe. La Chine a lancé la construction de six nouveaux réacteurs, dont quatre HPR1000 et deux CAP1000. La construction du réacteur VVER-1200 El Dabaa-4 a commencé en Égypte, le Pakistan a lancé la construction de Chasnupp-5 (type Hualong-1) et la construction de Leningrad 2-3 a débuté en Fédération de Russie.



Fin décembre 2024, la capacité  
électronucléaire mondiale des

**417** réacteurs en  
exploitation

dans **31** États Membres

s'établissait à **377** GWe

10. Environ 67 % de la capacité mondiale actuelle (254,7 GWe, 284 réacteurs) proviennent de réacteurs en exploitation depuis plus de 30 ans. Par conséquent, les investissements dans des programmes d'exploitation à long terme et de gestion du vieillissement augmentent afin de garantir l'exploitation fiable, sûre et continue du parc existant et une transition en douceur vers de nouvelles capacités.

11. À la fin de 2024, le secteur nucléaire avait accumulé environ 20 200 années-réacteurs d'expérience d'exploitation avec 653 réacteurs à travers le monde. La capacité électronucléaire est restée constante depuis 2021, avec 24,4 GWe connectés au réseau. Plus de 71 % de cette croissance concernent l'Asie, en particulier la Chine, qui a connecté 7,5 GWe au réseau depuis 2021. Holtec International prévoit de reprendre l'exploitation de la centrale nucléaire de Palisades fin 2025, et Constellation Energy a annoncé son intention de redémarrer la tranche 1 de Three Mile Island (TMI-1) d'ici à 2028. Ces efforts visent à répondre à la demande croissante d'énergie sans carbone.

12. L'intérêt mondial pour l'électronucléaire s'accroît. Outre les deux pays primo-accédants qui exploitent leur première centrale nucléaire (le Bélarus et les Émirats arabes unis), trois autres primo-accédants progressent dans la construction de leurs centrales nucléaires, à savoir le Bangladesh (2 tranches), l'Égypte (4 tranches) et la Türkiye (4 tranches), les activités de mise en service ayant déjà commencé au Bangladesh et en Türkiye. Trente-sept pays sont à différents stades de développement de leurs programmes électronucléaires, cinq nouveaux pays (Iraq, Jamaïque, Myanmar, Rwanda et Singapour) ayant commencé à envisager l'énergie nucléaire en 2024. Plusieurs pays, dont la Belgique, la République de Corée et la Suède, ont reconsidéré leur intention d'abandonner progressivement l'énergie nucléaire et certains, dont la Malaisie et le Viet Nam, ont décidé de relancer leurs programmes. Une vingtaine d'autres pays ont exprimé leur intérêt pour l'électronucléaire et entrepris des études en vue de l'intégrer dans leur futur bouquet énergétique.



13. Dans le même temps, certains pays qui reconsidèrent la sortie anticipée du nucléaire s'engagent dans des prolongations non planifiées de la durée de vie des centrales, parfois encouragés par de grands

utilisateurs industriels finals tels que les centres de données. En 2024, les États-Unis ont entrepris de redémarrer les réacteurs qui avaient été arrêtés pour des raisons économiques.

## C. Perspectives de l'électronucléaire

14. Pour la quatrième année consécutive, l'Agence a revu à la hausse ses projections annuelles de croissance de l'électronucléaire. La dynamique s'est accrue depuis l'inclusion de l'électronucléaire dans le bilan mondial et l'engagement pris par 31 pays depuis la 28<sup>e</sup> session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28) de tripler la capacité nucléaire mondiale actuelle d'ici à 2050. Le premier sommet sur l'énergie nucléaire, qui s'est tenu à Bruxelles en mars 2024, a renforcé cette dynamique. La projection haute de l'Agence s'élève maintenant à 950 GWe d'ici 2050, soit 2,5 fois la capacité actuelle. Pour y parvenir, il faut mettre en œuvre à grande échelle des programmes complets de gestion de la durée de vie des centrales, continuer à investir dans la modernisation des centrales, prolonger les licences, renforcer la résilience de la chaîne d'approvisionnement dans l'ensemble du parc existant et construire environ 640 GWe de nouvelles capacités, les petits réacteurs modulaires (SMR) pouvant représenter près d'un quart de cette capacité. Les conditions préalables à cette expansion sont la capacité des industriels de respecter les délais et le budget, l'accès au financement, des politiques équitables pour toutes les technologies bas carbone et une démonstration accélérée des SMR. Dans la projection basse, la capacité nucléaire installée passerait à 514 GWe d'ici 2050 et les SMR représenteraient 6 % de la capacité supplémentaire.

Projection haute de l'Agence :

**950 Gwe**  
d'ici 2050



Fig. C.1. Tripler la production d'énergie nucléaire d'ici 2050, événement de Net Zero Nuclear, lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques, tenue à l'Expo City de Dubaï (Émirats arabes unis) en décembre 2023. (Source : AIEA)

15. La déclaration visant à tripler la capacité nucléaire mondiale de 2020 d'ici à 2050 présente à la fois des opportunités et des défis. L'expansion nucléaire rapide de la Chine et les vastes projets de la Fédération de Russie à l'étranger sont des exemples de modèles de financement et de mise en œuvre réalisables dans lesquels les gouvernements jouent un rôle majeur. Cependant, il sera essentiel d'attirer des financements du secteur privé pour accélérer le déploiement du nucléaire, grâce à des approches novatrices comprenant des financements durables, des partenariats public-privé et divers mécanismes de marché. Les banques multilatérales de développement, dont la plupart excluent actuellement l'électronucléaire de leur politique de prêt, pourraient aussi jouer un rôle important en soutenant des projets dans les marchés émergents et les économies en développement, et certaines d'entre elles sont en train de revoir leur politique en matière d'énergie nucléaire. La récente décision de la Banque mondiale de lever son interdiction de financer des projets électronucléaires a plusieurs conséquences importantes. Elle révèle notamment un changement potentiel dans la politique énergétique mondiale, encourageant d'autres institutions à reconsidérer leur position sur l'énergie nucléaire et pouvant accroître les investissements dans l'infrastructure nucléaire. Il est essentiel de réduire les risques liés aux investissements, en particulier pendant les phases de construction des nouvelles centrales, qu'elles soient de grande taille ou basées sur des SMR.



*Fig. C.2. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, et Ajay Banga, Président du Groupe de la Banque mondiale, lors de la signature de l'accord entre l'Agence internationale de l'énergie atomique et la Banque mondiale visant à soutenir l'utilisation sûre, sécurisée et responsable de l'énergie nucléaire dans les pays en développement, au cours de leur rencontre à Paris (France). Juin 2025. (Source : AIEA)*

16. Les technologies des réacteurs avancés et innovants, notamment les SMR, suscitent un intérêt grandissant. Alors que les grands réacteurs avancés refroidis à l'eau devraient représenter la majeure partie de l'augmentation de capacité, les SMR devraient contribuer de manière significative à la réalisation de la projection haute de 950 GWe, soit environ 150 GWe. Dans le contexte d'une demande croissante d'énergie propre en raison du développement de l'IA, du remplacement potentiel des centrales

au charbon et de l'électrification des transports, du chauffage et de la climatisation des bâtiments et des applications industrielles, les SMR pourraient constituer une source fiable. Leur rôle dans la décarbonation des secteurs dont les émissions sont difficiles à réduire pourrait changer la donne.

## **D. Facteurs influant sur le déploiement futur de l'électronucléaire**

17. Pour réaliser la projection haute de 950 GWe d'ici à 2050, les techniques de construction modernes, telles que la construction modulaire pour les projets de grande taille et l'intégration de l'IA pour améliorer l'efficacité des projets, seront cruciales. L'harmonisation réglementaire, bien que difficile, pourrait rationaliser la collaboration internationale et accélérer le déploiement. Les principaux obstacles sont la sécurisation du financement des projets et l'obtention d'une volonté politique qui, malgré les améliorations récentes, pourrait ne pas se concrétiser assez rapidement pour atteindre l'objectif global. En outre, la mise en place de chaînes d'approvisionnement robustes pour les SMR et les modèles avancés est essentielle. De nombreux pays n'ont pas fait la preuve de leur capacité de mettre en œuvre de grands projets nucléaires, ce qui pourrait entraver les progrès. La poursuite des efforts internationaux visant à vaincre le scepticisme du public et à garantir un fonctionnement sûr et fiable des nouvelles technologies sera aussi essentielle. La collaboration internationale peut jouer un rôle important dans la mise en commun des bonnes pratiques démontrées, dans l'amélioration de la durabilité de l'énergie nucléaire et dans la promotion de l'innovation sans nécessiter d'importants investissements nationaux. Pour relever ces défis, il faudra investir dans la technologie, les infrastructures et la formation du personnel, et mettre en place des politiques claires de soutien. Faire participer les parties prenantes et informer le public sur les avantages et la sûreté de l'électronucléaire pourraient encore renforcer l'acceptation et le soutien. Enfin, la disponibilité de matières fissiles/fertiles et d'infrastructures adéquates pour la chaîne d'approvisionnement en combustible (en particulier pour la production de combustibles à base d'uranium faiblement enrichi à teneur élevée - HALEU) pour alimenter les programmes nucléaires devra être assurée en temps utile pour permettre leur déploiement effectif.

18. Les solutions démontrées dans certains pays doivent encore être mises en œuvre à grande échelle. Ces solutions impliquent les propriétaires/exploitants de centrales, les responsables de la réglementation, les décideurs, les laboratoires nationaux, les organisations internationales, les ONG, les universités et l'ensemble du secteur électronucléaire. En adoptant ces solutions, le secteur renforcera sa compétitivité et accélérera le déploiement de nouvelles capacités nucléaires.

