

An underwater photograph showing a variety of marine life, including several striped fish, swimming in clear blue water. The scene is heavily polluted with plastic waste, including a large white plastic bag, a clear plastic bottle, and other debris. The text is overlaid on the left side of the image.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire ■ 2022

Rapport du Directeur général



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

L'atome pour la paix et le développement

GC(66)/INF/4

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2022

Rapport du Directeur général

GC(66)/INF/4

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Septembre 2022
IAEA/NTR/2022

Table des matières

Avant-propos	5
Avant-propos du Directeur général	6
A. Énergie d'origine nucléaire	11
A.1. Projections relatives à l'électronucléaire	11
A.2. Centrales nucléaires en exploitation	12
A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion	15
A.4. Développement de la technologie électronucléaire	19
A.4.1. Réacteurs avancés refroidis par eau	20
A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires, y compris les réacteurs à haute température	21
A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides	23
A.4.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire	24
A.4.5. Recherches sur la fusion nucléaire et mise au point de technologies pour la future production d'énergie	26
B. Cycle du combustible nucléaire	30
B.1. Partie initiale	30
B.2. Partie terminale	32
C. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs	33
C.1. Déclassement	33
C.2. Remédiation de l'environnement	37
C.3. Gestion des déchets radioactifs	38
D. Réacteurs de recherche et accélérateurs de particules	40
D.1. Réacteurs de recherche	40
D.2. Accélérateurs de particules et instrumentation	43
E. Données atomiques et nucléaires	45
F. Environnement	46
F.1 Les technologies des rayonnements au service de la lutte contre la pollution par le plastique ..	46
F.2 Les techniques nucléaires et isotopiques au service de la lutte contre la pollution du milieu marin par le plastique	48
G. Alimentation et agriculture	52
G.1 L'empreinte isotopique, un procédé novateur pour évaluer et atténuer la persistance et le transport d'antibiotiques ainsi que leurs implications sur la résistance aux antimicrobiens	52
G.2 Variations génétiques induites par l'espace, sélection des plantes et mise à profit de l'astrobiologie dans la lutte contre le changement climatique	54
H. Santé humaine	57
H.1 Théranostique : feuille de route pour une prise en charge du cancer personnalisée	57
H.2 Progrès en sciences de la nutrition : exploiter les données disponibles pour aider les pays à lutter contre l'épidémie d'obésité	58
I. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements	61
I.1. Nouvelles filières de production de radio-isotopes médicaux	61

J. L'intelligence artificielle au service des sciences et des applications nucléaires	63
Annexe	66
Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde ^a	66
Tableau D-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde	68
Abréviations et acronymes	69

Avant-propos

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus en 2021.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2022* traite des domaines suivants : énergie d'origine nucléaire, cycle du combustible nucléaire, déclassement, remédiation de l'environnement et gestion des déchets radioactifs, réacteurs de recherche et accélérateurs de particules, données nucléaires et atomiques, environnement, alimentation et agriculture, santé humaine, radio-isotopes et technologies des rayonnements, et enfin intelligence artificielle au service des sciences et des applications nucléaires.
- Le projet de rapport a été soumis à la réunion du Conseil des gouverneurs de mars 2022 (document GOV/2022/2). La présente version définitive a été établie à la lumière des débats tenus par le Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.

Avant-propos du Directeur général

Le changement climatique, la pollution atmosphérique, la sécurité énergétique, la sécurité alimentaire, la pollution par le plastique, le cancer et l'obésité font partie des nombreux défis mondiaux qui se posent à la communauté internationale.

Nous devons employer tous les outils dont nous disposons pour les affronter.

Les technologies nucléaires, combinées à d'autres techniques, aident les États Membres à prendre des décisions avisées sur la voie à suivre, qu'il s'agisse d'utiliser l'intelligence artificielle pour tout ce qui touche au nucléaire, de produire une énergie fiable et à faible émission de carbone, de mieux comprendre et combattre la pollution par le plastique ou de sauver des vies grâce à une prise en charge du cancer et une nutrition améliorées.

