

Réservé à l'usage officiel

Point 18 de l'ordre du jour provisoire de la Conférence générale
(GC(65)/1 et Add.1)

Situation et perspectives internationales de l'électronucléaire 2021

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 internationale et les perspectives de l'énergie nucléaire, 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 2021

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 du changement climatique et le développement durable sont survenus aux niveaux national et international depuis la publication du rapport intitulé « Situation et perspectives internationales de l'électronucléaire 2017 » (document GOV/INF/2017/12-GC(61)/INF/8). 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. Il est de plus en plus admis au niveau mondial que garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable, conformément à l'objectif de développement durable (ODD) 7 des Nations Unies, est essentiel à la réalisation de l'intégralité, ou presque, des 16 autres ODD. Adoptés par les dirigeants mondiaux en septembre 2015, les ODD appellent tous les pays à prendre des mesures, d'ici à 2030, pour éliminer la pauvreté sous toutes ses formes, combattre les inégalités et lutter contre le changement climatique. Ces mesures doivent aller de pair avec des stratégies qui stimulent la croissance économique et répondent aux besoins sociaux, notamment l'éducation, la santé, la protection sociale et l'emploi, tout en combattant le changement climatique et en protégeant l'environnement. D'après le Département des affaires économiques et sociales de l'ONU (DESA), qui fait office de secrétariat pour les ODD, la réalisation de l'ODD 7 est indispensable à la réalisation de presque tous les autres ODD, de l'élimination de la pauvreté à l'atténuation du changement climatique en passant par l'amélioration de la santé, de l'éducation, de l'approvisionnement en eau et de l'industrialisation. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a exprimé le même avis à plusieurs reprises, affirmant notamment en mars 2018 que l'énergie est au cœur d'un grand nombre d'ODD, qu'il s'agisse d'accroître l'accès à l'électricité, d'améliorer les combustibles propres pour la cuisson des aliments, de réduire les subventions aux énergies qui sont source de gaspillage ou d'enrayer la pollution atmosphérique qui tue prématurément des millions de personnes dans le monde.

3. On estime qu'entre 70 et 78 gigatonnes (Gt) de dioxyde de carbone (CO₂) ont été évitées grâce à l'électronucléaire ces 50 dernières années, selon les technologies qui auraient été déployées à la place des centrales nucléaires construites. Il est difficile de calculer les émissions évitées grâce au parc actuel,

les alternatives à l'électronucléaire pouvant aller du gaz à une combinaison gaz-énergies renouvelables. Le pétrole et le charbon, rejoints plus tard par le gaz, constituaient clairement des alternatives entre 1970 et 2010. Les pays qui ont développé l'électronucléaire à grande échelle, comme la France et la Suède, sont parvenus à décarboner leur bouquet énergétique en deux à trois décennies. En 2019, l'électronucléaire a permis de produire 2 657 térawatt-heures (TW·h) d'électricité bas carbone, soit 10,4 % de la production mondiale ; si la même quantité avait été produite grâce au gaz, près de 1,5 Gt de CO₂ aurait été émise. Les analyses du cycle de vie des technologies de production d'électricité montrent que l'électronucléaire est une des technologies à l'intensité de carbone la plus faible, à égalité avec l'hydraulique et l'éolien. L'électronucléaire, associé aux énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et le photovoltaïque, reste une option déterminante pour décarboner le secteur de l'électricité dans les décennies à venir.

Impact carbone

Contribution du nucléaire

L'électronucléaire
a contribué à éviter **70 Gt à 78 Gt**

d'émissions de **CO₂** au cours des 50
dernières années.

4. Le rôle majeur que joue l'électronucléaire dans l'atténuation du changement climatique et le développement durable est de plus en plus reconnu au niveau international. De nombreuses organisations nationales et internationales ont analysé les besoins de décarbonation du système énergétique pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, et nombre de leurs scénarios préconisent une augmentation substantielle de la capacité électronucléaire mondiale. Les quatre scénarios décrits par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans le rapport spécial de 2018 intitulé *Global Warming of 1.5°C*, notamment, recommandent une augmentation de la capacité électronucléaire de 60 à 500 % à l'horizon 2050 pour atteindre l'objectif d'une hausse limitée à 1,5 °C. En même temps, l'électronucléaire apparaît comme une option majeure pour répondre à la demande énergétique croissante des pays en développement et améliorer les conditions de vie sans faire grimper les émissions de gaz à effet de serre (GES). D'après le scénario « Développement durable » décrit par l'AIE dans la publication *World Energy Outlook 2019*, il est essentiel de déployer intensivement l'électronucléaire dans d'autres pays que les pays primo-accédants habituels, notamment des pays en développement, et dans d'autres secteurs que le secteur énergétique pour avoir une chance réelle d'atteindre les objectifs relatifs au changement climatique et les autres ODD touchant à l'énergie.

Scénarios GIEC

Contribution du nucléaire

Pour atteindre l'objectif d'une hausse limitée à 1,5 °C,
4 scénarios du GIEC recommandent
une augmentation de capacité de



60 à 500 %
à l'horizon 2050.

5. En octobre 2019, l'Agence a organisé la première Conférence internationale sur les changements climatiques et le rôle de l'électronucléaire. Cet événement, qui a attiré plus de 500 participants

de 79 États Membres et 17 organisations internationales, a rassemblé pour la première fois les dirigeants des principales organisations internationales s'intéressant à l'énergie et au changement climatique (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, GIEC, AIE et DESA) autour de débats sur la place de l'électronucléaire dans la lutte contre le réchauffement climatique. L'électronucléaire a un rôle majeur à jouer dans la décarbonation du secteur énergétique en vue de la réalisation des objectifs climatiques mondiaux, mais des politiques favorables seront nécessaires pour lui permettre de réaliser pleinement son potentiel, a déclaré le Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de l'énergie nucléaire et président de la Conférence, Mikhail Chudakov, dans son discours de clôture.

6. Dans son rapport de mai 2019 intitulé *Nuclear Power in a Clean Energy System*, l'AIE a averti que l'incapacité à prendre rapidement des décisions sur l'électronucléaire engendrerait une hausse des coûts de la transition vers une énergie propre et compliquerait considérablement la réalisation de l'objectif du zéro net. Le même avertissement figure dans le rapport phare de l'AIE *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, publié en mai 2021, qui décrit une série de mesures susceptibles de permettre l'élimination globale des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050. Dans ce rapport, l'AIE prévoit que la capacité de production électronucléaire aura presque doublé d'ici à 2050, avec un taux de connexion au réseau atteignant quelque 30 gigawatts par an certaines années, malgré une diminution de 8 % de la part globale de l'électronucléaire dans la production mondiale d'électricité en 2050. Le reste du bouquet énergétique en 2050, dans ce scénario, est dominé par les énergies renouvelables, en particulier les énergies solaire et éolienne. Cependant, dans un rapport récent intitulé *The role of critical minerals in clean energy transitions*, l'AIE a aussi signalé que les technologies éolienne et solaire et les technologies de batterie dépendaient fortement des minerais critiques et que leur déploiement pouvait être freiné si ces minerais n'étaient pas disponibles en suffisance. L'électronucléaire, en revanche, est, avec l'énergie hydroélectrique, l'une des technologies bas carbone ayant la plus faible intensité de minerai.

7. Dans un rapport publié en septembre 2018, l'Energy Initiative de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) a appelé à une augmentation majeure de la capacité de production électronucléaire mondiale pour atteindre l'objectif du zéro net. Elle a exposé des politiques qui permettraient à l'électronucléaire de concurrencer les autres énergies bas carbone dans des conditions plus équitables et décrit les mesures à prendre pour réduire le coût des nouvelles constructions nucléaires. Comme l'AIE, elle a conclu que la transition vers une énergie propre serait beaucoup plus coûteuse et difficile sans une contribution majeure de l'énergie acheminable d'origine nucléaire.

8. D'après le rapport intitulé *Projected Costs of Generating Electricity*, publié conjointement par l'AIE et l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE en décembre 2020, prolonger la durée de vie utile des centrales nucléaires existantes est l'investissement le plus rentable pour la production d'électricité à faible émission de carbone. L'énergie hydraulique peut certes apporter une contribution similaire à des coûts comparables, mais elle reste très dépendante des ressources naturelles de chaque pays.