### **D.1. Financement**

19. Traditionnellement, la construction de centrales nucléaires repose largement sur des financements publics. La plupart des centrales nucléaires existantes ont été construites par de grandes compagnies d'électricité, détenues en totalité ou en partie par un État et évoluant sur des marchés réglementés où nombre de coûts et de risques associés à un projet nucléaire peuvent être répercutés auprès des consommateurs. La situation actuelle est bien différente pour ce qui est des projets de nouvelles centrales nucléaires. Certains pays ont libéralisé leurs marchés de l'électricité, réduisant ainsi le rôle des pouvoirs publics dans le secteur de l'électricité et transférant la plupart des risques aux producteurs d'électricité. D'autres pays qui conservent des marchés régulés cherchent aussi à impliquer le secteur privé, soit parce que leur situation financière ne permettrait pas un financement public complet, soit en raison d'une politique publique imposée.

20. Le financement des projets nucléaires récents a impliqué à la fois les gouvernements hôtes et les vendeurs de technologie nucléaire, ce qui a permis de réduire l'exposition des investisseurs et d'obtenir un financement à moindre coût. Le financement par le gouvernement hôte peut être direct ou s'effectuer par l'intermédiaire de garanties de prêt qui assurent le remboursement intégral en cas de défaillance, réduisant ainsi le coût de la dette et augmentant l'effet de levier financier. Des garanties de prêt ont été utilisées pour le projet Vogtle (États-Unis) et le projet Barakah (Émirats arabes unis). Dans plusieurs projets, les fournisseurs ont participé en tant que pourvoyeurs de capitaux propres et/ou de dettes, comme dans le projet Barakah avec la participation à 18 % de la Compagnie d'électricité de Corée, et dans le projet Akkuyu (Türkiye) avec Rosatom en tant que partie prenante majoritaire. Dans les pays qui entreprennent ou développent un programme électronucléaire, comme le Bangladesh, le Bélarus, l'Égypte, la Hongrie, l'Inde, le Pakistan et la République islamique d'Iran, des accords intergouvernementaux assortis de prêts gouvernementaux ont été utilisés.

21. La prévisibilité et la stabilité des gains pendant l'exploitation sont essentielles pour attirer les investissements dans des technologies à forte intensité de capital comme le nucléaire et les énergies renouvelables. Si le risque lié aux gains est limité sur les marchés régulés, il est plus élevé sur les marchés libéralisés où les prix de l'électricité fluctuent. Sur les marchés libéralisés, les mécanismes permettant de garantir les gains et d'atténuer les risques du marché pour les technologies à forte intensité de capital comprennent les accords d'achat d'énergie à long terme, les tarifs de rachat et les contrats de différence qui garantissent des gains prévisibles pour des périodes prédéterminées. Les exemples incluent les projets Barakah (Émirats arabes unis), Akkuyu (Türkiye) et Hinkley Point C (Royaume-Uni). D'autres mécanismes complètent les gains commerciaux par des primes ou des achats de capacité, comme le crédit d'impôt à la production utilisé aux États-Unis pour le projet Vogtle et le crédit d'émission zéro pour les centrales nucléaires existantes.

22. Le modèle de la base d'actifs régulée (BAR), récemment proposé au Royaume-Uni pour la centrale Sizewell C, assure un rendement régulé au promoteur pendant la construction, réduisant les coûts initiaux et les risques liés au projet, ce qui se traduit par une baisse du coût global du projet. Les modèles hybrides de BAR permettent de partager les risques de dépassement du budget et de retard, ce qui réduit encore les risques pour les promoteurs. Ces mécanismes présentent des similitudes avec ceux des marchés régulés.

23. Le « modèle Mankala », appliqué avec succès en Finlande, finance de grands projets à forte intensité de capital, y compris des centrales nucléaires. Dans ce modèle coopératif, les consommateurs d'électricité apportent des fonds propres pour la construction de la centrale et contribuent aux coûts d'exploitation, recevant l'électricité produite au prorata de leur part. Ce modèle permet aux actionnaires d'entreprendre collectivement de grands projets, en partageant les risques et en offrant une couverture implicite contre la volatilité des prix de l'électricité.

24. La gestion et l'atténuation des risques pendant les phases d'élaboration et de construction constituent un facteur clé de la réussite - et de la rentabilité - des projets nucléaires. L'expérience récente en matière de construction de grandes centrales nucléaires a montré que les dépassements de budget et les retards de construction peuvent être efficacement réduits en :

- mettant en place l'infrastructure nucléaire nécessaire en temps voulu ;
- élaborant un programme multi-tranches permettant à toutes les parties d'acquérir de l'expérience dans la construction de centrales nucléaires ;
- s'appuyant sur un fournisseur expérimenté, ayant un flux régulier de projets et une chaîne d'approvisionnement bien établie et qualifiée ;
- adoptant une conception éprouvée et mettant à profit les enseignements tirés de projets antérieurs, en particulier dans les pays primo-accédants ;
- employant des entrepreneurs qualifiés et compétents avec des équipes expérimentées ;
- échangeant rapidement et efficacement avec les responsables de la réglementation et disposant d'un cadre réglementaire stable et prévisible ;
- adoptant une gestion de projet efficace et des procédures d'achat, de fabrication et de livraison tenant compte des risques.

25. Pour atteindre la croissance significative que l'Agence prévoit dans sa projection haute pour 2050, il faudra attirer des financements du secteur privé, y compris des institutions financières, des banques commerciales et d'autres investisseurs.

## D.2. Marchés de l'électricité et politiques énergétiques

26. Les gouvernements du monde entier ont mis en place divers mécanismes et politiques pour promouvoir les technologies bas carbone afin de lutter contre les changements climatiques. La plupart des politiques ciblent des technologies spécifiques et fournissent des aides financières, telles que des objectifs en matière d'énergies renouvelables, un accès préférentiel au réseau, des subventions directes à l'investissement, des garanties de prix, des primes de marché ou des crédits d'impôt. Ces politiques ont contribué à la maturation de technologies renouvelables telles que l'éolien et le solaire photovoltaïque, mais elles ont aussi entraîné des distorsions sur les marchés de l'électricité.

27. D'autres initiatives, telles que les obligations vertes et les systèmes de classification des investissements durables, visent à mobiliser de nouveaux financements et à réduire les coûts d'investissement pour les projets soutenant les objectifs environnementaux et de durabilité. Des

### Étude de cas : Finlande - financement privé par des clients gros consommateurs d'électricité dans un marché libéralisé : Mankala

Le modèle de propriété typique des entreprises de production d'énergie en Finlande est le modèle « Mankala ». Ce modèle coopératif de **financement privé** permet aux utilisateurs d'électricité de participer à de grands projets à forte intensité de capital. L'idée est que le groupe d'utilisateurs d'électricité fournisse des fonds propres pour la construction d'une centrale nucléaire et reçoive de l'électricité au prix coûtant, proportionnellement à sa part dans le projet.

Le modèle Mankala **partage et équilibre les risques** encourus par les consommateurs et les producteurs d'électricité, améliorant ainsi la confiance des prêteurs. L'actionnaire conserve néanmoins le risque d'échec du projet.

Le modèle Mankala d'exploitation à prix coûtant stimule aussi la concurrence en appuyant l'entrée de nouveaux investisseurs sur le marché, et encourage le partage des compétences et des ressources financières.

obligations vertes ont récemment été émises par des producteurs d'électricité aux États-Unis, au Canada et en Europe pour financer des investissements visant essentiellement à prolonger la durée de vie des installations. Les incitations qui valorisent la production électronucléaire bas carbone sont aussi des mécanismes importants pour améliorer la compétitivité des projets nucléaires. L'émission d'obligations vertes a connu une croissance rapide, le niveau global des investissements dans l'énergie durable atteignant plus de 500 milliards de dollars en 2021 et dépassant les 1 000 milliards de dollars en 2024. Les gouvernements, les régulateurs du marché et les entités financières ont élaboré des taxonomies et des lignes directrices pour définir les investissements « durables », facilitant ainsi les flux financiers en offrant une sécurité aux investisseurs, en réduisant la fragmentation du marché et en soutenant les entreprises respectueuses du climat. Si les investissements durables ont surtout visé des projets d'énergie renouvelable, certains projets nucléaires ont aussi bénéficié de ces initiatives, comme dans le cas de la compagnie canadienne Bruce Power, qui a levé 500 millions de dollars canadiens en 2021 pour la prolongation de la durée de vie de ses centrales nucléaires.

28. La tarification du carbone, par l'intermédiaire d'une taxe sur le carbone ou de droits d'émission négociables, est considérée comme l'instrument le plus efficace sur le plan économique et le moins générateur de distorsions dans le cadre de la politique d'atténuation des changements climatiques. Elle rend les technologies bas carbone plus compétitives que les technologies émettrices. Un système de tarification du carbone couvrant plusieurs secteurs d'émission, avec un prix croissant au fil du temps, garantit le déploiement de technologies bas carbone au coût économique le plus bas pour atteindre les objectifs climatiques. Toutefois, la part des émissions mondiales de gaz à effet de serre couverte par la tarification du carbone est limitée à environ un quart et, dans la plupart des cas, le niveau de prix ne constitue pas un signal suffisant au marché pour encourager l'investissement dans des technologies bas carbone.

### **Enjeux liés à l'organisation du marché de l'électricité**

29. Au cours des dernières décennies, de nombreux pays ont appliqué des réformes du marché de l'électricité afin de libéraliser le secteur et d'établir des marchés concurrentiels. Les marchés libéralisés se sont révélés efficaces pour optimiser les actifs existants et améliorer l'efficacité globale du secteur de l'électricité. Toutefois, ils ne fournissent pas d'incitations suffisantes pour les investissements à long terme dans les technologies à forte intensité de capital. Les marchés « énergie seule » actuels n'ont pas réussi à fournir les incitations nécessaires en termes de prix pour des investissements non subventionnés dans les technologies bas carbone, ni à refléter correctement le coût et la valeur réels des différentes technologies. En conséquence, certaines autorités peinent à assurer la sécurité de l'approvisionnement et la décarbonation au coût économique le plus bas.