Lors de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP26), qui s'est tenue en 2021 à Glasgow (Royaume-Uni), l'Agence a contribué au débat en s'appuyant sur son approche scientifique et bien documentée unique, en montrant comment la technologie nucléaire était vitale à la fois pour lutter contre la crise climatique et pour faire face efficacement à ses conséquences de plus en plus graves. Tout en rendant compte du rôle croissant des technologies nucléaires, elle continuera à mener un dialogue de haut niveau sur l'énergie nucléaire et les techniques et applications nucléaires lors de la COP27, qui se déroulera à Charm el-Sheikh (Égypte).

Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2022* récapitule la situation dans certains domaines clés où cette dernière est appliquée et met en évidence les faits nouveaux et encourageants qui y sont survenus.



FIG. 1 de l'avant-propos. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, à la centrale nucléaire Amiral Alvaro Alberto. (Rodovia Rio-Santos - Itaorna, Angra dos Reis, Brésil)

Résumé

1. Pour la première fois depuis l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi il y a dix ans, l'Agence a revu à la hausse ses projections quant à la croissance de la capacité nucléaire de production d'électricité au cours des prochaines décennies. Dans l'ensemble, la capacité électronucléaire a progressivement augmenté ces dix dernières années, avec l'ajout de quelque 20,7 GWe résultant du couplage de nouvelles tranches au réseau et de la mise à niveau de réacteurs existants.
2. À la fin de 2021, la capacité totale des 437 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans 32 pays s'établissait à 389,5 GWe. Pendant l'année, plus de 5,2 GWe de nouvelle capacité nucléaire ont été raccordés au réseau grâce à quatre nouveaux réacteurs à eau ordinaire sous pression situés aux Émirats arabes unis, en Chine et au Pakistan, à un réacteur à eau lourde sous pression en Inde et à un réacteur à haute température refroidi par gaz en Chine. Au cours de la même période, une capacité nucléaire de 8,7 GWe a été définitivement retirée du réseau.
3. Au total, 26 États Membres se trouvaient à différents stades de préparation de leur infrastructure nationale dédiée à un nouveau programme électronucléaire, dont 10 à 12 pays primo-accédants qui devraient se doter de centrales nucléaires d'ici à 2035, augmentant ainsi d'un tiers le nombre de pays en exploitant. La mise à disposition et l'implantation attendues de plusieurs réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP) inédits d'ici à 2030 constituent une évolution technologique de taille qui attire l'attention des planificateurs et des décideurs chargés de la politique énergétique. C'est là ce qui a incité plusieurs pays à intégrer les RFMP dans leur réflexion sur les questions d'ordre technologique, même si ce sont les grands réacteurs avancés refroidis par eau qui devraient représenter la majeure partie des nouvelles capacités au cours des trente prochaines années. Une infrastructure électronucléaire nationale est nécessaire pour garantir le maintien d'une attention constante et scrupuleuse à la sûreté nucléaire, à la sécurité nucléaire et aux garanties concernant les grands réacteurs avancés et les RFMP.
4. Les centrales nucléaires du monde entier ont continué d'être exploitées de manière fiable pendant la pandémie de COVID-19 grâce à la mise en œuvre de méthodes opérationnelles innovantes et de mesures particulières destinées à protéger les travailleurs. Le parc nucléaire a une nouvelle fois prouvé qu'il pouvait, au prix de certaines adaptations, garantir une exploitation résiliente et fiable de ses centrales en ces temps difficiles.
5. L'exploitation à long terme est demeurée indispensable pour assurer le passage à une énergie à faible émission de carbone et pour atteindre les objectifs de neutralité carbone, mais aussi pour ménager un délai en attendant l'accroissement des capacités de production d'électricité sobre en carbone, notamment la construction de nouvelles centrales nucléaires.
6. Le développement de la technologie des RFMP en vue d'une implantation à court terme a nettement progressé dans de nombreux États Membres. Outre le démarrage en mai 2020 de l'exploitation commerciale de la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov en Fédération de Russie, la construction d'un réacteur ACP de 125 MWe a débuté en Chine. Plus de 70 modèles de petits réacteurs modulaires destinés à des applications électriques et non électriques sont actuellement en gestation. En outre, les activités liées à la mise au point d'un sous-ensemble de RFMP connus sous le nom de « microréacteurs », qui pourraient constituer la solution optimale pour produire simultanément de la chaleur et de l'électricité dans des régions reculées ou sur de petites îles et remplacer les générateurs diesel, se sont intensifiées dans plusieurs pays. Pour favoriser la convergence des vues des États Membres quant à leurs besoins et particularités en matière de technologie des petits réacteurs modulaires, l'Agence a mis en place un nouveau cadre destiné à établir des conditions et des critères génériques d'utilisation des modèles et de la technologie de ces réacteurs.