9. Dans un rapport publié en mars 2021, la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe a affirmé que l'électronucléaire était un outil indispensable à la réalisation des ODD qui avait un rôle crucial à jouer dans la fourniture d'énergie à un coût abordable, l'atténuation du changement climatique, l'élimination de la pauvreté et de la faim, la création de croissance économique, l'innovation industrielle et l'approvisionnement en eau propre. Dans ce rapport, intitulé *Application of the United Nations Framework Classification for Resources and the United Nations Resource Management System: Use of Nuclear Fuel Resources for Sustainable Development – Entry Pathways*, elle souligne que l'énergie nucléaire, fiable, peut être une composante essentielle des systèmes énergétiques décarbonés des pays qui cherchent à atteindre les objectifs liés au changement climatique et au développement durable.

10. Le Centre commun de recherche (CCR), le service de la Commission européenne pour la science et le savoir, a déclaré dans une évaluation technique datée de mars 2021 qu'il n'y avait aucune donnée scientifique indiquant que l'énergie nucléaire est plus néfaste pour la santé humaine ou l'environnement que les autres technologies de production électrique à faible émission de carbone déjà inscrites dans la taxinomie de l'UE comme activités favorables à l'atténuation du changement climatique. L'évaluation a été réalisée sur la base du principe de « ne pas causer de préjudice important » énoncé dans le règlement sur la taxinomie de l'Union européenne, qui porte établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables et prépare le terrain pour l'intensification des investissements bas carbone dans l'Union européenne, le moment venu. Le rapport du CCR cite des données de 2016 montrant que l'électronucléaire donne de très bons résultats en termes de conséquences sanitaires par rapport aux autres sources d'énergie, ces conséquences étant évaluées en utilisant l'année de vie ajustée en fonction de l'incapacité, qui mesure la charge d'une maladie exprimée en tant que nombre d'années perdues du fait d'une mauvaise santé, d'une invalidité ou d'un décès prématuré.

11. Les investissements dans les sources d'énergie propres comme le solaire, l'éolien et le nucléaire ont une incidence sur le produit intérieur brut (PIB) deux à sept fois plus grande que ceux dans les sources fossiles telles que le gaz, le charbon et le pétrole, d'après un document de travail intitulé *Building Back Better: How Big Are Green Spending Multipliers?* publié par le Fonds monétaire international (FMI) en mars 2021. En outre, d'après le même document, l'électronucléaire a un effet multiplicateur économique plus élevé que n'importe quelle autre source d'énergie propre, il crée environ 25 % d'emploi de plus par unité d'électricité que l'énergie éolienne, et le salaire des travailleurs dans le secteur nucléaire est supérieur d'un tiers à celui des travailleurs dans le secteur des énergies renouvelables.



B. L'électronucléaire aujourd'hui

12. À la fin de 2020, la capacité nucléaire mondiale était de 392,6 GWe¹, comprenant 442 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans 32 pays. Les pays ont démontré leur capacité d'adaptation face à la pandémie de maladie à coronavirus (COVID-19) en prenant des mesures efficaces, qui témoignent d'une solide culture organisationnelle. Au début de la pandémie, à l'orée de 2020, l'Agence a créé le Réseau d'expérience d'exploitation des centrales nucléaires en temps de COVID-19 pour permettre l'échange d'informations sur les mesures destinées à atténuer la pandémie et ses effets sur l'exploitation des centrales nucléaires. Aucun des 32 pays exploitant des centrales nucléaires n'a signalé

¹ Un GWe (gigawatt électrique) correspond à un milliard de watts d'énergie électrique. Ensemble des données sur les réacteurs nucléaires de puissance communiquées au Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'AIEA au 1^{er} juin 2021.

d'événement dû à la pandémie qui serait survenu au cours de l'exploitation d'une centrale nucléaire et en aurait compromis la sûreté et la fiabilité.

À la fin de 2020,
la capacité électronucléaire mondiale était de 392,6 GWe
comportant **442** réacteurs nucléaires de puissance en exploitation
dans **32** pays.

13. En 2020, l'électronucléaire a permis de fournir environ 2 553,2 TW·h d'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, soit environ 10 % du total de la production mondiale d'électricité et près d'un tiers de la production mondiale d'électricité bas carbone.

14. Quelque 5,5 GWe de capacité nucléaire ont été ajoutés au réseau du fait du couplage de cinq nouveaux réacteurs à eau sous pression (REP) : 1 110 mégawatts électriques (MWe) par Belarussian-1 au Bélarus, 1 000 MWe par Tianwan-5 et 1 000 MWe par Fuqing-5 en Chine, 1 345 MWe par Barakah-1 aux Émirats arabes unis, et 1 066 MWe par Leningrad 2-2 en Fédération de Russie. Le démarrage de Belarussian-1 au Bélarus et de Barakah-1 aux Émirats arabes unis a marqué le début de la production d'électricité d'origine nucléaire dans ces deux pays.

15. L'exploitation commerciale de l'Akademik Lomonosov, premier petit réacteur modulaire (PRM) avancé et unique centrale nucléaire flottante au monde, a commencé en 2020. Positionnée au large de la côte arctique de la Fédération de Russie, cette centrale est dotée de deux réacteurs KLT-40S de 35 MWe chacun.






16. Les réacteurs modérés et refroidis à l'eau ordinaire représentaient 89,5 % de la capacité nucléaire mondiale en service, les réacteurs modérés et refroidis à l'eau lourde 6 %, les réacteurs refroidis par eau ordinaire et modérés au graphite (REOMG) 2 % et les réacteurs refroidis par gaz 2 %. Les 0,5 % restants correspondaient à trois réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide ayant une capacité totale de 1,4 GWe.

17. En 2020, 5,2 GWe de capacité nucléaire ont été retirés du fait de la mise à l'arrêt définitive de six réacteurs nucléaires de puissance : Duane Arnold-1 [réacteur à eau bouillante (REB) de 601 MWe] et Indian Point-2 (REP de 998 MWe) aux États-Unis d'Amérique ; Leningrad-2 (REOMG de 925 MWe) en Fédération de Russie ; Fessenheim-1 et Fessenheim-2 (deux REP de 880 MWe chacun) en France ; et Ringhals-1 (REB de 881 MWe), en Suède, qui a été mis à l'arrêt le dernier jour de l'année 2020 après plus de 46 années d'exploitation.

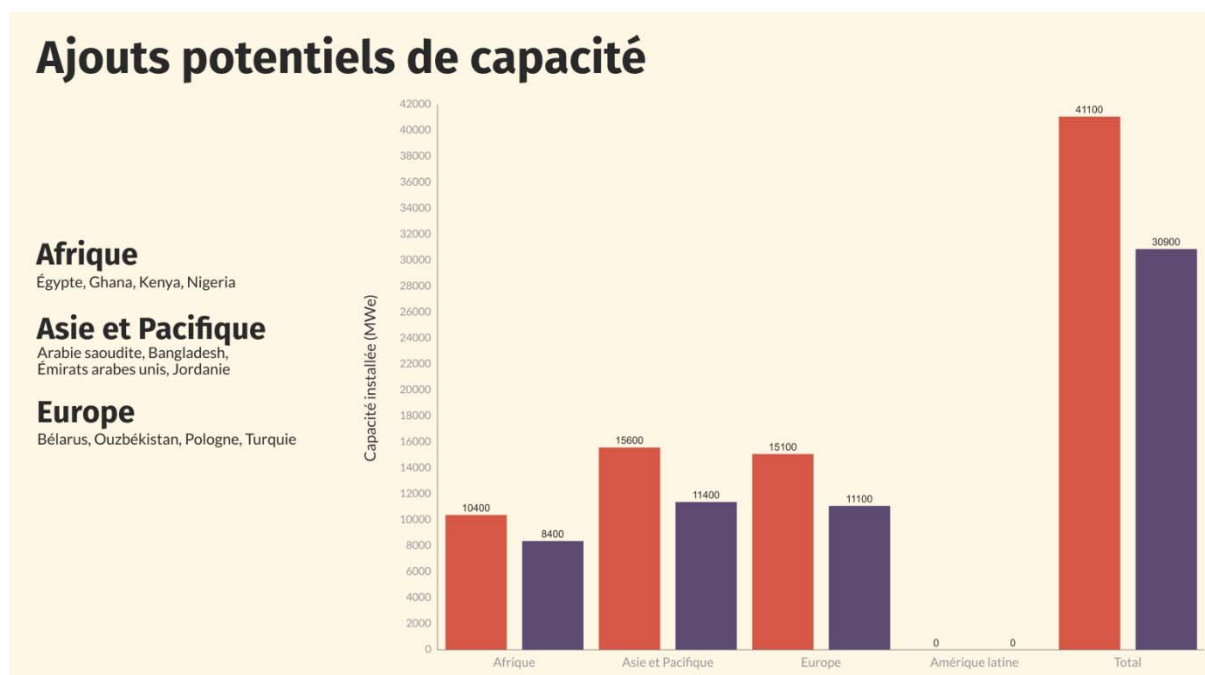
18. Dans l'ensemble, la capacité électronucléaire a connu une hausse progressive ces dix dernières années, avec quelque 23,7 GWe de capacité supplémentaire provenant de nouveaux réacteurs ou de la mise à niveau de réacteurs existants. La production d'énergie d'origine nucléaire a affiché une croissance continue, de plus de 6 % depuis 2011.