30. Les aides basées sur la production, telles que les tarifs de rachat, les contrats de différence, les primes de rachat et les régimes de crédit d'impôt, ont protégé les technologies bas carbone des signaux du marché. Cela a affecté la répartition efficace des technologies de production, affaibli les signaux en termes de prix de l'électricité et faussé les marchés de l'électricité. Les prix négatifs de l'électricité sur les marchés des États-Unis et de l'Union européenne sont une conséquence directe de ces politiques. Le déploiement à grande échelle de technologies renouvelables à faible coût marginal a fait baisser les prix sur le marché de gros de l'électricité et a accru la volatilité, augmentant ainsi le risque de marché. La baisse des prix de gros et l'augmentation du risque de marché ont empêché les investissements dans les sources pilotables nécessaires à la flexibilité du système.

31. Souvent, les structures actuelles du marché ne permettent pas de rémunérer correctement les services nécessaires au fonctionnement du système électrique ni de répartir équitablement les coûts imposés par chaque technologie. Les avantages du système sont notamment l'exploitation en régime flexible et la disponibilité de la capacité de production, tandis que les coûts du système comprennent les coûts supplémentaires des infrastructures de transmission et de distribution, ainsi que la variabilité et

l'imprévisibilité des technologies non pilotables. Les études montrent que les coûts des systèmes d'énergie renouvelable variable sont sensiblement plus élevés que ceux des technologies pilotables, et qu'ils augmentent en fonction de leur part dans le bouquet énergétique. Par exemple, selon l'AIE, l'investissement mondial dans les énergies renouvelables (principalement les énergies renouvelables variables) s'élevait à 771 milliards de dollars en 2023, tandis que l'investissement dans les réseaux et le stockage s'élevait à 452 milliards de dollars (en grande partie pour tenir compte de l'augmentation des énergies renouvelables variables dans les systèmes d'énergie propre). Sur les marchés « énergie seule », les coûts du système ne sont pas imputés aux technologies qui les génèrent, mais à l'ensemble du système, ce qui présente un avantage certain pour l'estimation des coûts de production des énergies renouvelables variables. Souvent, aucune valeur marchande n'est attribuée à d'importants avantages du système, comme les volants d'inertie, le contrôle de la fréquence et de la tension et d'autres services auxiliaires. Ces services sont généralement fournis par de grands producteurs thermiques, y compris nucléaires.

32. Des approches différentes concernant la gestion des déchets et les coûts du déclassement sont souvent appliquées aux différentes sources d'énergie. Les coûts du cycle de vie complet, y compris le déclassement futur et la gestion des déchets, sont inclus dans les prix de l'énergie nucléaire, mais pas dans ceux des autres technologies de production d'énergie.

33. Ces facteurs ont entraîné un manque d'investissement dans les technologies bas carbone pilotables, ce qui a affecté la sécurité de l'approvisionnement en énergie. Aux États-Unis et en Europe, certaines centrales nucléaires ont été fermées ou les plans d'extension de leur durée de vie ont été abandonnés pour des raisons liées au marché, ce qui a eu pour effet de retirer du système une source d'énergie importante, flexible et bas carbone.

### **Politique de marché techniquement neutre**

34. Pour atteindre les objectifs climatiques et garantir un approvisionnement énergétique fiable et sûr de manière rentable, les politiques énergétiques, les mesures réglementaires et l'organisation des marchés de l'électricité doivent évoluer. La tarification techniquement neutre sur les marchés de l'électricité devrait tenir compte des coûts de production, d'environnement, de système et d'intégration, ainsi que des contributions à la résilience du système, à l'indépendance et à la sécurité de l'approvisionnement.

35. Des mécanismes de tarification appropriés devraient tenir compte de la valeur liée à l'emplacement et à la temporalité de la production d'électricité, de la capacité, de la flexibilité et des différents services fournis au système. Le maintien de marchés efficaces à court terme et l'exposition de chaque technologie à la tarification en temps réel et à la tarification nodale sont essentiels à la répartition efficace des sources de production. Cela permet d'internaliser les coûts de profil des différentes technologies et encourage une meilleure coordination des réseaux et du développement de la production. La rémunération de la pilotabilité, de la flexibilité et de la fourniture de services de système basée sur le marché renforce les systèmes énergétiques durables. Appliquer un prix du carbone cohérent, prévisible et croissant tout en supprimant progressivement les subventions aux combustibles fossiles renforcerait la compétitivité et assurerait une stabilité à long terme pour les investissements dans les technologies bas carbone.

36. Les événements récents mettent en évidence la nécessité de diversifier les sources d'approvisionnement en énergie en cas d'interruptions dues à des événements environnementaux ou géopolitiques. Toutefois, il est peu probable que les technologies bas carbone soient financées uniquement sur la base des prix volatils et incertains du marché de l'électricité. L'intensité capitalistique élevée de ces technologies nécessite des accords de marché spécifiques afin de réduire le risque de marché et d'offrir aux investisseurs stabilité et visibilité des gains. Les décideurs politiques doivent

trouver un équilibre entre l'exposition aux marchés de gros et le soutien hors marché aux technologies bas carbone.

37. En supprimant les pénalités (ou les incitations) et en attribuant des rendements basés sur la valeur totale du système, l'électronucléaire peut être considéré comme une option viable en fonction des besoins du système, de sa structure et de ses perspectives à long terme. L'électronucléaire a démontré sa valeur en tant que source importante de production assurant la stabilité du système, le contrôle de la puissance réactive, la continuité et la capacité de restauration du système, tout en produisant peu d'émissions de gaz à effet de serre. L'électronucléaire nécessite des revenus stables pour gérer les risques financiers et rentabiliser des investissements importants, ce qui est généralement le cas sur les marchés régulés ou dans le cadre de contrats à tarifs garantis.

38. Différentes autorités ont décidé d'investir dans l'exploitation à long terme ou dans de nouvelles capacités nucléaires, reconnaissant leur valeur dans les systèmes bas carbone. Ainsi, le Royaume-Uni a acquis de nouvelles capacités nucléaires en garantissant la stabilité des gains futurs par le biais d'un contrat de différence. La Chine prévoit de doubler la part du nucléaire dans son bouquet énergétique pour atteindre 10 % d'ici 2035 par rapport à 2022. Au Canada et dans certains États des États-Unis, les décideurs se sont engagés à assurer l'exploitation à long terme des centrales existantes malgré des coûts plus élevés. Les Émirats arabes unis ont choisi l'énergie nucléaire en tant que pays primo-accédant en raison de sa capacité de production pilotable d'importants volumes d'électricité bas carbone, malgré les coûts inférieurs associés à l'énergie solaire.

### **D.3. Résilience**

39. En raison de l'augmentation des températures moyennes mondiales, la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques violents devraient augmenter de manière significative. Ces événements peuvent aller de tempêtes hivernales aux inondations intenses, en passant par des vagues de chaleur et des sécheresses, entraînant la prolifération d'organismes aquatiques. Tous ces facteurs peuvent avoir un impact sur les outils de production ainsi que sur les infrastructures de réseau. Ces phénomènes météorologiques violents devenant plus fréquents, il est essentiel que le secteur nucléaire aligne et ajuste ses stratégies en conséquence, en mettant en œuvre toutes les mesures de sûreté nécessaires et en actualisant les scénarios de menace afin de continuer de garantir la résilience et la fiabilité des centrales nucléaires.

40. Plusieurs mesures spécifiques ont déjà été mises en place face aux différents phénomènes météorologiques. Par exemple, les centrales nucléaires exposées aux inondations ont mis en place des systèmes améliorés de protection, tels que des barrières anti-inondations renforcées et des systèmes de drainage améliorés, afin d'empêcher les infiltrations d'eau. Dans les régions sujettes aux vagues de chaleur, certaines centrales ont modernisé leurs systèmes de refroidissement pour maintenir leur efficacité même en cas de températures extrêmes, tandis que d'autres ont adapté leurs pratiques de gestion de l'eau pour faire face aux sécheresses. En outre, des renforcements structurels ont été réalisés pour résister à la fréquence et à l'intensité accrues des tempêtes. Ces mesures proactives démontrent l'engagement du secteur à maintenir des normes de sûreté élevées face aux défis liés au climat. Des mesures similaires, lorsqu'elles sont appliquées aux systèmes liés à la production, permettent d'atténuer les pertes de production.

41. Les incidences économiques de ces mesures d'adaptation des centrales nucléaires en service sont multiples. D'une part, l'investissement initial dans la modernisation des infrastructures et la mise en œuvre de nouvelles mesures de sûreté et de fiabilité peut être substantiel. Ces coûts peuvent constituer une charge financière, en particulier pour les installations anciennes dont la durée de vie restante est limitée. Les producteurs d'électricité évaluent soigneusement le coût de l'adaptation par rapport aux avantages potentiels, en tenant compte de facteurs tels que l'amélioration des performances et

l'allongement de la durée de vie des centrales, ainsi que des incertitudes liées aux scénarios climatiques. Des travaux sont encore nécessaires pour déterminer les scénarios applicables à chaque centrale nucléaire spécifique qui peuvent servir à étayer les décisions d'investissement. D'autre part, les nouvelles constructions peuvent intégrer la résilience climatique dès le départ, en tenant compte des risques potentiels posés par les événements météorologiques au cours de la durée de vie opérationnelle prévue de la centrale. De cette manière, les nouvelles centrales nucléaires peuvent atteindre des niveaux plus élevés de sûreté et d'efficacité, contribuant en fin de compte à un système énergétique plus résilient.

42. Outre les facteurs externes tels que les changements climatiques et la variabilité économique, qui exigent une plus grande résilience du système nucléaire, il est essentiel de renforcer la résilience humaine et organisationnelle de la même manière, voire davantage. Pour favoriser la mise en place de capacités résilientes qui améliorent la prise de conscience, l'adaptabilité et l'action efficace en temps opportun, l'Agence a élaboré et appliqué des outils électroniques de renforcement des compétences en matière de direction, tels que la « Dynamic Leaders' Platform » et l'atelier immersif « Embedding Leadership Behaviour for Resilient Nuclear Performance », basé sur des scénarios « sûreté intégrée/apprentissage sécurisant ».

43. Grâce à la résilience dans le travail quotidien, le personnel du nucléaire est mieux placé pour agir efficacement dans les situations nouvelles et les situations d'urgence. En offrant la possibilité de pratiquer et d'appliquer ces compétences en toute sûreté dans des scénarios de plus en plus exigeants, où le seul risque d'« échec » est l'apprentissage, l'organisme nucléaire est mieux armé pour faire face à la volatilité, à l'incertitude, à la complexité et à l'ambiguïté qui prévalent de plus en plus dans cet environnement nucléaire en évolution rapide.