7. L'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins non électriques a le vent en poupe partout dans le monde. En 2021, 61 réacteurs nucléaires en exploitation étaient utilisés pour des applications non électriques (dessalement, chauffage urbain et chaleur industrielle), produisant environ 2 167 GW·h d'équivalent électrique de chaleur à l'appui de la cogénération nucléaire, dont 5 réacteurs utilisés aux fins de dessalement.

8. L'assemblage de machines et d'installations dans le cadre du projet ITER a continué de progresser régulièrement en dépit des contraintes sans précédent auxquelles il a fallu faire face en raison de la pandémie et des difficultés de fabrication de certains composants totalement nouveaux. D'importants progrès ont été faits dans l'assemblage et l'intégration de composants ITER. Plusieurs initiatives visant à établir un cadre réglementaire national propre à la fusion, élément indispensable parmi d'autres au développement de cette dernière en tant que source d'énergie commercialement viable, ont été lancées.

9. La faiblesse persistante des prix de l'uranium a poussé plusieurs producteurs d'uranium à abaisser les taux de production primaire. Elle a incité plusieurs investisseurs, fonds, négociants et producteurs d'uranium à acheter de l'octoxyde de triuranium (U_3O_8) sur le marché en prévision de l'évolution de l'offre et de la demande de cette ressource. En raison de la diminution des stocks et de l'accélération des échanges d' U_3O_8 en 2021, le prix au comptant avait sensiblement augmenté à la fin de cette même année par rapport au premier trimestre. Les récentes augmentations du prix de l'uranium sur le marché ont conduit certains à investir, et l'on a constaté une reprise des activités de prospection et d'exploitation en 2021, ainsi que le redémarrage de certaines activités de production primaire.

10. Bon nombre de conditions qui ont conduit à fermer des installations nucléaires au cours des dix années écoulées — facteurs politiques et économiques, coûts de maintenance et/ou de rénovation, évolution du marché de l'électricité — sont appelées à perdurer ; le rythme des mises à l'arrêt pourrait même s'accélérer en raison de l'âge des parcs actuels de centrales, partiellement compensé par une prolongation de leur durée de vie. La grande majorité des quelque 300 réacteurs nucléaires de puissance qui ont aujourd'hui 30 ans ou plus pourraient être retirés du service au cours des trois prochaines décennies. Une évolution similaire est prévue pour les réacteurs de recherche, dont le parc est assez semblable en termes d'ancienneté. La tendance actuelle est apparemment en faveur d'un démantèlement immédiat plutôt que d'un démantèlement différé qui était auparavant la solution prônée en priorité.

11. Grâce à d'importants progrès réalisés en 2021, certains États Membres sont en passe d'achever les opérations de stockage définitif de leurs déchets de faible activité. S'agissant des programmes de dépôt géologique profond destiné au stockage définitif de déchets de haute activité, l'organisme finlandais de gestion des déchets Posiva a entamé en 2021, sur le site d'Onkalo, les travaux d'excavation des premiers tunnels qui devraient être utilisés à cet effet. La collaboration internationale continue de s'intensifier dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, en particulier pour ce qui concerne les programmes de stockage définitif en formations géologiques profondes. Des progrès considérables ont été aussi accomplis en 2021 en matière de gestion des sources radioactives scellées retirées du service, en particulier pour ce qui concerne leur retrait et leur conditionnement.

12. L'intérêt pour les réacteurs de recherche a continué de croître dans le monde. En 2021, outre les 235 en service, 11 étaient en construction. De nombreux pays profitent des possibilités d'y accéder que leur offre la collaboration internationale et régionale. Deux réacteurs-laboratoires par Internet situés en République tchèque et en République de Corée ont commencé à transmettre des expériences à des étudiants d'autres pays.