19. Sur les 52 réacteurs en construction, 9 se trouvent dans des pays primo-accédants. Au total, 28 pays ont exprimé leur intérêt pour l'électronucléaire et envisagent, prévoient ou s'efforcent activement de l'intégrer dans leur bouquet énergétique. Vingt-quatre autres États Membres participent aux activités de l'Agence relatives à l'infrastructure nucléaire ou à des projets de planification énergétique menés dans le cadre du programme de coopération technique. Entre 10 et 12 pays primo-accédants prévoient

d'exploiter des centrales nucléaires d'ici à 2030-2035, ce qui représente une augmentation potentielle de près de 30 % du nombre de pays exploitants. Plusieurs pays primo-accédants, en particulier l'Arabie saoudite, l'Estonie, le Ghana, la Jordanie, le Kenya, la Pologne et le Soudan, ont aussi exprimé leur intérêt pour la technologie des PRM, de même que certains pays qui développent leur programme électronucléaire, comme l'Afrique du Sud. Suivant son approche par étapes, l'AIEA propose le service d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) aux pays qui entreprennent ou développent un programme électronucléaire afin de garantir que l'infrastructure nécessaire à l'utilisation sûre, sécurisée et durable de l'électronucléaire est élaborée et mise en place de façon responsable et ordonnée.

Pays ayant une première centrale nucléaire en construction	4	
Pays négociant ou ayant signé un premier contrat relatif à une centrale nucléaire	2	
Pays prêts à prendre une décision ou étant déjà décidés à recourir à l'électronucléaire et ayant commencé à préparer l'infrastructure	6	
Pays se préparant activement sans avoir pris de décision définitive	8	
Pays envisageant un programme électronucléaire	8	


20. Le service INIR, qui aide les États Membres à évaluer l'état de leur infrastructure nucléaire nationale et à repérer les lacunes de manière systématique et intégrée, reste très demandé. À ce jour, 32 missions INIR ont été réalisées pour 22 États Membres.



C. Perspectives de l'électronucléaire

21. Les scénarios compatibles avec les objectifs énoncés dans l'Accord de Paris de 2015 montrent généralement que l'électronucléaire est essentiel à la décarbonation du secteur énergétique du fait qu'il fournit au réseau une électricité fiable à faible émission de carbone 24 heures sur 24. La hausse globale de la demande visant à répondre aux besoins de la population mondiale et à assurer l'accès universel à l'électricité d'ici à 2050, et l'électrification croissante de l'économie, exigeront une augmentation considérable de la production d'électricité bas carbone. La majorité de la production devrait provenir des énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien et le photovoltaïque, mais le nucléaire continuera de fournir entre 8 et 10 % de l'électricité mondiale et offrira la flexibilité et l'acheminabilité requises par les systèmes électriques à faible émission de carbone. Dans les projections hautes de l'Agence pour 2050, la capacité nucléaire installée serait portée à 715 GWe du fait de l'exploitation intensive à long terme du parc existant et de l'ajout de 500 GWe par les nouvelles constructions attendues sur trois décennies. Dans l'hypothèse basse, la capacité mondiale de production d'électricité d'origine nucléaire diminuerait de 7 % d'ici à 2050 pour tomber à 363 GWe, soit 6 % de la production d'électricité mondiale, contre environ 10 % en 2019. Néanmoins, l'hypothèse basse aussi prévoit la construction d'un grand nombre de centrales nucléaires, supposant qu'environ un tiers des réacteurs de puissance actuels auront été retirés du service en 2030 tandis que les nouveaux réacteurs apporteront une capacité supplémentaire de près de 80 GWe. On s'attend à ce que, entre 2030 et 2050, les capacités supplémentaires des nouveaux réacteurs compensent à peu de choses près les capacités retirées.

Projection haute AIEA

Capacité nucléaire installée portée à **715 GWe** 
reposant sur l'exploitation à long terme du parc existant, et
500 GWe de nouvelles constructions sur trois décennies.

22. Pour se relever de la pandémie de COVID-19, les gouvernements du monde entier réfléchissent à adopter des ensembles de mesures d'aide économique. Celles-ci offrent une occasion unique d'aligner l'investissement public sur les impératifs de la transition vers une énergie propre. Une attention particulière est donc portée aux effets de l'investissement dans les technologies vertes. En mars 2021, le FMI a publié un document de travail montrant que l'investissement dans les technologies vertes a plus de répercussions sur le PIB national que l'investissement dans les actifs liés aux énergies fossiles. En outre, l'investissement dans des programmes nucléaires a une plus grande incidence (plus grand coefficient multiplicateur du PIB) que l'investissement dans d'autres technologies vertes. Les analyses macroéconomiques réalisées par l'Agence montrent également que les projets électronucléaires créent plus d'emplois bien rémunérés et ont d'autres effets positifs sur l'économie.

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

D.1. Financement

23. L'investissement initial associé au développement d'une nouvelle centrale nucléaire est considérable et peut représenter les trois quarts du coût actualisé de l'électricité d'origine nucléaire. Cet élément de passif portant intérêt est liquidé tout au long de la durée de vie d'une centrale grâce aux recettes générées par l'électricité produite. Cependant, les projets à forte intensité de capital sont sensibles aux variations du taux d'intérêt et à la durée de la construction, ainsi qu'à la nature de ces incertitudes. Plusieurs modèles de financement possibles ont été mis au point pour remédier à certaines de ces incertitudes, en particulier les risques de marché auxquels les promoteurs de projets – et les pourvoyeurs de fonds – pourraient être exposés pendant la phase d'exploitation du cycle de vie d'une centrale. Ces risques peuvent être atténués par des contrats – éventuellement soutenus par le gouvernement du pays dans lequel est implantée la centrale – prévoyant l'achat d'une partie ou de l'intégralité de la production d'une centrale à un prix garanti. Ce type de contrat a joué un rôle déterminant dans le développement de certaines centrales nucléaires, notamment celles d'Olkiluoto et de Hanhikivi en Finlande, celle d'Akkuyu en Turquie et Hinkley Point C au Royaume-Uni.

Ententes de prix garantis

pour l'achat de toute ou partie de l'électricité produite par une centrale nucléaire



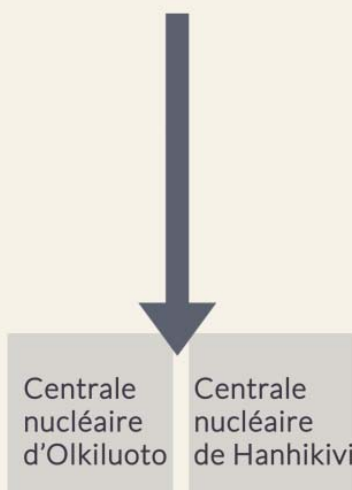
Finlande



Turquie



Royaume-Uni



24. Les risques associés aux premiers stades du cycle de vie d'une centrale nucléaire – ceux liés aux retards de construction et aux dépassements des coûts y afférents – peuvent être atténués de plusieurs façons. Par exemple, le gouvernement hôte peut donner des garanties souveraines directes aux prêteurs, ou les vendeurs de circuits d'alimentation en vapeur nucléaire peuvent accepter de participer au capital du projet, comme cela s'est produit pour la centrale de Barakah aux Émirats arabes unis (participation de 18 % de la Compagnie d'électricité de Corée dans Nawah Energy et Barakah One Company), pour la centrale de Hanhikivi en Finlande (achat de 34 % des parts par la Corporation d'État de l'énergie atomique de la Fédération de Russie « Rosatom ») et pour Hinkley Point C au Royaume-Uni (détention de deux tiers et un tiers des parts, respectivement, par Électricité de France et China General Nuclear Power Group). Pour les récents projets de nouvelles constructions dans des pays entreprenant ou développant un programme électronucléaire, comme le Bangladesh, le Bélarus, l'Égypte, la Hongrie, l'Iran et le Pakistan, le pays vendeur et le gouvernement hôte ont choisi de conclure des accords intergouvernementaux portant sur l'octroi de prêts de l'État.