#### **D.4. Réacteurs avancés et applications non électriques**

44. Les initiatives visant à accélérer l'innovation dans le secteur électronucléaire ont pour but de relever les défis liés à la performance, au coût et à la sûreté. Ces innovations peuvent être totalement inédites ou adaptées d'autres secteurs et peuvent être techniques (comme les systèmes de sûreté passive, la numérisation, l'IA et la fabrication avancée), organisationnelles, basées sur des processus ou liées à l'activité. L'innovation concerne toutes les phases du cycle de vie des centrales nucléaires, notamment la construction, l'exploitation, le déclassement, la gestion des déchets, la réglementation, la chaîne d'approvisionnement, la politique énergétique, le financement et l'engagement des parties prenantes. Les pays dotés de programmes nucléaires avancés mettent souvent en œuvre des projets intégrés combinant plusieurs innovations. Par exemple, le projet Proryv (« percée ») de la Fédération de Russie vise à fermer le cycle du combustible nucléaire en utilisant des réacteurs à neutrons rapides et le retraitement sur site.

45. La plupart des centrales nucléaires actuellement en service, en construction ou en projet sont des réacteurs de grande taille, d'une puissance de l'ordre du gigawatt, qui devraient continuer de jouer un rôle majeur dans le réseau électrique mondial pendant des décennies. Toutefois, les centrales nucléaires de grande taille ne sont pas viables sur certains marchés de l'énergie, notamment dans les pays dotés de petits réseaux, dans les régions isolées, dans le secteur minier ou dans les complexes industriels. Les SMR devraient répondre aux attentes de ces marchés et faciliter le déploiement de l'électronucléaire en réduisant considérablement les coûts d'investissement. En outre, l'énergie nucléaire est de plus en plus utilisée dans des applications non électriques, pour lesquelles les SMR peuvent constituer une solution durable.

## Possibilités offertes par les caractéristiques des SMR

46. Les SMR peuvent aussi être déployés dans des scénarios spécifiques tels que la fourniture d'énergie par une centrale flottante dans les zones reculées, y compris les petits pays insulaires. Les entreprises sont attirées par les coûts d'investissement moins élevés et le nombre réduit de composants, la conception, la fabrication et le déploiement étant adaptés aux différents besoins. Actuellement, l'Agence recense environ 70 modèles de SMR et activités de développement technologique dans plus de 20 pays, dont plus de 15 devraient être déployés d'ici 2035. Les premiers SMR commerciaux refroidis à l'eau sont opérationnels depuis 2020 à la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov de la Fédération de Russie, avec 70 MW utilisés à la fois pour la production d'électricité et le chauffage urbain. La Chine a mis en service commercial un réacteur modulaire à haute température refroidi au gaz (HTR-PM) en décembre 2023, qui produit 200 MW d'électricité. D'autres projets de construction sont en cours en Argentine, en Chine et en Fédération de Russie, et plusieurs projets sont en phase de développement avancé ou de délivrance d'autorisation au Canada, au Danemark, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France, en Italie, au Japon, en République de Corée et au Royaume-Uni.

47. Si les grandes centrales nucléaires bénéficient d'économies d'échelle, les SMR devraient bénéficier d'« économies de série » grâce à la fabrication en usine de modules standardisés, à des temps de construction plus courts et à un recours accru à des articles de qualité commerciale pour réduire les coûts. Pour concurrencer les réacteurs nucléaires de plus grande taille, les SMR doivent atteindre l'efficacité opérationnelle grâce à des concepts innovants : améliorations technologiques, amélioration des interfaces avec le personnel et les systèmes, automatisation accrue et potentiel de cogénération.

48. L'harmonisation des exigences des exploitants et des responsables de la réglementation et la normalisation de la conception sont les clés du succès. Les efforts portent notamment sur le développement de technologies telles que les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, les réacteurs à très haute température, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz et les réacteurs à sels fondus. Ces réacteurs avancés et innovants visent à améliorer la sûreté, la durabilité, l'efficacité et la rentabilité, avec des objectifs communs en matière de sûreté et d'économie. Des initiatives internationales de développement conjoint en cours mettent l'accent sur un dialogue dès les premiers stades entre les concepteurs et les responsables de la réglementation afin de faciliter le déploiement.

49. Pour coordonner ses activités concernant les SMR et leurs applications et servir de point de contact pour les États Membres et les autres parties prenantes, l'Agence a créé la Plateforme de l'AIEA sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications en 2021. La plateforme sert de guichet unique pour les demandes des États Membres et des parties prenantes concernant les SMR et les applications connexes. En 2022, l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI) a été lancée pour faciliter le déploiement mondial de réacteurs nucléaires avancés sûrs et sécurisés en faisant progresser l'harmonisation réglementaire et la normalisation des approches industrielles.



## **Applications non électriques de l'énergie nucléaire et réseaux énergétiques intégrés**

50. Les émissions du secteur de l'énergie représentent environ 40 % des émissions totales de CO<sub>2</sub>. D'autres secteurs, comme les transports et l'industrie, font aussi l'objet d'initiatives de décarbonation au niveau mondial. L'électrification, là où elle est possible, est impérative, ce qui augmente fortement la demande d'électricité. En outre, les sources de chaleur, les combustibles et les vecteurs énergétiques bas carbone sont essentiels pour décarboner les secteurs dont les émissions sont difficiles à réduire tels que l'industrie ou les transports lourds. L'hydrogène, matière première chimique essentielle dans plusieurs industries fortement émettrices, est très prometteur en tant que vecteur énergétique clé pour la décarbonation. Cependant, il doit être produit à partir de sources bas carbone pour réaliser son potentiel. En outre, l'énergie nucléaire offre un potentiel important pour décarboner la production d'eau potable à partir de l'eau de mer, qui permet de vivre à des centaines de millions de personnes dans le monde, mais qui est principalement alimentée actuellement par des combustibles fossiles.

51. L'énergie nucléaire présente un énorme potentiel pour les applications non électriques, notamment la production d'hydrogène, le dessalement de l'eau, le chauffage urbain et la fourniture de chaleur pour les processus industriels difficiles à électrifier. Ces applications peuvent contribuer à réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles, à atténuer les changements climatiques et à fournir un accès à l'eau potable. Les avantages de la cogénération nucléaire continuent d'être pris en compte par les pays ayant des programmes électronucléaires, les pays qui prévoient une expansion de tels programmes et les pays primo-accédants. Si tous les réacteurs nucléaires peuvent prendre en charge une série d'applications non électriques, certains modèles avancés sont conçus spécifiquement pour une ou plusieurs de ces applications, notamment la fourniture de chaleur à haute température à des procédés industriels énergivores.

52. Les contraintes économiques et commerciales des projets concernant la cogénération nucléaire, la production de chaleur, l'hydrogène et d'autres applications non électriques restent des obstacles majeurs à la mise en œuvre commerciale. Le soutien politique aux projets relatifs à l'hydrogène basés sur la technologie de production plutôt que sur l'intensité de carbone fausse les règles du jeu par rapport à l'énergie nucléaire, ce qui retarde la transition énergétique. De grandes installations sont nécessaires pour démontrer les projets nucléaires non électriques à l'échelle commerciale, mais un pays qui fournit des réacteurs nucléaires peut ne pas être en mesure de justifier une démonstration à grande échelle sans une analyse de rentabilité appropriée. Les applications non électriques de l'énergie nucléaire peuvent nécessiter une adaptation des licences, de nouveaux règlements et l'approbation de l'organisme national de réglementation.

53. Un soutien gouvernemental fort, une recherche-développement adéquate, des conditions équitables de concurrence avec d'autres technologies bas carbone et un financement accessible des projets de cogénération sont essentiels pour relever ces défis. L'intégration de diverses sources d'énergie pour la production d'électricité, le chauffage, le refroidissement, le stockage de l'énergie et la production de produits de base (comme l'hydrogène et les combustibles synthétiques) peut maximiser l'utilisation de diverses ressources et technologies énergétiques pour fournir des services énergétiques fiables, efficaces, durables et flexibles. Les réacteurs nucléaires peuvent être utilisés pour la cogénération via l'extraction directe de vapeur ou pour la fourniture de chaleur par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Les projets de cogénération nucléaire peuvent résulter de la modernisation de centrales nucléaires en activité ou de l'optimisation de nouveaux modèles, comme dans le cas des SMR polyvalents. La cogénération ajoute de la flexibilité aux modes de production des centrales nucléaires et facilite l'intégration des énergies renouvelables en permettant de passer de l'électricité à d'autres produits en fonction des besoins, sans perte de production d'énergie.

54. L'hydrogène est un vecteur énergétique polyvalent, une matière première chimique et un vecteur d'électricité. Cependant, la production d'hydrogène est actuellement très gourmande en carbone. La cogénération nucléaire contribue aux efforts de décarbonation, y compris la production d'hydrogène bas carbone. La production d'hydrogène par électrolyse à basse et haute température est testée par plusieurs compagnies d'électricité de nombreux pays qui utilisent des centrales nucléaires en activité. Les préoccupations liées au réchauffement climatique et à la pénurie d'eau ont aussi incité les pays à envisager le dessalement nucléaire. Le dessalement et l'intégration des centrales nucléaires offrent divers avantages techniques et économiques, notamment une électricité sans carbone, de faibles coûts marginaux de production d'électricité et une fiabilité contrôlable. Dans les régions où l'eau est rare, la capacité des centrales nucléaires de produire de l'eau douce est un atout important pour améliorer le niveau de vie de la population locale et soutenir les objectifs de développement durable.

55. En résumé, le nucléaire a tout le potentiel nécessaire pour être un outil clé de la décarbonation des émissions, qu'elles soient directement liées à la production d'électricité ou non. Si des défis surmontables subsistent en ce qui concerne la mise en œuvre à grande échelle de la cogénération, les opportunités pour la transition vers l'énergie propre sont tout simplement trop importantes pour qu'on les laisse passer.