13. Grâce à la puissance des capacités informatiques et des outils d'analyse de données désormais disponibles, le secteur nucléaire se tourne vers des techniques faisant appel à l'intelligence artificielle, à l'apprentissage automatique et à l'apprentissage en profondeur qu'il met à profit pour mener un large éventail d'activités susceptibles de transformer la conception des systèmes nucléaires, leur autorisation et leur fonctionnement. L'intelligence artificielle peut améliorer l'intégration de calculs et de données

expérimentales provenant d'expériences réalisées à petite échelle ou obtenus au moyen de capteurs pendant l'exploitation. Son adoption rapide tout comme celle de l'apprentissage automatique dans divers domaines est une tendance nette qui va aussi avoir des conséquences déterminantes sur la physique nucléaire et la création de bibliothèques de données nucléaires.

14. L'intelligence artificielle a également l'extraordinaire capacité d'accélérer l'innovation technologique dans de nombreux secteurs nucléaires, qui vont de la santé humaine à la fusion en passant par les sciences nucléaires. En permettant à des experts d'analyser rapidement les quantités considérables de données isotopiques relatives à l'eau qui sont stockées dans des réseaux mondiaux, elle aide déjà les scientifiques à comprendre les effets du changement climatique et de la croissance démographique sur les ressources en eau. Elle peut contribuer à la lutte contre le cancer et aider à mieux se préparer à l'émergence de futures flambées de zoonoses. Son utilisation accrue dans les sciences et applications nucléaires doit pouvoir s'appuyer sur de solides partenariats internationaux et sur une coopération transversale aux fins de l'établissement d'orientations en matière de réglementation, d'éthique et de formation théorique et pratique, ainsi que de l'échange de données d'expérience, de connaissances et de bonnes pratiques.

15. La spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) s'est révélée être une technique ultra-sensible qui offre de grandes possibilités pour des applications analytiques en rapport avec les problèmes de la société moderne. Elle est actuellement employée en archéologie, dans des applications biomédicales, dans les études sur le changement climatique, en hydrologie, en océanographie et dans de nombreux autres domaines qui suscitent de plus en plus des préoccupations sociétales et économiques. Son évolution technologique récente a également permis d'élargir le champ de ses applications et notamment de l'étendre à l'étude d'un large éventail d'objets du patrimoine culturel et naturel, ainsi qu'à la détection de faux et du commerce illicite de produits.

16. Des technologies innovantes faisant appel aux rayonnements pour le recyclage et des techniques de traçage isotopique appliquées à la surveillance des océans offrent des solutions pour la lutte contre la pollution par le plastique, un des défis environnementaux les plus pressants pour la planète qui menace directement le développement durable. Lancée en 2021, l'initiative baptisée « Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique » (NUTEC Plastics), prend appui sur les travaux menés par l'Agence pour combattre cette forme de pollution, grâce au recyclage basé sur la technologie des rayonnements et à la surveillance du milieu marin à l'aide de techniques de traçage isotopique.

17. Il est possible de trier efficacement les déchets plastiques destinés aux flux de recyclage grâce à une utilisation innovante des faisceaux gamma et faisceaux d'électrons. Les techniques nucléaires et isotopiques, associées aux méthodes de modélisation de la circulation océanique et des phénomènes de dispersion dans les océans, contribuent à déterminer aussi bien l'origine des plastiques que leur devenir dans cet environnement. Elles aident les scientifiques à reconstituer rétrospectivement les tendances en matière de pollution du milieu marin par le plastique et à mieux comprendre le vieillissement des microplastiques après la sédimentation.

18. L'usage impropre ou excessif d'agents antimicrobiens tels que les antibiotiques, les antiviraux, les antifongiques et les antiparasitaires, qui servent à prévenir et à traiter des infections touchant les êtres humains, les animaux et les plantes, est une menace pour la santé publique dans le monde, actuellement à l'origine de 700 000 décès chaque année. Les techniques d'analyse et de sondage de composés spécifiques au moyen d'isotopes stables constituent de puissants outils d'évaluation des substances antimicrobiennes. La conjugaison de ces techniques isotopiques et moléculaires avancées devraient permettre de mieux comprendre comment se comportent et ce que deviennent les antibiotiques présents dans le fumier épandu et les implications qui en découlent en termes de résistance aux antibiotiques dans l'environnement.