25. Les PRM peuvent présenter des avantages par rapport aux grands réacteurs, par exemple des délais de construction plus courts, un investissement initial moins élevé, la compatibilité avec des réseaux de plus faible capacité et une modularité extensible permettant une réponse progressive à la demande. Ces avantages peuvent entraîner une révision des modèles de financement utilisés actuellement pour les centrales de grande taille. Si la démonstration des PRM se confirme au cours des quelque dix prochaines années, un nombre croissant de pays entreprenant ou développant un programme électronucléaire pourraient être incités à prendre en considération ce type de réacteur. Les investisseurs privés s'intéressent de plus en plus au développement, à la démonstration et au déploiement de cette technologie.

26. Les coûts générés à la fin de la durée de vie utile d'une installation, notamment ceux liés au déclassement de l'installation et à la gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité, constituent aussi un passif important. Comme pour les coûts liés à la partie initiale, des provisions doivent être constituées à partir des recettes d'exploitation pour couvrir les coûts associés à la partie terminale, qui peuvent représenter jusqu'à 10 % du coût actualisé de l'électricité d'origine nucléaire. La législation relative à l'utilisation de l'énergie nucléaire définit généralement des exigences concernant la constitution, pendant la période dans laquelle la centrale génère des recettes, de réserves destinées à couvrir les dépenses liées à la partie terminale. Il existe de nombreuses approches différentes, de la constitution de provisions suffisantes dans la comptabilité de l'entreprise au transfert des fonds à un organisme indépendant chargé d'en assurer la gestion et d'effectuer les décaissements le moment venu.

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

27. Les principaux changements survenus sur les marchés mondiaux de l'énergie depuis 2017 sont le déploiement continu de vastes capacités d'énergie renouvelable à des coûts dégressifs (pour le solaire et le photovoltaïque), le déplacement de la demande d'électricité des pays membres de l'OCDE aux pays non-membres compte tenu de l'électrification accrue de divers secteurs, l'augmentation significative de la tarification du carbone sous l'effet des politiques et l'évolution des mécanismes d'échange de droits d'émission. L'élaboration de « taxinomies » ou, plus généralement, de critères de gouvernance environnementale et sociale pour les investissements durables, et l'engagement accru de nombreux États Membres à parvenir à zéro émission nette d'ici à la moitié du siècle ont rendu les actifs « charbon » encombrants et dissuadé les institutions financières d'investir dans le charbon. La production électronucléaire a continué de croître, atteignant en 2019 son deuxième niveau le plus élevé. En 2020, les confinements liés à la COVID-19 ont secoué les marchés de l'énergie : en l'espace de quelques mois, la demande s'est écroulée et la production d'électricité à partir de combustibles fossiles a chuté encore davantage en faveur des technologies ayant un coût marginal faible, comme les énergies renouvelables et le nucléaire. Les émissions sont depuis reparties à la hausse, en même temps que la reprise économique. En plus de s'efforcer de réduire les émissions de carbone, les décideurs doivent répondre au besoin de sécurité de l'approvisionnement, de qualité de l'air et de résilience.

28. L'Accord de Paris devrait favoriser le développement de l'électronucléaire si son potentiel en tant que source d'énergie à faible émission de carbone est plus largement reconnu. Le rapport spécial du GIEC intitulé *Global Warming of 1.5°C*, paru en 2018, et le récent rapport de l'AIE intitulé *Net Zero By 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* montrent que la plupart des trajectoires vers le zéro net incluent l'électronucléaire, avec un doublement de la production électronucléaire au cours des trente prochaines années. À ce jour, les contributions déterminées au niveau national dans le cadre de l'Accord de Paris, actualisées récemment, ne semblent pas indiquer que l'électronucléaire gagnera en importance dans les stratégies nationales d'atténuation du changement climatique. Cependant, dans certains pays, la question du changement climatique est un argument en faveur de la poursuite de l'exploitation des centrales nucléaires ou de la construction de nouvelles installations. Un des atouts manifestes de l'électronucléaire est sa contribution à la décarbonation des secteurs difficiles à décarboner en raison du coût (*hard-to-abate*), qui ne peuvent pas être électrifiés facilement. La chaleur ou l'hydrogène bas carbone produits par les centrales et les réacteurs avancés existants pourraient jouer un rôle clé dans la réalisation des objectifs de zéro émission nette des pays, pour autant que la technologie associée devienne commercialement viable dans les quelque dix prochaines années. Entretemps, il reste crucial d'accroître la place du nucléaire dans la production d'électricité et, dans une certaine mesure, de chaleur à faible émission de carbone en assurant l'exploitation à long terme des centrales existantes et des nouvelles.

29. Les projections de l'Agence pour 2050 montrent qu'il faudra au minimum doubler la capacité électronucléaire actuelle d'ici à 2050 pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, ce qui rejoint les

projections de l'AIE. Les politiques énergétiques et les stimulations du marché de l'électricité promouvant tous les types de solutions bas carbone, dont l'électronucléaire, joueront un rôle fondamental pour ce qui est d'encourager l'investissement dans l'électronucléaire et réduiront les risques et les coûts de financement, ce qui est indispensable pour assurer le déploiement en temps voulu de l'électronucléaire aux fins de l'atténuation du changement climatique. En parallèle, il est nécessaire de reconnaître les avantages de l'électronucléaire en matière de sécurité de l'approvisionnement, de fiabilité et de prévisibilité, ainsi que sa contribution à la résilience climatique des infrastructures énergétiques. C'est d'autant plus important du fait que nous utilisons de plus en plus les énergies renouvelables alternatives, comme l'éolien et le photovoltaïque, pour produire de l'électricité. Des politiques récentes mettent en évidence le rôle des marchés énergétiques dans le développement de l'électronucléaire ; c'est le cas, par exemple, des mécanismes du contrat de différence ou de la base d'actifs régulés envisagés au Royaume-Uni pour les nouveaux projets nucléaires afin de garantir un retour sur investissement, et des différentes mesures adoptées dans plusieurs États des États-Unis d'Amérique (New York, Illinois, Connecticut, New Jersey et Ohio) pour valoriser la production d'électricité d'origine nucléaire à faible émission de carbone et soutenir les centrales nucléaires existantes.

D.3. Résilience

30. La tempête hivernale qui a frappé l'Amérique du Nord en février 2021, provoquant des pannes d'électricité dues à une combinaison de facteurs, a montré l'importance de la résilience des systèmes énergétiques. La fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes devraient croître sous l'effet du réchauffement climatique. Tempêtes hivernales, fortes inondations, vagues de chaleur ou sécheresses, ces événements peuvent avoir une incidence sur les biens de production ainsi que sur les infrastructures du réseau électrique. Un nombre croissant d'arrêts liés à des événements climatiques ont été signalés² dans le secteur nucléaire ces dernières décennies, mais la perte de production qui en a découlé a été relativement limitée du fait que les centrales nucléaires sont conçues pour fonctionner de manière sûre et efficiente dans des conditions climatiques extrêmes.

31. Des mesures d'adaptation spéciales ont été mises en place dans les centrales susceptibles d'être les plus exposées à l'inondation ou à la perte d'efficacité de refroidissement comme suite à des vagues de chaleur ou des sécheresses. Cependant, si les investissements visant à garantir les plus hauts niveaux de sûreté sont systématiquement faits, les mesures d'adaptation destinées uniquement à améliorer la performance d'une centrale lors d'événements liés au climat peuvent être mises en œuvre ou non en fonction du retour sur investissement attendu. Cette décision économique appartient aux entreprises de services publics, qui doivent estimer le coût de l'adaptation et le rendement escompté sur la base de la durée de vie restante de la centrale et des profits qui découleraient d'une centrale plus performante/productive. Le prix de l'électricité sur les marchés joue un rôle déterminant, et les prix de gros peu élevés observés en Europe et en Amérique du Nord ces dix dernières années ont été propices aux investissements dans ce type de mesure d'adaptation. Pour les nouvelles constructions, le choix du site et de la taille des équipements tient également compte des risques potentiels des événements climatiques qui pourraient se produire au cours du siècle.