### **Applications maritimes**

56. L'électronucléaire a plusieurs applications prometteuses dans le secteur maritime. Ces applications comprennent l'utilisation de centrales nucléaires flottantes pour fournir de l'électricité et d'autres produits énergétiques aux installations côtières et aux activités en mer, ainsi que l'utilisation de SMR pour la propulsion de navires de commerce. L'électronucléaire offre une alternative durable, sans émission, qui contribue aux efforts mondiaux de réduction des émissions de carbone et à la réalisation des objectifs environnementaux.

57. L'intégration de l'électronucléaire au secteur maritime ne va pas sans difficultés, à savoir notamment des problèmes de sûreté, des obstacles réglementaires et des problèmes de perception par le public. Pour surmonter ces difficultés, il faut une collaboration internationale et des cadres réglementaires nationaux et internationaux complets dans les domaines nucléaire et maritime afin de garantir un déploiement sûr et efficace de ces technologies en mer.

### **Autres applications**

58. La production de radio-isotopes dans les centrales nucléaires commerciales, comme au Canada, renforce la chaîne d'approvisionnement mondiale en radio-isotopes et favorise le bien-être collectif en contribuant à la lutte contre le cancer et d'autres maladies et en soutenant diverses applications industrielles.

## **D.5. Chaîne d'approvisionnement et harmonisation des approches réglementaires**

59. Une chaîne d'approvisionnement solide est une condition préalable à la construction de nouvelles centrales nucléaires et à l'exploitation continue, sûre et efficace du parc actuel. Dans les deux cas, la chaîne d'approvisionnement doit être en mesure de résoudre efficacement les problèmes liés à l'obsolescence des technologies, aux délais d'approvisionnement de certains produits, aux nouvelles technologies nécessitant une qualification, au départ à la retraite des personnels et à leur remplacement par de nouvelles générations, aux fournisseurs qui quittent le marché et aux nouveaux fournisseurs qui apprennent à fabriquer des produits et des services de haute qualité pour le secteur nucléaire.

60. La diversité des cadres législatifs et des exigences réglementaires qui en découlent détermine la nécessité d'adapter les projets nucléaires à chaque contexte. Bien que légitime, cette situation pose un problème en raison des différents codes et normes, y compris non nucléaires, applicables aux produits et aux services, et peut entraver l'innovation. Les mesures suivantes sont recommandées aux décideurs :

- Les pouvoirs publics et le secteur nucléaire doivent collaborer pour réduire les risques sectoriels et rendre le nucléaire plus attrayant. Il est essentiel de favoriser un environnement transparent et de promouvoir des perspectives à long terme pour les industriels afin de garantir la disponibilité des fournisseurs.
- Encourager la coopération entre les secteurs public et privé peut contribuer à la mise en place d'une infrastructure industrielle solide. Il peut s'agir notamment de rationaliser la législation et la réglementation, de tenir compte de différents codes et normes, de donner des conseils et de favoriser la coopération horizontale et verticale dans la chaîne d'approvisionnement.
- Un soutien économique direct et des incitations peuvent aussi être envisagés dans certaines circonstances. Les propriétaires/exploitants et les fournisseurs locaux peuvent soutenir l'exploitation, la maintenance et les nouvelles constructions grâce à des partenariats à long terme et à la responsabilisation.
- Les concepteurs de réacteurs doivent coopérer très tôt avec les fournisseurs pour réduire les risques liés à la chaîne d'approvisionnement.
- La création et le soutien d'organisations de l'industrie nucléaire peuvent faciliter le soutien par les pairs et l'échange d'informations.

61. L'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NSHI) de l'Agence vise à harmoniser et à normaliser les approches dans les domaines réglementaire et industriel. La NSHI comprend deux volets : réglementaire et industriel. Le volet réglementaire a élaboré un cadre de coopération réglementaire pour ce qui est de l'examen de la conception, notamment 1) un cadre de partage d'informations entre les organismes de réglementation, 2) un processus multinational d'examen conjoint préalable à la délivrance d'une autorisation par lequel les responsables de la réglementation peuvent évaluer conjointement les aspects techniques particuliers d'un modèle de réacteur proposé, 3) un processus permettant de tirer parti des examens déjà réalisés par les organismes de réglementation d'autres États Membres et 4) un processus d'examen collaboratif qui permet aux responsables de la réglementation de collaborer parallèlement à la conduite d'examens réglementaires nationaux. Le volet industriel est axé sur 1) l'harmonisation des prescriptions d'utilisation de haut niveau ; 2) les approches communes en matière de codes et de normes ; 3) les essais et la validation grâce au nouveau réseau collaboratif de partage des données NEXSHARE ; et 4) l'accélération de la mise en place de l'infrastructure nécessaire pour les SMR.



Fig. D.1. L'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires de l'AIEA (NHSI) a été lancée par le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, afin de faciliter le déploiement mondial efficace de réacteurs nucléaires avancés sûrs et sécurisés. (Source : AIEA)

62. Au cours de la phase initiale de la NHSI, le volet réglementaire a établi un cadre de collaboration internationale permettant aux organismes de réglementation de partager des informations et de procéder à des examens conjoints de modèles de réacteurs, ce qui a permis d'améliorer l'efficacité de la réglementation, de promouvoir la normalisation de la conception et de réaliser des économies de ressources. Dans le même temps, le volet industriel a fait paraître plusieurs publications techniques, dont *Suitability Evaluation of Commercial Grade Products for Use in Nuclear Power Plant Safety Systems* (IAEA-TECDOC-2034), qui donne des informations sur les approches d'évaluation de l'adéquation des articles de qualité commerciale pour une utilisation dans les systèmes de sûreté des centrales nucléaires, et six documents de travail relatifs aux recommandations et considérations génériques des utilisateurs, aux codes et normes et à l'évaluation des questions de développement de l'infrastructure afin d'accélérer le déploiement des SMR. En outre, le volet industriel a mis en place deux réseaux, le réseau d'excellence en matière de gestion, de chaîne d'approvisionnement et de qualité (MSCQ) et le réseau pour le partage des expériences et de la validation des codes (NEXSHARE), afin de faciliter le partage d'informations sur les pratiques communes relatives aux codes et aux normes, ainsi qu'aux essais et à la validation des codes informatiques de conception et d'analyse de la sûreté.

63. Les innovations intersectorielles et l'accent mis sur les applications non énergétiques des SMR nécessitent un renforcement de la coopération avec les organisations internationales dans les domaines adjacents. Il s'agit par exemple de l'Organisation maritime internationale pour les SMR flottants ou les navires de commerce à propulsion nucléaire, des associations de l'industrie sidérurgique pour la décarbonation de ce secteur ou des organisations de l'industrie charbonnière pour la conversion de l'énergie fossile à l'énergie nucléaire.

- Le recours au personnel compétent, aux fournisseurs et à l'infrastructure d'autres secteurs à sûreté critique et projets de centrales classiques peut accélérer le déploiement de nouvelles centrales nucléaires. Par exemple, l'utilisation de produits de haute qualité industrielle dans les systèmes de sûreté est de plus en plus fréquente.

- Le recours à des chaînes d'approvisionnement et du personnel locaux peut dans certains cas contribuer à réduire l'influence des goulets d'étranglement logistiques, car les projets de centrales nucléaires sont loin de se limiter au circuit primaire. Cela contribuerait à l'économie locale et donnerait un élan important à l'engagement positif des parties prenantes. La réaffectation de sites de centrales au charbon pour la production électronucléaire est un bon exemple à cet égard.

## **D.6. Innovation et intelligence artificielle**

64. L'intelligence artificielle (IA) et l'électronucléaire sont deux technologies transformatrices qui interagissent de plus en plus. Cette interaction redessine le paysage de la production d'énergie, de la sûreté et du progrès technologique.

### **Les progrès de l'IA dans l'électronucléaire**

65. L'IA est de plus en plus intégrée dans le secteur électronucléaire pour améliorer l'efficacité, la sécurité, la sûreté et les performances d'exploitation. Les applications assistées par l'IA pour la surveillance de l'état et la maintenance prédictive basées sur des données en temps réel permettent la surveillance en temps réel et la détection précoce des problèmes, ainsi que la prédiction des pannes d'équipement avant qu'elles ne se produisent, ce qui réduit les temps d'arrêt, les coûts de maintenance et les arrêts imprévus tout en prolongeant la durée de vie des équipements et en améliorant la sûreté. Les algorithmes d'IA peuvent aussi optimiser les niveaux de production d'énergie sur la base de la demande en temps réel et des conditions environnementales, notamment météorologiques, afin de garantir une alimentation électrique stable et de maximiser la production d'énergie.

66. L'IA améliore la gestion des connaissances dans les centrales nucléaires en organisant de grandes quantités de données techniques, en automatisant la recherche de documents et en préservant les connaissances des experts pour les générations futures - facteurs clés pour soutenir l'exploitation à long terme. Les applications de formation pilotées par l'IA offrent des expériences d'apprentissage adaptatif, renforçant les compétences des opérateurs et la préparation des interventions d'urgence. En outre, plusieurs organisations ont élaboré des dialogueurs pilotés par l'IA pour aider le personnel des centrales en répondant aux questions techniques, en récupérant les directives réglementaires et en fournissant un soutien opérationnel en temps réel. Ces innovations pourraient renforcer l'efficacité humaine, minimiser les erreurs humaines et assurer un transfert de connaissances sans faille dans l'ensemble du secteur.

67. L'IA joue un rôle important dans la mise au point de réacteurs avancés, y compris les SMR, en explorant de vastes champs de conception plus efficacement que les méthodes traditionnelles. Les outils de conception et de simulation pilotés par l'IA permettent de prototyper et de tester rapidement de nouveaux modèles de réacteurs tout en identifiant les configurations optimales de réacteurs qui maximisent la sûreté, les performances et la rentabilité. Cela permet de réduire le temps et les coûts associés à la mise au point de réacteurs avancés.