19. La question de savoir en quoi l'environnement spatial entraîne des mutations des génomes des plantes et modifie leur physiologie, améliorant ainsi leur capacité à supporter de mauvaises conditions de croissance sur terre — du type de celles que génère le changement climatique — suscite de plus en plus d'intérêt. Des progrès devraient intervenir rapidement dans ce domaine, au vu de l'attention constante accordée à l'étude de la biologie végétale dans l'espace, qui apparaît comme un moyen non seulement de nourrir les astronautes mais aussi d'exploiter les précieuses mutations induites par l'exposition aux rayons cosmiques, pour sélectionner des variétés végétales résistantes.

20. En ce qui concerne la prise en charge du cancer, la théranostique, qui recourt aux isotopes, conjugue diagnostic et thérapie, permettant ainsi aux professionnels de santé de se concentrer sur les besoins propres à chaque patient. Elle tient davantage compte des particularités que les radiothérapies classiques, car elle permet d'atteindre la tumeur avec des « balles » radioactives tout en épargnant les tissus sains adjacents, améliorant ainsi à la fois l'efficacité et la sûreté du traitement. Actuellement, ses applications les plus notables ciblent les tumeurs neuroendocriniennes, les lymphomes, les cancers de la prostate, du sein, du poumon et de la thyroïde. Il est de plus en plus nécessaire d'étendre la coopération et l'application de normes au plan international, de former des experts médicaux et scientifiques et de mettre sur pied des infrastructures médicales spécialisées.

21. Les maladies liées à l'obésité ont pris des proportions épidémiques dans le monde entier : au moins 2,8 millions de personnes meurent chaque année par suite de surpoids ou d'obésité. Elles devraient coûter 1 200 milliards de dollars par an d'ici à 2025. Les données sur la dépense énergétique obtenues grâce à la technique de l'eau doublement marquée, basée sur des isotopes stables, sont indispensables et fourniront aux décideurs les éléments nécessaires pour concevoir des politiques de nutrition et de santé plus efficaces afin de lutter contre la flambée épidémique d'obésité dans le monde. Toutefois, il faut en obtenir davantage de la part des pays à revenu faible et intermédiaire pour assurer, au niveau international, une meilleure représentation de ces derniers dans les études et permettre aux décideurs de disposer d'éléments probants pour hiérarchiser les mesures essentielles à prendre en matière de nutrition et lutter contre l'épidémie d'obésité.

22. Utilisés à la fois pour le diagnostic et le traitement du cancer et d'autres maladies chroniques, les radioisotopes et les radiopharmaceutiques sauvent des vies. Il est essentiel de faire en sorte que les radio-isotopes les plus importants soient constamment disponibles. Deux nouvelles filières de production faisant appel à des accélérateurs linéaires et à des centrales nucléaires ouvrent la voie à un renforcement et à l'autonomisation de la chaîne d'approvisionnement mondiale du molybdène 99, radioisotope médical le plus utilisé au monde. La production de molybdène 99 à l'aide de faisceaux d'électrons de haute énergie est déjà commercialisée.

23. La production de radio-isotopes dans des réacteurs nucléaires repose sur la capture de neutrons dans un matériau cible. Les réacteurs de recherche sont généralement utilisés pour produire des radio-isotopes destinés à des applications thérapeutiques en médecine nucléaire. L'irradiation de cibles dans une centrale nucléaire est la voie habituellement empruntée pour produire certains radio-isotopes, comme le cobalt 60, utilisé dans l'industrie et en curiethérapie. En 2021, un réacteur commercial de type CANDU a été autorisé par l'organisme de réglementation à produire du molybdène 99. La production d'autres radio-isotopes médicaux importants à courte période, dont le lutécium 177 et l'holmium 166, est à l'étude. Cette évolution laisse entrevoir de nouvelles perspectives aux concepteurs qui pourraient envisager de doter des réacteurs de puissance d'une capacité de production de radio-isotopes.

A. Énergie d'origine nucléaire

A.1. Projections relatives à l'électronucléaire

Situation

1. Pour la première fois depuis l'accident de Fukushima Daiichi, survenu il y a dix ans, l'Agence a revu à la hausse ses projections quant à la croissance potentielle de la capacité électronucléaire aux fins de la production d'électricité au cours des prochaines décennies. Ce changement dans les prévisions annuelles de l'Agence concernant cette source d'énergie bas carbone n'est pas encore une nouvelle tendance, mais intervient alors que le monde entend se détourner des combustibles fossiles pour lutter contre le changement climatique. De nombreux pays envisagent de recourir à l'électronucléaire pour doper la production d'une énergie fiable et propre. Des discussions constructives sur l'utilisation de l'électronucléaire ont eu lieu à haut niveau lors de la 26^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP26) à Glasgow (Royaume-Uni), en novembre 2021 — et ce pour la première fois depuis un grand nombre de COP (figure A.1).