32. Pendant les confinements liés à la COVID-19, les États Membres se sont attachés avant tout à assurer la sûreté et le bien-être du personnel en prenant rapidement des mesures pour réduire au minimum le risque de propagation de la pandémie, tout en maintenant la continuité des opérations ainsi que la sûreté, la sécurité et la viabilité des centrales à des niveaux adéquats. Aucun État Membre n'a signalé avoir dû mettre à l'arrêt un réacteur nucléaire de puissance en raison des effets de la COVID-19 sur le personnel ou sur des services essentiels tels que les chaînes d'approvisionnement. Les organismes

² Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA (PRIS).

de réglementation ont généralement appliqué une approche graduée pendant la pandémie et ajusté la portée des inspections réglementaires ou autres en fonction de leur importance du point de vue de la sûreté. Vingt-six des 32 États Membres ayant des centrales nucléaires en exploitation ont fait état à l'Agence d'incidences sur l'arrêt de réacteurs. Dans certains cas, les activités non essentielles ont été annulées afin d'atténuer la portée de l'arrêt et de réduire au minimum la présence de sous-traitants sur le site. Parfois, l'arrêt a été prolongé pour que les travaux puissent se dérouler plus lentement dans le respect des mesures de distanciation physique. Dans d'autres cas encore, l'arrêt a été purement et simplement reporté à l'année suivante. Ces incidences se feront sentir au moins pendant toute l'année prochaine, puisque la planification des arrêts futurs, en cours de révision, prend en considération la conduite à terme des activités reportées.

D.4. Réacteurs avancés et applications non électriques

33. Des progrès notables ont été réalisés dans le développement de PRM de toutes lignées technologiques, gammes de puissances, catégories d'utilisation et modes de déploiement. Les principales incitations à développer cette technologie sont l'investissement réduit, la réduction des délais de construction, la souplesse dans le choix du site et la possibilité d'utiliser les PRM à des fins très diverses, notamment pour remplacer les centrales à combustibles fossiles retirées du service, ainsi que leur capacité de fonctionner dans des systèmes énergétiques intégrés avec des sources d'énergie renouvelables et des applications non électriques telles que la production de chaleur et d'hydrogène bas carbone.

34. Le premier PRM, d'une capacité de 70 MWe, a été déployé dans une unité flottante de production d'électricité établie en mer, en Fédération de Russie, et est exploité commercialement depuis mai 2020. En ce qui concerne les PRM établis sur terre, le premier réacteur modulaire à haute température refroidi par gaz (RHTRG) est actuellement soumis à des essais fonctionnels à chaud en vue de sa connexion au réseau électrique vers la fin de 2021 en Chine. On peut également citer en exemple le REP intégré de type PRM, dont la construction en Argentine est à un stade avancé (75 %) ; d'une capacité prévue de 30 MWe, il devrait être mis en service et atteindre la criticité en 2024.

35. La compétitivité technologique des PRM devrait être assurée grâce à un haut degré de modularité permettant de réduire les coûts et les délais de construction et par la perspective d'« économies de production en série » au lieu des « économies d'échelle » des grands réacteurs. Il existe actuellement 72 modèles de PRM à divers niveaux de maturité technologique³, dont 25 devraient être déployés d'ici à 2030. Si les conditions mondiales de déploiement sont optimales, notamment en ce qui concerne le cycle du combustible, les PRM pourraient fournir une capacité supplémentaire de 1,6 GWe. Néanmoins, certaines questions liées au déploiement doivent encore être réglées et la compétitivité commerciale des PRM doit encore être établie, ce qui suppose de démontrer la sûreté et la performance d'exploitation des premiers réacteurs d'un modèle ou d'une technologie donnés, de garantir la continuité des commandes et la compétitivité en matière de coûts par rapport aux alternatives, de mettre en place une chaîne d'approvisionnement solide, un cycle du combustible adapté et des mécanismes de financement viables et d'établir des cadres réglementaires (procédures d'autorisation) harmonisés. Une infrastructure nucléaire appropriée devrait être mise en place pour assurer la gouvernance responsable du déploiement en série à grande échelle sur de nouveaux marchés.

³ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, Vienna (2020).

Il y a actuellement

72 modèles de PRM à divers niveaux de maturité technologique,

dont

25 modèles de PRM devraient être déployés d'ici à 2030.

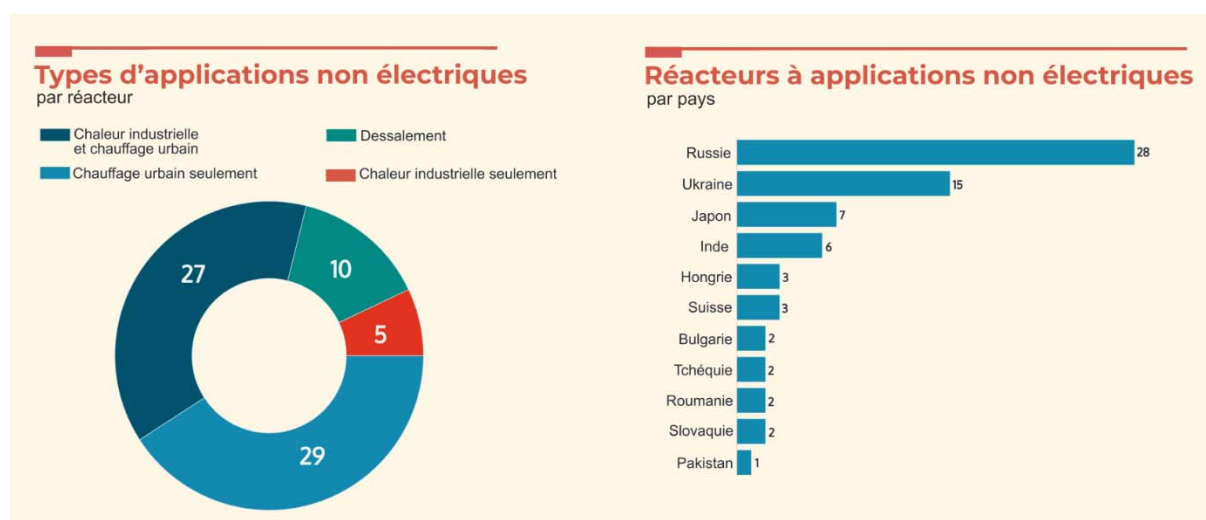
36. Les microréacteurs constituent une autre technologie émergente. D'une puissance allant de 1 à 20 MWe, ils pourraient approvisionner en électricité les régions industrielles reculées ou hors réseau, servir d'alternative au diesel et être déployés là où même des PRM « normaux » ne conviennent pas.

37. Cinq réacteurs à neutrons rapides sont déjà en service : deux réacteurs de puissance (BN-600 et BN-800) et un réacteur de recherche (BOR-60) en Russie, le surgénérateur à neutrons rapides d'essai en Inde et le réacteur rapide expérimental en Chine. En Fédération de Russie, la construction du réacteur à neutrons rapides BREST-OD-300, premier réacteur nucléaire civil refroidi au plomb, a commencé en juin 2021. Le plomb ne réagissant pas avec l'air ou avec l'eau, un modèle plus simple peut être utilisé, ce qui rend ce type de réacteur plus économique que les autres réacteurs à neutrons rapides. D'une capacité de 300 MW, le BREST-OD-300 fait partie du projet Proryv, qui vise à démontrer le fonctionnement stable, sur un site, des installations nécessaires à un cycle du combustible nucléaire complètement fermé. La réussite du projet constituerait une avancée majeure dans le développement de l'énergie nucléaire en ce qu'elle permettrait une plus grande flexibilité grâce au recyclage du combustible et à la réduction de la quantité de déchets. D'autres pays réalisent également des progrès dans ce domaine. La Chine, par exemple, a entrepris de construire deux grands réacteurs à neutrons rapides de démonstration et prévoit de déployer à terme des réacteurs à neutrons rapides commerciaux. L'Inde achève la mise en service de son prototype de surgénérateur à neutrons rapides refroidi au sodium, le premier d'une série de réacteurs à neutrons rapides industriels prévus par le pays. TerraPower a annoncé la construction de son premier réacteur nucléaire de la prochaine génération, Natrium, sur le site d'une des centrales au charbon retirées du service dans le Wyoming. Enfin, le Japon réalise des études de faisabilité dans le cadre de son programme intitulé Nuclear Energy x Innovation Promotion (NEXIP), première phase de son plan d'action stratégique pour le développement de réacteurs à neutrons rapides.