68. Les applications d'IA peuvent aussi rationaliser la conformité réglementaire en analysant les documents réglementaires et en garantissant le respect des normes de sûreté, facilitant ainsi des opérations plus fluides et réduisant la charge administrative des installations nucléaires.

69. L'utilisation de l'IA et de l'apprentissage automatique permet aussi des avancées dans le cycle du combustible nucléaire en optimisant l'extraction et le traitement de l'uranium, en améliorant l'efficacité et en réduisant l'impact sur l'environnement. En aval, l'IA peut améliorer la sûreté et l'efficacité de la gestion et du retraitement du combustible usé. Les algorithmes d'IA prédisent le comportement des matières radioactives au fil du temps, ce qui permet de concevoir des solutions de stockage plus sûres.

## **L'influence de l'électronucléaire sur l'IA**

70. Les exigences de la recherche liée à l'électronucléaire, en particulier dans le domaine de l'énergie de fusion, ont entraîné des progrès dans le domaine de l'informatique de haute performance. Les systèmes d'IA développés pour la recherche nucléaire ont repoussé les limites des capacités de calcul, ce qui a permis de créer des modèles d'IA plus puissants et plus efficaces. Cela a eu un effet d'entraînement, bénéficiant à divers autres secteurs qui dépendent de l'informatique à haute performance.

71. Le secteur nucléaire génère de grandes quantités de données, qui se sont révélées précieuses pour l'entraînement des modèles d'IA. Cette approche axée sur les données a conduit à des innovations significatives en matière d'IA, en particulier dans le domaine de l'apprentissage automatique et de l'analyse prédictive. La complexité et l'ampleur des données nucléaires ont renforcé les capacités d'IA, ce qui a permis d'élaborer des modèles plus précis et plus complexes.

72. L'intersection de l'IA et de l'électronucléaire a favorisé les efforts de recherche collaborative. Des experts de domaines tels que l'informatique, l'ingénierie et la physique ont mis au point ensemble des solutions innovantes qui bénéficient à la fois à l'IA et aux technologies nucléaires. Cette approche interdisciplinaire a permis d'accélérer les progrès et d'aboutir à des innovations révolutionnaires, allant de la surveillance de la construction en temps réel en Chine à la numérisation considérablement accélérée des données sur la base de conception des centrales depuis les années 1970 en Suisse.

## **Demande croissante d'énergie**

73. La demande d'électricité découlant des applications d'IA, en particulier celles qui impliquent des modèles d'apprentissage automatique et le traitement de données à grande échelle, devrait doubler, passant d'environ 460 térawattheures (TWh) en 2022 à plus de 1 000 TWh d'ici 2026. Les centres de données, qui hébergent les serveurs et l'infrastructure nécessaires à ces opérations d'IA, sont donc d'importants consommateurs d'énergie.

74. Les centres de données d'IA fonctionnent 24 heures sur 24, ce qui nécessite une alimentation électrique continue et fiable. Contrairement aux sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et l'éolien, qui peuvent être intermittentes, l'énergie d'origine nucléaire assure une production d'énergie stable et constante. Cette fiabilité est essentielle pour assurer le fonctionnement ininterrompu des systèmes d'IA. En octobre 2024, X-energy a annoncé une levée de fonds d'environ 500 millions de dollars, avec l'aide d'Amazon, pour la première phase de son installation de fabrication de combustible TRISO-X à Oak Ridge dans le Tennessee (États-Unis). En décembre 2024, Meta a annoncé son intention d'ajouter 1 à 4 GWe de nouvelles capacités de production nucléaire aux États-Unis pour soutenir ses centres de données et contribuer à un réseau électrique plus propre et plus fiable. Ces initiatives soulignent la reconnaissance croissante du rôle de l'électronucléaire dans le soutien de l'IA et d'autres technologies de pointe. Google a conclu un partenariat avec Kairos Power, concepteur de SMR, pour alimenter ses centres de données. Le réacteur de Kairos Power devrait être opérationnel d'ici 2030, et d'autres réacteurs sont prévus jusqu'en 2035. Microsoft a signé un accord avec Constellation pour relancer un réacteur précédemment arrêté à Three Mile Island, en Pennsylvanie. Cette initiative vise à mettre en ligne une capacité nucléaire supplémentaire pour alimenter les centres de données de Microsoft. Le projet met en évidence le potentiel de réutilisation des infrastructures nucléaires existantes pour répondre aux besoins énergétiques modernes.

## D.7. Durabilité du combustible et cycles du combustible innovants

75. À la suite d'une tendance persistante à la baisse des prix de l'uranium qui a débuté en 2011 en raison de la chute de la demande d'uranium après Fukushima, de l'offre excédentaire d'uranium due à l'accumulation d'avant 2011, de la réduction des contrats passés par les compagnies d'électricité et de la disponibilité de l'offre secondaire d'uranium provenant de programmes tels que l'initiative « Megatons to Megawatts » entre les États-Unis et la Russie, les dépenses de prospection et d'exploitation des mines d'uranium ont diminué de façon spectaculaire d'environ 82 % (environ 2 milliards de dollars) entre 2014 et 2020. Dans la seconde moitié de 2021, les dépenses ont commencé à rebondir en réponse à une hausse spectaculaire des prix de l'uranium, atteignant un pic sur 24 ans de 160 dollars par livre d' $U_3O_8$  en janvier 2024, les données préliminaires pour 2023 suggérant une augmentation des dépenses à environ 840 millions de dollars, contre 377 millions de dollars en 2020.

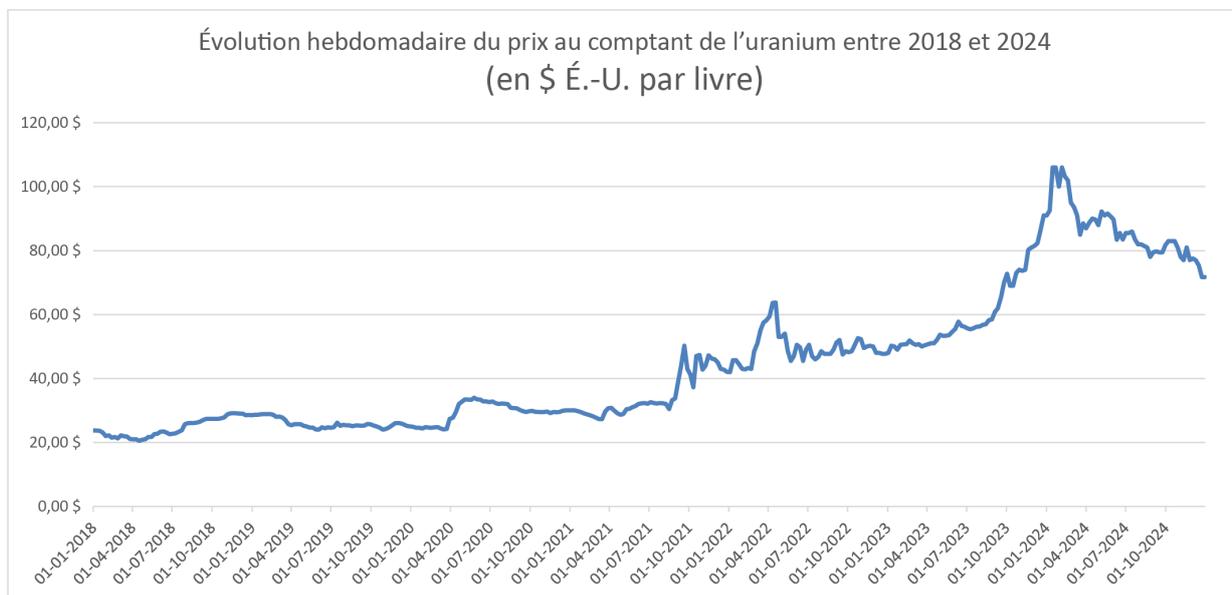


Fig. D.2. Évolution du prix au comptant de l'uranium depuis 2018. (Source : UxC)

76. Les estimations pour 2023 indiquent que 17 pays ont produit 54 345 tonnes d'uranium, ce qui représente 82,8 % du total de l'uranium mondial contribuant aux 65 650 tonnes requises, le reste de la demande étant comblé par les sources secondaires d'uranium. La capacité nucléaire mondiale devrait croître avec l'augmentation de la demande mondiale d'énergie, compte tenu notamment de l'engagement pris par 22 pays lors de la COP28 à Dubaï (Émirats arabes unis) de tripler leur capacité nucléaire d'ici 2050 [six autres pays se joignant à l'appel lors de la COP29 à Bakou (Azerbaïdjan)] et de la perspective d'un déploiement à grande échelle des SMR. Les besoins annuels mondiaux en uranium liés aux réacteurs devraient atteindre entre 90 000 et 142 000 tonnes d'ici 2050, ce qui nécessitera des investissements importants dans la prospection, l'extraction et le traitement de l'uranium.

Les estimations pour 2023 indiquent que  
**17 pays**  
ont produit  
**54 345 tonnes** d'uranium,  
ce qui représente  
**82,8 %** du total de l'uranium mondial  
contribuant aux 65 650 tonnes requises.

77. Les matières et les combustibles nucléaires avancés sont essentiels au déploiement de l'électronucléaire. Les principaux objectifs sont l'amélioration des marges de sûreté opérationnelle du combustible, la réduction des coûts et la minimisation de la production de déchets nucléaires. Les nouveaux types de combustible à base d'uranium faiblement enrichi à teneur élevée - HALEU et le déploiement prévu des SMR augmenteront la demande d'uranium. Au 1<sup>er</sup> janvier 2023, environ 5,9 millions de tonnes de ressources en uranium raisonnablement assurées et présumées étaient exploitables aux prix actuels du marché, et un peu plus de 90 % de ces ressources étaient situées dans 11 pays. La lixiviation in situ reste la principale méthode d'extraction, représentant près de 60 % de la production mondiale d'uranium en 2022.

78. Les concepteurs de combustibles et les compagnies d'électricité disposent de leurs propres systèmes de gestion de la qualité. La mise en commun des meilleures pratiques garantit la fiabilité et les performances élevées du combustible nucléaire. Des technologies avancées ou des combustibles résistant aux accidents sont en cours de mise au point pour améliorer la sûreté, la compétitivité et l'économie des réacteurs actuels et futurs. L'augmentation des taux de combustion de décharge et l'allongement des cycles d'exploitation du combustible augmentent les avantages économiques, mais nécessitent des investissements pour les démonstrations de sûreté et l'autorisation des installations.