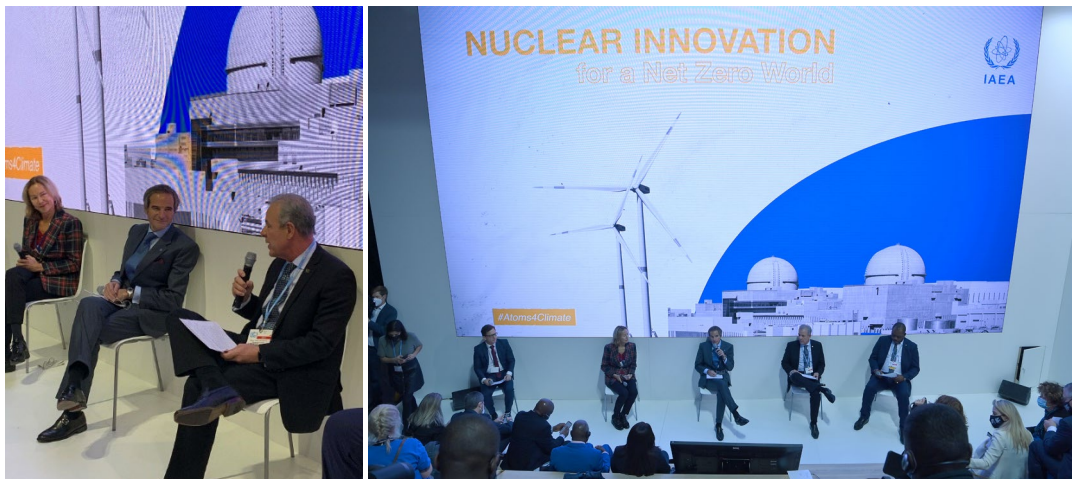


FIG. A-1. Échanges à haut niveau sur le nucléaire lors de la COP26 entre M. Grossi, Directeur général de l'AIEA, MM Albuquerque et Prempeh, respectivement ministres du Brésil et du Ghana, et M^{me} Algayerova, Secrétaire exécutive de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU).

2. Sachant que la capacité mondiale installée était de 392 GWe en 2020, soit 10,2 % de la production d'électricité, l'hypothèse basse des estimations relatives à la capacité mondiale d'énergie d'origine nucléaire table sur un quasi-statu quo à 394 GWe en 2050 et sur une baisse de la part qu'elle occuperait dans la production mondiale d'électricité, qui serait ramenée à 6,3 %. L'hypothèse haute mise en revanche sur un doublement de la capacité installée, qui passerait à 792 GW, la part de l'énergie d'origine nucléaire dans la production d'électricité atteignant dans ce cas de figure 12,3 % (figure A.2).