38. Des innovations continuent d'être réalisées dans la technologie des réacteurs refroidis par eau, comme suite à l'accident de Fukushima, dans les domaines de la sûreté, de la construction et de la rentabilité. Les réacteurs refroidis par eau avancés modernes ont des dispositifs de sûreté passive qui fonctionnent sans électricité et comprennent de plus grandes réserves d'eau, ce qui leur donne une autonomie de plusieurs jours et non plus quelques heures en cas de conditions imprévues, par exemple une perte totale et prolongée des alimentations électriques. De plus, ils produisent moins de déchets, font une meilleure utilisation du combustible, sont plus fiables, résistent à la prolifération et peuvent être intégrés dans des applications électriques et non électriques. Comme suite logique au développement de REP et de REB avancés, des modèles de réacteurs refroidis par eau supercritique sont à l'étude dans plusieurs États Membres, ce qui met en lumière les avantages de ce modèle en matière d'efficacité thermique, de rentabilité, de sûreté et de technologie.

39. Le besoin de décarboner les secteurs thermique et énergétique a fait naître un intérêt croissant pour l'utilisation de l'énergie nucléaire non seulement pour la production d'électricité mais aussi pour d'autres applications non électriques énergivores telles que le dessalement de l'eau de mer, le chauffage

urbain, la chaleur industrielle et la synthèse du combustible (y compris la production d'hydrogène). Entre 60 et 70 % de la chaleur nucléaire générée par les réacteurs conventionnels est rejetée dans l'environnement et perdue alors qu'il existe de nombreuses possibilités de l'exploiter, notamment la cogénération, un mode de production simultanée d'électricité et de chaleur ou de produit dérivé de la chaleur. À la fin de 2020, par exemple, la centrale nucléaire de Haiyang, dans la province du Shandong (Chine), a commencé à alimenter la région environnante en chauffage urbain, ce qui devrait permettre d'éviter la consommation de 23 200 tonnes de charbon par an et réduire les émissions de CO₂ de 60 000 tonnes.



40. La production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire suscite l'intérêt de nombreux pays, dont la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, le Japon, la Pologne et le Royaume-Uni. La production nucléaire réelle d'hydrogène dépendra des conditions du marché en termes de prix, de concurrence, de demande totale et de répartition géographique de la consommation. Dans le cadre des politiques climatiques, l'introduction à grande échelle de mesures (taxes) dissuadant le reformage du méthane à la vapeur créerait une conjoncture particulièrement propice.

41. L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables sont les deux principales options permettant la production d'électricité bas carbone. Les systèmes hybrides nucléaire-renouvelables permettent de tirer parti des deux technologies et de leurs modes d'exploitation pour alimenter le réseau avec une électricité fiable, durable et à un prix abordable et fournir une énergie bas carbone aux autres secteurs. Dans ces systèmes intégrés, de la chaleur, de l'électricité et des autres produits ou services énergétiques pourraient être produits et, au besoin, entreposés. En plus de l'électricité, les systèmes hybrides peuvent fournir de l'énergie pour diverses applications, notamment la production d'hydrogène et d'hydrocarbures, le chauffage et le refroidissement urbains, la récupération tertiaire du pétrole, le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre, et les applications de la chaleur industrielle, comme la cogénération, la liquéfaction et le raffinage du charbon, et la synthèse des matières premières chimiques. Cependant, pour mettre en place un système hybride intégré pleinement opérationnel, plusieurs lacunes doivent être comblées, notamment concernant la sûreté du système, qui doit être d'un niveau au moins équivalent à celui des centrales nucléaires actuelles, le développement de ressources humaines capables d'exploiter et de maintenir un tel système, l'interaction du système avec le marché de l'électricité et la réglementation du réseau, et le niveau de maturité technologique du système, qui dépend fortement du niveau de maturité technologique de chaque sous-système et des mécanismes de couplage et d'exploitation.

42. Au cours des dernières années, des progrès majeurs ont été accomplis dans le développement de la technologie de fusion, entraînant une mobilisation croissante du secteur privé et créant de nouvelles possibilités d'emploi. Le projet ITER, fondamental pour la maîtrise de l'énergie de fusion, avance bien ;

des avancées significatives seront faites ces cinq prochaines années et jusqu'en 2035, année durant laquelle ITER devrait atteindre son objectif ultime : démontrer la faisabilité de la fusion. En dehors de la physique des plasmas, les principaux défis pour la construction de réacteurs à fusion sont la mise au point de matériaux pour les structures de la source de chaleur (matériaux faisant face au plasma) et la conception de systèmes de refroidissement offrant un degré d'efficacité élevé. La fusion n'est peut-être pas la source d'énergie de demain, mais elle pourrait être une solution pour la fin du siècle. Le transfert de 70 années d'expérience dans les utilisations pacifiques de l'énergie de fission vers la technologie de fusion à venir permettrait de créer des synergies entre deux sources d'énergie nucléaire capables de fournir une énergie durable pour les générations futures.

D.5. Durabilité du combustible et cycles du combustible innovants

43. D'ici 2040, les besoins mondiaux annuels en uranium devraient être de 56 640 à 100 225 tonnes d'uranium (tU) selon le nombre de centrales nucléaires neuves ou dont la durée de vie aura été prolongée. Par conséquent, dans la projection basse de l'Agence, l'offre mondiale d'uranium actuelle doit rester la même qu'en 2019. En revanche, dans la projection haute, la production annuelle d'uranium doit augmenter d'environ 41 000 tU, ce qui nécessiterait des activités de prospection considérables, des innovations et l'exploitation de nouvelles mines.

D'ici 2040, **les besoins mondiaux annuels en uranium** devraient être de

56 640 à 100 225 tonnes

selon le nombre de centrales nucléaires neuves ou dont la durée de vie sera prolongée.

44. Depuis 2009, la production primaire des mines d'uranium en exploitation a permis de répondre en moyenne à 87 % de la demande mondiale. L'écart a été comblé par des sources secondaires, qui s'épuisent lentement depuis 2010. On prévoit que les ressources de nombreuses grandes mines d'uranium seront épuisées vers le milieu des années 2030, et les opérations d'entretien et de maintenance, la production accrue des installations existantes et la finalisation de projets avancés pourraient ne pas suffire à combler l'écart entre l'offre et la demande. Étant donné qu'il faut 15 à 20 ans en moyenne pour construire et mettre en service une nouvelle mine, la sécurité de l'approvisionnement à moyen et à long terme suscite des inquiétudes dans le secteur. Des événements exceptionnels, comme la pandémie de COVID-19, pourraient exercer des pressions supplémentaires sur l'offre : en 2020, par exemple, plusieurs grands producteurs d'uranium ont suspendu leurs activités ou réduit significativement leur production. Il en a résulté une baisse de l'offre primaire d'uranium provenant des mines en exploitation et une production mondiale d'environ 46 500 tU. Cela représentait environ 78 % de la demande mondiale d'uranium, ce qui met davantage sous tension les ressources secondaires pour répondre à la demande d'uranium en tant que combustible nucléaire.

45. L'amélioration constante de la technologie, notamment les matériaux et combustibles nucléaires avancés, reste cruciale pour la réussite du secteur nucléaire. Les principales priorités dans le domaine de l'ingénierie du combustible nucléaire sont d'augmenter les marges de sûreté d'exploitation des combustibles, de diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance des centrales nucléaires et de réduire au minimum la production de déchets nucléaires en mettant au point des nouveaux types de combustible pour les centrales actuelles et celles de la nouvelle génération et en recyclant les matières nucléaires.