79. Des capacités industrielles de conversion, d'enrichissement et de fabrication de combustibles nucléaires classiques existent dans le monde entier ; les exploitants doivent simplement assurer le fonctionnement à long terme des installations, en procédant à des mises à niveau et à une rationalisation des processus afin d'améliorer l'efficacité de la production tout en diminuant les coûts d'exploitation et en réduisant au minimum les déchets. Toutefois, les capacités industrielles de conversion, d'enrichissement et de fabrication de combustibles nucléaires avancés (tels que les combustibles à base d'UFE+ ou d'uranium faiblement enrichi à teneur élevée - HALEU) nécessaires pour les réacteurs avancés, en particulier les SMR, ne sont pas encore suffisantes pour répondre à la demande attendue.

Par conséquent, des efforts considérables en matière d'investissement, d'autorisation et de construction seront nécessaires pour garantir la chaîne d'approvisionnement de l'amont des cycles du combustible nucléaire avancé.

80. La gestion du combustible nucléaire usé reste une question essentielle. Deux stratégies existent : cycle ouvert (stockage définitif direct) et cycle fermé (retraitement et recyclage). Environ 70 % du combustible usé produit dans le monde sont entreposés dans l'attente d'une décision de recyclage ou de stockage définitif. Un taux de combustion plus élevé produit une chaleur résiduelle plus importante, ce qui accroît les besoins d'entreposage. La séparation et la transmutation des actinides mineurs continuent d'être étudiées pour réduire la production de chaleur et la radiotoxicité des déchets de haute activité.

81. Le recyclage du plutonium retraité et de l'uranium appauvri dans des combustibles à mélange d'oxydes (MOX) est une technologie mature qui s'appuie sur plus de 40 ans d'expérience. La Fédération de Russie, la France, le Japon et les Pays-Bas utilisent actuellement des combustibles MOX. Le recyclage a pour avantages de permettre de réduire le volume et la toxicité des déchets de haute activité, d'économiser les ressources en uranium et d'éliminer les matières génératrices de chaleur. Les systèmes de réacteurs avancés, tels que les réacteurs à neutrons rapides et les systèmes hybrides, peuvent améliorer l'efficacité du recyclage.

82. Le recyclage, bien que prévu à l'origine pour les réacteurs à neutrons rapides, a surtout été réalisé dans des réacteurs à neutrons thermiques. Les options de recyclage d'un cycle du combustible avancé, notamment le recyclage multiple de matières valorisables telles que l'uranium et le plutonium dans des réacteurs classiques à eau ordinaire et la transition vers des cycles du combustible fermés avec des réacteurs à neutrons rapides, sont sur le point de faire l'objet d'une démonstration à grande échelle, comme dans le cas du projet Proryv en Fédération de Russie.

83. Il existe des variantes du cycle fermé, dans lesquelles la séparation et le recyclage croissants du combustible usé génèrent des quantités décroissantes de déchets de haute activité, mais augmentent la complexité et les coûts du cycle du combustible. Des progrès sont réalisés en Fédération de Russie et en France en ce qui concerne le recyclage multiple du plutonium dans les combustibles REMIX, CORAIL et MIX. Ces combustibles recyclés facilitent la transition vers des stratégies de recyclage multiple du plutonium dans des réacteurs à neutrons rapides, permettant ainsi une utilisation plus efficace des ressources naturelles et une réduction des déchets. Des cycles du combustible entièrement fermés, avec de multiples retraitements et recyclages des combustibles usés, pourraient faire du nucléaire une source d'énergie presque renouvelable.

84. Les efforts nationaux et internationaux de recherche-développement se sont concentrés sur la mise en place de cycles du combustible nucléaire avancés et durables visant non seulement à améliorer l'utilisation des ressources en uranium, à maximiser la production d'énergie, à réduire le plus possible la production de déchets, à améliorer la sûreté et à limiter les risques de prolifération, mais aussi à recycler les actinides mineurs à longue période, à réduire le volume et la radiotoxicité des déchets de haute activité et à abaisser la chaleur résiduelle, ce qui diminue la charge de déchets et l'empreinte des installations de stockage définitif. Les approches collaboratives sont cruciales, comme le montre le projet GENIORS soutenu par les programmes-cadres de l'UE.

85. Certains États Membres donnent la priorité au recyclage du plutonium dans les réacteurs à neutrons rapides. Le réacteur commercial à neutrons rapides (BN-800) de la Fédération de Russie, entièrement chargé en combustible MOX contenant du plutonium récupéré à partir de combustible nucléaire usé, constitue une étape importante.

## D.8. Stockage définitif des déchets radioactifs

86. L'un des enjeux les plus importants pour les programmes de gestion et de stockage définitif des déchets radioactifs est de surmonter la perception négative selon laquelle « nous ne savons pas quoi faire des déchets ». Les héritages du passé, tels que les déchets mal caractérisés et mal conditionnés ou les approches inadéquates en matière de stockage définitif, contribuent à cette situation. L'absence de mécanismes de financement initial pour la gestion des déchets radioactifs exacerbe la perception d'un coût excessif, et l'opposition du public a retardé ou fait échouer de nombreux programmes antérieurs de stockage définitif.

87. La gestion des déchets radioactifs n'était pas un domaine établi lors du démarrage de l'électronucléaire, et les méthodes et technologies correspondantes ont dû être élaborées au fil du temps. Des décennies de progrès dans les méthodes de caractérisation et de traitement des déchets, ainsi que dans la technique des dépôts, combinées aux nombreux enseignements tirés des activités passées, ont toutefois permis d'acquérir une solide compréhension, et la réalité mondiale actuelle en ce qui concerne les responsabilités en matière de gestion des déchets radioactifs est nettement meilleure que ce que l'on pense. La plupart des déchets de très faible activité et de faible activité dans le monde ont déjà été stockés. La communauté internationale a considérablement progressé dans la conception de dépôts géologiques profonds pour les déchets de haute activité, avec des pays tels que le Canada, la Finlande, la France, la Suède et la Suisse, qui sont à la pointe dans ce domaine. La Finlande est sur le point d'inaugurer une installation de stockage définitif, la Suède a commencé les travaux de construction en janvier 2025 et la France prévoit un premier retour d'information technique au cours du second semestre de 2025 à l'issue du processus d'examen de la demande d'autorisation. En outre, des pays comme l'Allemagne, la Chine, l'Espagne, les États-Unis, la Hongrie, le Japon, la République de Corée, la République tchèque et le Royaume-Uni disposent de compétences et de ressources solides pour faire progresser leurs programmes nationaux de dépôt géologiques profonds, depuis les études génériques jusqu'à la procédure de choix d'un site.

88. Les pays sans programme électronucléaire - et qui n'ont donc pas la capacité de générer des revenus et de mettre de côté un fonds de gestion des déchets et de déclassement - ont néanmoins des besoins techniques comparables en matière de gestion des déchets radioactifs, bien qu'à une échelle beaucoup plus réduite. L'un des défis les plus importants auxquels ils sont confrontés est l'accès à des ressources budgétaires nationales adéquates pour faire face aux obligations à long terme liées aux technologies nucléaires.

89. La plus grande opportunité pour la future gestion des déchets radioactifs, et en particulier pour faire face aux responsabilités à long terme découlant du déploiement des technologies futures, telles que les SMR, est de tirer les enseignements des 60 dernières années et d'évaluer et d'anticiper ces responsabilités avant d'autoriser de nouvelles installations nucléaires. Cela nécessite l'application de cadres, de méthodes et de technologies nationaux appropriés pour faire face aux responsabilités en matière de gestion des déchets radioactifs. Une approche saine, avec une prise en compte des questions de gestion des déchets radioactifs au début de chaque étape du cycle de vie du nucléaire, y compris la conception de nouvelles installations, l'exploitation et le déclassement, peut réduire le fardeau de la gestion des déchets radioactifs.

90. Lorsque les flux de déchets et les responsabilités en matière de gestion sont anticipés sur la base de modèles de réacteurs et de processus physiques comparables à ceux des réacteurs à eau ordinaire ou lourde existants, il est possible d'anticiper les besoins futurs en matière de traitement des déchets, la capacité de stockage et de transport, et les options de stockage définitif. Dans le cas des réacteurs avancés, cependant, l'expérience industrielle antérieure ne permet souvent pas d'éclairer la gestion des

déchets radioactifs associée aux activités d'exploitation, de déclassement ou de cycle du combustible. Dans ce cas, il convient d'accorder une attention particulière aux propriétés des combustibles, des caloporteurs ou des modérateurs et aux approches adoptées pour les gérer. Un préalable à la protection contre les risques liés à la gestion des déchets et à la confiance dans la possibilité de les stocker est une compréhension adéquate des propriétés des déchets, suffisante pour évaluer la faisabilité technique et la sûreté de l'entreposage, du transport et, en fin de compte, du stockage définitif de ces déchets. La gestion des déchets peut nécessiter des étapes de traitement pour lesquelles la capacité industrielle n'est pas disponible, soit dans le pays d'origine des déchets, soit en tant qu'option industrielle d'un service de traitement international.

91. Pour changer les perceptions négatives, il faut des approches globales, des politiques plus claires, une meilleure caractérisation des déchets, de nouvelles stratégies de traitement et des efforts soutenus pour mettre en place des installations de stockage définitif. Les parties prenantes ont toujours considéré les déchets nucléaires comme un problème, mais des informations factuelles et la participation à des approches globales, ainsi qu'une évaluation claire des responsabilités à long terme avant la création de nouvelles installations nucléaires, peuvent contribuer à renouveler l'image de l'énergie nucléaire et le discours la concernant.