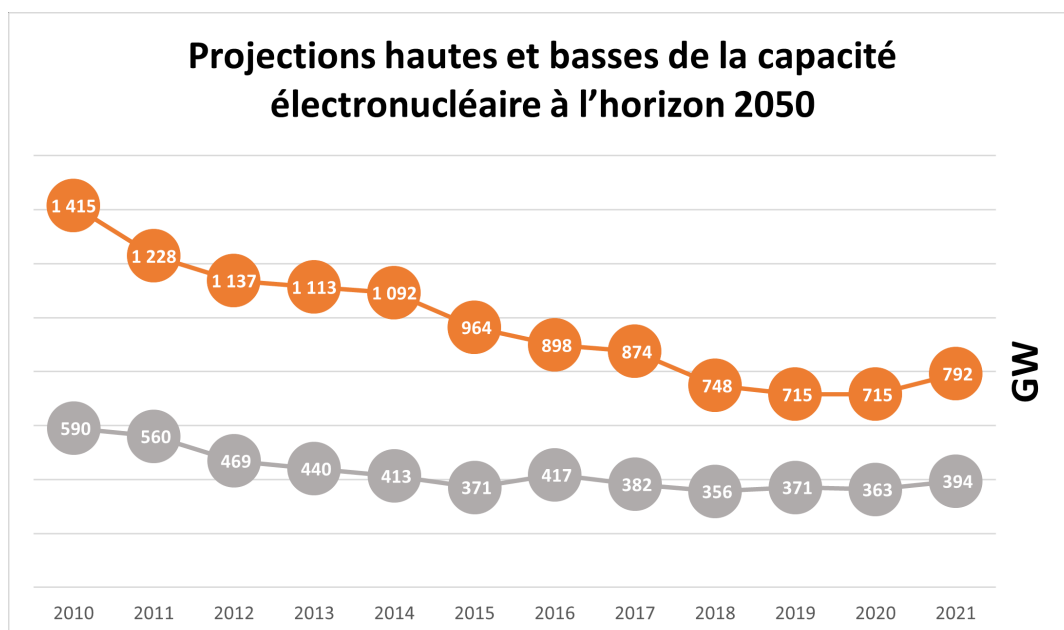


FIG. A-2. Évolution des projections hautes et basses de la capacité électronucléaire à l'horizon 2050, établies à partir des données présentées dans les éditions 2020-2021 du RDS-1.

3. Pour que l'hypothèse haute se concrétise, il faudra à la fois que la durée d'exploitation du parc actuel de réacteurs nucléaires de puissance soit considérablement prolongée, généralement au-delà de 40 ans, et que des actions vigoureuses soient menées pour obtenir une capacité supplémentaire de 550 GWe sur 30 ans. Il faudrait à cet effet plus que doubler le rythme de couplage de nouveaux réacteurs au réseau au cours des prochaines décennies et accélérer la promotion et le déploiement des technologies propres aux réacteurs innovants.

Tendances

4. Les technologies des réacteurs innovants, notamment les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires, suscitent un intérêt de plus en plus marqué. Néanmoins, ce sont les grands réacteurs avancés refroidis par eau qui devraient représenter la majeure partie des nouvelles capacités appelées durant les trente prochaines années à alimenter la production d'énergie sobre en carbone dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Le secteur nucléaire continuera à faire face à plusieurs défis. Il lui faudra notamment gagner en compétitivité en réduisant les coûts et en améliorant la normalisation.

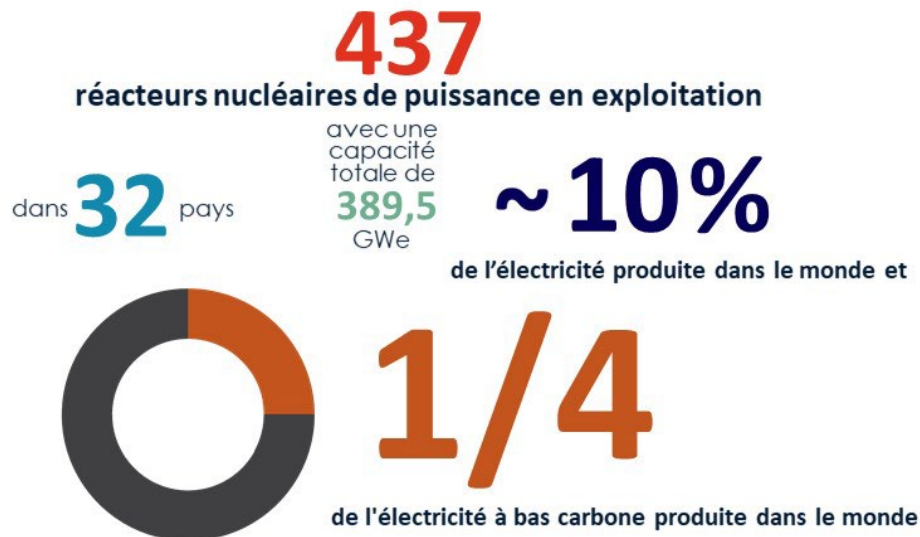
5. Un fort soutien des pouvoirs publics porté par la reconnaissance du rôle de l'électronucléaire en tant que système énergétique sobre en carbone, à la fois résistant et fiable, lui sera nécessaire et il faudra faire en sorte que des financements lui soient accessibles dans des conditions identiques à celles dont bénéficient les autres sources d'énergie bas carbone. Pour que l'électronucléaire devienne plus attractif aux yeux des investisseurs, il conviendrait aussi de mieux faire connaître ses contributions à la décarbonation d'autres secteurs énergétiques, grâce notamment à la production d'hydrogène propre.