46. Des combustibles de technologie avancée destinés à remplacer les systèmes de combustible actuels sont mis au point pour renforcer encore la sûreté, la compétitivité et la rentabilité des centrales nucléaires commerciales pour les modèles de réacteur actuels et futurs. Composés de nouveaux matériaux, y compris pour le gainage, ceux à l'étude en Europe, aux États-Unis d'Amérique et en Fédération de Russie nécessitent parfois des niveaux d'enrichissement en uranium 235 (^{235}U) plus élevés pour compenser une moindre transparence aux neutrons de leurs matériaux de gainage. C'est pourquoi des combustibles à base d'uranium faiblement enrichi de forte densité (HALEU), enrichis à plus de 5 % (mais moins de 20 %), sont en cours de production, de développement et d'expérimentation. Afin d'accroître les avantages économiques, on cherche aussi à augmenter le taux de combustion de décharge et à prolonger les cycles d'exploitation du combustible dans les centrales nucléaires, ce qui exige également des niveaux d'enrichissement en ^{235}U plus élevés. Cependant, l'utilisation de nouveaux combustibles avec des taux de combustion plus élevés aura des incidences sur certains aspects de la partie terminale, notamment le transport du combustible et la gestion du combustible usé (de l'entreposage au stockage définitif en passant par le retraitement). Des investissements considérables sont nécessaires pour construire le premier prototype d'installation et obtenir l'autorisation nécessaire pour déployer des combustibles avancés.

47. Comme il existe plusieurs types de PRM [réacteurs à eau ordinaire (REO), RHTRG, réacteurs à neutrons rapides, réacteurs à sels fondus, etc.], des types de combustible traditionnels et innovants sont mis au point avec, par exemple, des modèles, des structures et des niveaux d'enrichissement différents. Pour certains types de PRM, la conception et la fabrication du combustible reposent sur des technologies connues, mais avec des niveaux d'enrichissement qui se situent parfois à la limite supérieure de ce qui est défini comme de l'uranium faiblement enrichi (p. ex. les combustibles de type HALEU nécessitent de l' ^{235}U à plus de 5 % mais moins de 20 %).

48. La fermeture du cycle du combustible nucléaire est un facteur déterminant pour la durabilité de l'électronucléaire. Les matières fissiles peuvent être extraites du combustible nucléaire usé pour produire du combustible neuf. Le retraitement des combustibles à l'oxyde d'uranium et le recyclage de l'uranium et du plutonium sont pratiqués dans l'industrie des REO à l'heure actuelle bien que seuls quelques REO soient autorisés à utiliser des combustibles recyclés. Des progrès sont réalisés dans le recyclage multiple du plutonium issu des combustibles REMIX, CORAIL et MIX. Ces combustibles recyclés faciliteront la transition vers des stratégies de recyclage multiple du plutonium pour les réacteurs à neutrons rapides, permettant ainsi une utilisation plus efficace des ressources naturelles et une réduction de la quantité de déchets produits. Des investissements considérables seront nécessaires pour soutenir l'application industrielle de ces technologies.

D.6. Stockage définitif des déchets radioactifs

49. L'utilisation durable des technologies nucléaires impose de pouvoir fournir des solutions pour toutes les étapes de la gestion des déchets radioactifs, y compris le stockage définitif. Faisant fond sur des décennies d'expérience et de recherche de solutions dans le monde entier, les programmes nationaux tirent parti des technologies testées et éprouvées pour appliquer des solutions efficaces, sûres, sécurisées et, lorsque des matières nucléaires sont en jeu, résistantes à la prolifération à toutes les étapes de la gestion des déchets radioactifs. Le stockage définitif des déchets radioactifs en est l'aboutissement et de nombreuses installations ont été établies ou sont en exploitation dans le monde pour le stockage définitif des déchets de très faible, faible et moyenne activité.

50. Une imposante réserve de connaissances a été constituée au niveau international grâce à de nombreux programmes de stockage définitif en formations géologiques profondes pour les déchets de haute activité, qui comprennent le combustible usé si celui-ci est considéré comme un déchet. Comme illustré par certains grands programmes de dépôt géologique profond mis en œuvre dans le monde, des progrès majeurs ont été accomplis ces dix dernières années dans le cadre de plusieurs programmes

nationaux en vue du stockage définitif des déchets de haute activité – des progrès qui « changent la donne », a déclaré le Directeur général de l’AIEA, Rafael Mariano Grossi, dans le contexte de la Finlande. Les programmes nationaux les plus avancés sont proches d’une recommandation formelle pour un site de stockage définitif (Canada et Suisse) ou en sont aux stades de la préparation de la construction et du mode de fonctionnement industriel d’une installation de stockage en formations géologiques profondes (France et Suède) ou de la préparation d’une demande d’autorisation pour le placement de combustible usé dans une installation en construction (Finlande). Nombre de ces programmes s’appuient sur un cadre de recherche, de développement et de démonstration coopératif – la Plateforme technologique sur le stockage géologique des déchets radioactifs – pour progresser davantage dans l’industrialisation et l’optimisation du processus de stockage définitif en formations géologiques profondes pour les déchets de haute activité.

État des programmes de stockage géologique

préparation d’une demande d’autorisation pour le placement de combustible usé dans une installation en construction



Finlande

préparation de la construction et du mode de fonctionnement industriel d’une installation de stockage en formations géologiques profondes



France



Suède

programmes nationaux avancés proches d’une recommandation formelle pour un site de stockage définitif



Canada



Suisse

51. Pour garantir une gestion efficace et en temps voulu des futurs déchets radioactifs, les États Membres améliorent l’estimation de l’intégralité des flux de déchets générés par toutes les applications de la technologie nucléaire et conçoivent des approches intégrées de la gestion des déchets radioactifs au niveau national. L’approche intégrée est très prometteuse pour la réduction des coûts associés à la gestion des déchets radioactifs ; pleinement conforme au principe d’un niveau « aussi bas que raisonnablement possible », intégré à chaque étape, elle vise à optimiser l’utilisation des ressources et à améliorer la clarté de la planification à court et à long terme. L’expérience des États Membres montre qu’il est possible de développer et de mettre en place des solutions de gestion des déchets assorties d’objectifs en matière de stockage définitif. Dans de nombreux cas, cependant, les problèmes découlant d’anciennes pratiques nationales et l’héritage du passé persistent. Des inventaires incomplets et une mauvaise caractérisation des déchets nuisent à un traitement efficace et limitent les options de stockage adéquat. Des estimations erronées des ressources ont empêché le développement nécessaire de capacités et d’installations tandis que les anciennes pratiques de stockage ont renforcé l’idée générale selon laquelle la gestion des déchets radioactifs est impossible. Le stockage des déchets a ainsi acquis une mauvaise réputation, et les décideurs ont hésité à assumer cette responsabilité et à établir un cadre national clair pour la bonne mise en œuvre de solutions.

D.7. Déclassement

52. Alors qu'au cours des décennies précédentes, le démantèlement différé était la stratégie de déclassement majoritairement adoptée par les propriétaires d'installations, le démantèlement immédiat gagne en popularité. En outre, les délais pour le début du démantèlement final de centrales retirées du service raccourcissent de plus en plus, plusieurs stratégies de démantèlement différé étant modifiées pour privilégier le démantèlement immédiat. Cette tendance est mue par le souci de réduire les incertitudes relatives aux coûts du déclassement.

53. Étant donné que le déclassement suppose de mettre des installations redondantes dans un état de sûreté passive, la capacité de mise en œuvre d'un projet dépend fortement de la disponibilité de ressources financières suffisantes et d'un système adéquat de gestion à long terme du combustible usé et des déchets radioactifs. Bien qu'il n'y ait pas encore d'installation opérationnelle pour le stockage définitif du combustible usé, ce dernier peut être entreposé en toute sûreté dans des piscines ou des installations d'entreposage à sec ; par conséquent, des installations d'entreposage à sec ont été établies à côté du site de plusieurs centrales nucléaires mises à l'arrêt définitif pour permettre la poursuite des opérations de démantèlement et de démolition.

54. Une grande partie des matériaux retirés du service après le déclassement ont un niveau de radioactivité insignifiant, de sorte que, dans de nombreux cas, ils pourraient être libérés du contrôle réglementaire (selon le régime juridique national) et réutilisés à d'autres fins. Cette approche fonctionne bien dans plusieurs pays, mais pas tous : dans certaines situations, le refus du public d'utiliser du matériel provenant d'installations nucléaires, quel que soit son niveau de radioactivité, peut empêcher la réutilisation ou le recyclage de ce matériel. Compte tenu de l'absence de risque significatif associé à ces activités, de telles situations sont considérées comme sous-optimales d'un point de vue scientifique et technique.