## **D.9. Déclassement**

92. Le déclassement des installations nucléaires et le stockage définitif des déchets radioactifs font partie intégrante d'une utilisation responsable de l'énergie nucléaire. Un nombre croissant de pays reconnaissent le besoin critique de mécanismes de financement solides, ainsi que de l'innovation technologique et de la clarté réglementaire, pour soutenir le déclassement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs. Les statistiques font état d'une augmentation des projets de déclassement, les estimations suggérant que plus de 150 réacteurs nucléaires dans le monde devront être déclassés d'ici 2050. Cela a mis davantage l'accent sur l'intégration de technologies avancées, telles que la robotique, l'IA et la télésurveillance, afin d'améliorer l'efficacité et la sûreté. En outre, les statistiques sur le déclassement soulignent l'importance de la coopération internationale, avec plusieurs initiatives axées sur la mise en commun des meilleures pratiques et l'harmonisation des approches réglementaires. Ces tendances soulignent la nécessité d'une planification préliminaire et de stratégies de déclassement adaptables permettant de relever efficacement les défis techniques et de répondre aux préoccupations du public.

93. Le cadre de l'économie circulaire, qui met l'accent sur l'efficacité des ressources, la réduction des déchets et les pratiques durables, est de plus en plus reconnu dans le domaine du déclassement nucléaire. Davantage de pays explorent des stratégies d'économie circulaire, notamment en prolongeant la durée de vie opérationnelle des installations nucléaires, en réduisant les déclassements prématurés et en exploitant les technologies de pointe pour un démantèlement efficace. Ces innovations permettent non seulement de diminuer la demande en ressources, de réduire l'impact sur l'environnement et de récupérer des matières, mais aussi de stimuler la croissance économique et la création d'emplois. Encourager les investissements dans la recherche-développement par des politiques de soutien peut accélérer les progrès technologiques dans ce domaine. Ces approches reflètent un engagement croissant en faveur de solutions durables et rentables qui s'alignent sur les objectifs environnementaux mondiaux et optimisent les processus de déclassement. En outre, la réaffectation de sites nucléaires déclassés à des activités durables renforce la résilience économique et favorise le développement des compétences du personnel.

94. Le déclassement nucléaire et la gestion des déchets radioactifs impliquent des responsabilités à long terme. La mise en place de mécanismes financiers et de garanties pour la surveillance durable, la

maintenance et la remise en état éventuelle des sites déclassés est un enjeu, en particulier dans des conditions économiques incertaines. La perception par le public des retards de projets nucléaires, des dépassements de budget et des risques associés peut constituer un obstacle à une application réussie de l'économie circulaire. Il est donc essentiel d'instaurer et de maintenir la confiance du public par une communication et un engagement transparents.

## **D.10. Mise en valeur des ressources humaines : la prochaine génération**

95. Dans certains pays, le secteur électronucléaire a eu du mal à attirer et à retenir les talents en raison de la baisse du soutien public et politique. La nature dynamique du personnel et la concurrence d'autres secteurs de haute technologie compliquent encore la situation. Des stratégies sont nécessaires pour impliquer efficacement le personnel, malgré le caractère discontinu des projets passés, qui a conduit à un manque de confiance dans la possibilité de faire carrière dans le secteur nucléaire.

96. Étant donné que la formation théorique et pratique et la certification des professionnels du nucléaire exigent des efforts et des investissements considérables, il est essentiel de conserver leurs talents. Un taux de rotation élevé peut entraîner une perte de connaissances et d'expérience essentielles si des processus efficaces de gestion des connaissances ne sont pas mis en place, notamment en ce qui concerne la chaîne d'approvisionnement nucléaire au sens large et ses sous-traitants, dont l'expérience est vitale pour garantir la sûreté et la qualité.

97. Malgré ces enjeux, des opportunités existent dans les pays qui se sont clairement engagés en faveur de l'électronucléaire. La promotion des avantages environnementaux de la production d'énergie bas carbone et de l'atténuation des changements climatiques peut attirer la prochaine génération. L'élaboration de programmes de formation, de parcours de carrière et d'opportunités de projets peut contribuer à attirer et à retenir des professionnels et du personnel technique diversifiés.

98. L'Agence encourage la coopération régionale et interrégionale pour le partage des expériences éducatives et des meilleures pratiques. La collaboration avec les réseaux régionaux et nationaux permet de consolider les ressources pour l'éducation théorique et pratique, de tirer parti des capacités et de promouvoir l'échange d'informations. Les organisations et réseaux existants soutiennent les jeunes professionnels du nucléaire et promeuvent les avantages du nucléaire pour leur génération. Les cadres de collaboration internationale offrent des opportunités attrayantes, des innovations et des perspectives plus larges.

99. Les gouvernements jouent un rôle crucial dans le soutien du personnel du secteur nucléaire en démontrant un engagement clair en faveur de l'électronucléaire et en établissant des conditions financières égales à celles des autres sources d'énergie verte. Ils doivent veiller à ce que les programmes de sciences, technologies, ingénierie et mathématiques (STIM) ainsi que la formation théorique et pratique dans le domaine nucléaire soient adaptés au secteur. Il est essentiel d'inclure la science et l'énergie nucléaires dans les programmes d'enseignement primaire et secondaire.

100. Reconnaître l'évolution des besoins et des désirs de la jeune génération peut permettre de relever les défis en matière de personnel. L'adoption des avancées technologiques et des innovations, comme la formation assistée par ordinateur et la réalité virtuelle, peut stimuler et renforcer la mise en valeur des ressources humaines. La mise en évidence des possibilités de carrière par le biais de partenariats avec d'autres secteurs de l'énergie bas carbone peut favoriser la mobilité entre les secteurs et réhabiliter l'électronucléaire.



101. Une coopération renforcée entre les pouvoirs publics, les industriels, les universités et les organisations internationales peut contribuer à améliorer les efforts de sensibilisation, à identifier les recrues potentielles et à offrir de meilleures possibilités de formation, renforçant ainsi l'attrait d'une carrière dans le nucléaire. Attirer davantage de femmes et les retenir dans le secteur nucléaire représente une opportunité importante de constituer un personnel diversifié et innovant. Les initiatives en faveur de l'égalité des genres, telles que le programme de bourses Marie Skłodowska-Curie et le programme Lise Meitner de l'AIEA, favorisent l'intégration du personnel.

102. Le secteur nucléaire fait largement appel à des sous-traitants, dont la compétence et la qualité du travail doivent être garanties. La formation des entrepreneurs et les évaluations après travaux peuvent atténuer les risques.

## D.11. Participation des parties prenantes

103. L'expérience montre que l'implication des parties prenantes - même celles qui n'ont pas de pouvoir décisionnel direct - peut renforcer la confiance du public, favoriser une prise de décision éclairée et renforcer la communication entre les principales organisations impliquées dans les programmes électronucléaires. L'engagement des parties prenantes à tous les stades du cycle du combustible nucléaire, jusqu'au stockage définitif des déchets radioactifs et du combustible nucléaire usé, est de plus en plus reconnu comme une nécessité stratégique et un élément essentiel de tout programme électronucléaire.

104. Une communication ouverte et transparente est essentielle pour instaurer la confiance dans les projets nucléaires. L'engagement doit commencer tôt et se poursuivre de manière cohérente, la responsabilité et l'engagement étant démontrés à chaque étape. Ce processus prend du temps et doit se poursuivre tout au long du cycle de vie de l'installation. Si la forme, le rythme et les priorités de l'engagement peuvent évoluer dans le temps, un dialogue permanent reste essentiel.

105. Ces dernières années, le soutien du public à l'électronucléaire s'est accru, sous l'effet de la crise énergétique mondiale et du besoin croissant d'une énergie propre et fiable. Cette évolution s'est traduite par l'inclusion historique de l'électronucléaire dans le bilan mondial au titre de l'Accord de Paris lors de la COP28 à Dubaï (Émirats arabes unis). Le sommet sur l'énergie nucléaire de 2024, organisé à Bruxelles par l'Agence et le Gouvernement belge, a renforcé cet élan, aboutissant à une déclaration sur l'électronucléaire approuvée par plus de 30 dirigeants mondiaux.

106. Pour maintenir cet élan, il est essentiel que les pouvoirs publics, les industriels et les autres acteurs clés intensifient leurs efforts pour impliquer les divers groupes de parties prenantes. Il est essentiel pour les pays qui se lancent dans l'électronucléaire, pour ceux qui développent leurs programmes et pour

ceux qui exploitent de grandes centrales nucléaires ou, à l'avenir, des SMR, de répondre de manière proactive aux préoccupations avant qu'elles ne deviennent des obstacles.

107. Les efforts clés pour un engagement efficace des parties prenantes sont les suivants :

- Engagement des responsables à promouvoir une culture de la communication et de l'engagement, en investissant dans des experts qualifiés et des services dotés de ressources suffisantes ;
- Collaboration entre les pouvoirs publics, les responsables de la réglementation, les exploitants, les organismes consultatifs et les organismes scientifiques afin de garantir une communication transparente sur les rôles, les responsabilités et les décisions ;
- Reconnaissance de l'évolution des besoins de communication tout au long du cycle de vie d'une installation, y compris lors du déclassement, de la réaffectation et du stockage définitif des déchets ;
- Écoute active et réactivité aux préoccupations des parties prenantes ;
- Communication transparente des événements importants affectant les installations nucléaires ;
- Réponses rapides aux demandes d'information et mises à jour régulières pour les parties prenantes ;
- Politique d'ouverture, comprenant des centres d'information du public, des visites de centrales et un engagement auprès des écoles et des organisations ;
- Rapports réguliers sur les performances des installations nucléaires, y compris les événements opérationnels, les émissions et les impacts lors d'incidents ou de situations d'urgence ;
- Communication claire sur les programmes nationaux de gestion des déchets radioactifs et les responsabilités à long terme ;
- Respect des engagements pris pour maintenir la crédibilité et la confiance ;
- Information proactive sur les faits concernant les contributions sociétales et environnementales de l'énergie nucléaire.



# IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

*L'atome pour la paix et le développement*

[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

Agence internationale de l'énergie atomique

B.P. 100, Centre international de Vienne

1400 Vienne (Autriche)

Téléphone : (+43-1) 2600-0

Fax : (+43-1) 2600-7

Courriel : [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org)