D.8. Mise en valeur des ressources humaines : la prochaine génération

55. Une des premières priorités de la communauté nucléaire consiste à recruter et à conserver un personnel qualifié pour s'assurer une main-d'œuvre compétente à tous les stades du cycle de vie d'une installation nucléaire. Cela étant, les perspectives de carrière à long terme à toutes les étapes du cycle de vie des installations et organisations nucléaires font de l'emploi dans le secteur nucléaire une option séduisante. En outre, les carrières dans le domaine nucléaire offrent de nombreuses possibilités d'activités ayant une utilité sociale, comme assurer l'approvisionnement en énergie et en eau propres ou faciliter le développement socio-économique des pays.

56. Les craintes d'une pénurie de personnel qualifié font naître des difficultés différentes d'un pays à l'autre. Une difficulté particulière pour les projets de nouvelle construction nucléaire est de repérer et de former suffisamment d'agents qualifiés, car les projets de ce type sont rares et souvent trop espacés dans le temps (sauf en Chine, en Fédération de Russie, au Japon et en République de Corée). Des approches novatrices, comme les cours en ligne et l'apprentissage hybride, sont mises en œuvre pour rendre la formation théorique et pratique et le renforcement des capacités dans le domaine nucléaire plus accessibles aux nouvelles générations de professionnels du nucléaire, tant dans les pays exploitants que dans les pays primo-accédants. Pour les pays qui développent un programme électronucléaire, la difficulté est d'intensifier leurs programmes de formation théorique et pratique pour disposer du personnel qualifié nécessaire en temps voulu.

57. Les pays qui prévoient de fournir de la technologie nucléaire peuvent aider les pays bénéficiaires à répondre à leurs besoins en matière de ressources humaines en transférant des capacités pour mettre en place une infrastructure de formation théorique et pratique. La coopération entre les pays exploitants et les pays primo-accédants s'est déjà avérée efficace pour combler le manque d'expérience.

58. Dans le contexte mondial évolutif, le recrutement et la rétention de talents dans le domaine nucléaire est compliquée par l'innovation technologique, la mobilité accrue et l'évolution démographique. En même temps, des approches technologiques novatrices, comme les cours en ligne et l'apprentissage hybride, sont mises en œuvre pour rendre la formation théorique et pratique et le renforcement des capacités dans le domaine nucléaire plus accessibles aux nouvelles générations de professionnels du nucléaire, tant dans les pays exploitants que dans les pays primo-accédants.

D.9. Octroi d'autorisations, cadres réglementaires et approches

59. La création d'un environnement favorable à l'introduction et au développement sûrs, sécurisés et durables de l'énergie nucléaire est facilitée par la mise en place, par le gouvernement, de politiques, de programmes et d'un cadre juridique appropriés concernant l'électronucléaire. Toutes les sources d'énergie à faible émission de carbone nécessitent des politiques spéciales qui soutiennent leur déploiement. Ces politiques devraient transparaître dans les systèmes juridique, institutionnel et réglementaire nationaux pour garantir un environnement stable et prévisible et un effet maximal.

60. À l'heure actuelle, le déploiement de l'énergie nucléaire dans le monde est gouverné par un régime international bien établi. Comme l'énergie nucléaire joue un rôle important dans l'atténuation du changement climatique, les questions telles que l'harmonisation réglementaire ou les nouveaux modèles de déploiement pourraient être intégrées dans des solutions innovantes pour façonner un avenir plus propre et plus durable.

61. L'octroi d'autorisation pour une centrale nucléaire passe par une évaluation exhaustive de la conception et des caractéristiques techniques de celle-ci du point de vue de la sûreté, de la sécurité et du contrôle. Les normes de sûreté et les orientations sur la sécurité de l'Agence sont utilisées par les pays pour soutenir la mise en place de leurs cadres réglementaires nationaux. Une coopération internationale élargie est considérée comme primordiale pour le transfert des connaissances, l'acquisition des compétences relatives au développement et à l'application d'un cadre réglementaire national et le déploiement accéléré.

62. La mise en place en temps voulu d'une infrastructure nucléaire favorable et du cadre juridique et réglementaire connexe actuellement appliqué pour les grands réacteurs nucléaires dans les pays primo-accédants est un facteur essentiel pour préparer plus rapidement le marché au déploiement des PRM.

63. Les guides et processus réglementaires d'évaluation des technologies avancées comme les PRM ne sont pas à jour ou, parfois, pas encore disponibles. À l'avenir, des méthodes d'examen réglementaire solides et technologiquement neutres permettraient de réduire le délai nécessaire pour l'adoption et la commercialisation de nouvelles technologies de réacteur nucléaire. Dans tous les cas, les responsables de la réglementation et les promoteurs devront collaborer pour faciliter la reconnaissance de la certification de la conception et de la démonstration des premiers réacteurs du genre, de sorte que la construction et l'exploitation soient sûres et rationnelles et que les coûts permettent un déploiement compétitif. L'Agence accueille actuellement le Forum des responsables de la réglementation des PRM et examine les normes de sûreté applicables en suivant une approche technologiquement neutre lorsque des PRM sont envisagés.

D.10. Perception du public

64. L'énergie nucléaire peut aider à combattre des problèmes urgents à l'échelle mondiale, mais la mauvaise compréhension de l'électronucléaire continue d'entraver l'acceptation du public et la prise de décisions. La perception qu'a le public des avantages et des risques associés à l'électronucléaire et, en particulier, les craintes concernant les risques radiologiques, la gestion des déchets, la sûreté et la

prolifération continuent d'exercer la plus forte influence sur l'acceptation du public. L'opinion publique jouant un rôle majeur dans la sélection d'un mode de production d'énergie par les gouvernements, une bonne compréhension de ce que les parties prenantes pensent et savent de l'électronucléaire et de ce dont elles ont conscience est primordiale pour la prise de décisions et la réussite d'un programme électronucléaire. L'établissement d'une relation solide et positive à long terme avec les parties prenantes est essentielle pour la mise en œuvre des programmes électronucléaires existants, nouveaux et futurs.

65. L'expérience montre qu'associer les parties prenantes à la prise de décisions, y compris les groupes qui n'y exercent pas un rôle direct, peut renforcer la confiance du public dans l'application de la science et de la technologie nucléaires. Il s'agit d'entretenir un dialogue ouvert et transparent qui renforce la confiance mutuelle entre les différentes parties prenantes issues du secteur nucléaire, des institutions publiques, des médias, des collectivités locales et des organisations non gouvernementales. Ce type d'interaction aide à faire mieux connaître et comprendre les différents aspects du cycle du combustible nucléaire, de l'extraction de l'uranium à la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, tout en permettant aux parties prenantes d'exprimer leurs préoccupations et d'influencer les décisions qui les concernent leurs pairs et elles.

66. Les mécanismes ouverts et accessibles permettant la participation des parties prenantes aux programmes nucléaires existants ont évolué, et de telles stratégies sont aussi devenues la norme dans de nombreux domaines liés au choix du site et au développement d'une installation de gestion de déchets. Les nouveaux programmes électronucléaires suivent cette tendance. En effet, la participation des parties prenantes est une des 19 questions liées à l'infrastructure prises en compte dans l'approche par étapes de l'Agence, une procédure en trois phases pour le développement de l'infrastructure nécessaire à un programme électronucléaire.

67. Le fait d'associer les parties prenantes dès le début, substantiellement et fréquemment, facilitera également le développement et le déploiement de nouvelles technologies, comme les PRM, à mesure que les pays évaluent leur viabilité pour la production d'électricité à faible émission de carbone et les applications non électriques. L'expérience acquise à la fois par les pays exploitants et les pays primo-accédants et les enseignements tirés du déploiement des technologies existantes peuvent contribuer à la réussite des nouvelles technologies nucléaires.

68. Enfin, faire mieux comprendre aux diverses parties prenantes le rôle important que joue l'électronucléaire dans la stabilisation des réseaux électriques, en particulier ceux qui dépendent largement des sources d'énergie renouvelable, pourrait conduire à une meilleure acceptation de l'électronucléaire par le public. Les systèmes hybrides associant électronucléaire et énergies renouvelables peuvent aider à réduire considérablement les émissions de GES tout en fournissant une électricité fiable aux fins du développement socio-économique, répondant ainsi aux préoccupations de nombreuses parties prenantes. En sensibilisant les parties prenantes au fait que l'énergie nucléaire peut servir à dessaler l'eau de mer, à produire de l'hydrogène bas carbone et à générer de la chaleur pour les immeubles et les applications industrielles, on peut renforcer encore l'adhésion du public à cette source d'énergie bas carbone et renforcer ainsi ses chances de contribuer à la lutte contre le changement climatique et au développement durable.