A.2. Centrales nucléaires en exploitation

Situation

6. À la fin de 2021, la capacité totale des 437 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans 32 pays s'établissait à 389,5 GWe (voir tableau A-1). Les États ont continué à démontrer leur faculté d'adaptation face à la pandémie de COVID-19 en prenant des mesures efficaces destinées à garantir une exploitation sûre et fiable tout en réduisant au minimum les risques pour le personnel, mesures qui témoignent d'une solide culture organisationnelle. En 2021, l'Agence a continué de partager les

informations sur les mesures prises pour atténuer les effets de la pandémie et ses répercussions sur l'exploitation des centrales nucléaires via le Réseau d'expérience d'exploitation des centrales nucléaires en temps de COVID-19. Aucun des 32 pays ayant des centrales nucléaires en exploitation n'a signalé d'évènement 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.



7. Source d'énergie propre, fiable, durable et moderne, l'électronucléaire contribue considérablement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur toute la planète, tout en répondant à la demande mondiale croissante d'énergie et en soutenant le développement durable et la sortie de crise après la pandémie de COVID-19. Plus de 5,2 GWe de capacité nucléaire ont été ajoutés au réseau du fait du couplage de six nouveaux réacteurs, à savoir quatre réacteurs à eau sous pression (REP) [Tianwan-6 (1 000 MWe) et Hongyanhe-5 (1 061 MWe) en Chine, KANUPP-2 (1 017 MWe) au Pakistan et Barakah-2 (1 310 MWe) aux Émirats arabes unis], un réacteur à eau lourde sous pression (RELPS) [Kakrapar-3 (630 MWe)] en Inde et un réacteur à haute température refroidi par gaz (RHTRG) [Shidao Bay-1 (200 MWe)] en Chine (figure A.3).

Capacité nucléaire nouvellement couplée au réseau (en MWe)

5,2 GWe de capacité nucléaire ont été ajoutés au réseau du fait du couplage de quatre nouveaux réacteurs à eau sous pression, d'un réacteur à eau lourde sous pression et d'un réacteur à haute température refroidi par gaz

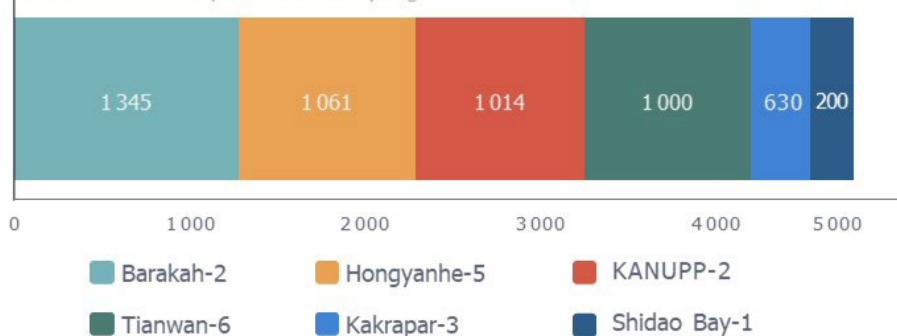




FIG. A-3. En décembre 2021, le Directeur général, Rafael Mariano Grossi, s'est rendu à la centrale nucléaire de Barakah (Émirats arabes unis), où il s'est entretenu avec de jeunes professionnels du nucléaire.

8. Des programmes d'exploitation à long terme et de gestion du vieillissement concernant un nombre croissant de réacteurs nucléaires de puissance étaient en cours dans le monde, et plus particulièrement en Amérique du Nord et en Europe. La Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) a approuvé une demande de prorogation de 20 ans des licences d'exploitation soumise par Dominion Energy pour les réacteurs Surry-1 et Surry-2 implantés dans le sud-est de l'État de Virginie. Cela permettra de porter à 80 ans la durée de vie de ces deux réacteurs de puissance, qui pourront ainsi être exploités jusqu'en 2052 et 2053. L'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a elle aussi annoncé avoir terminé l'examen du plan présenté par Électricité de France (EDF) en vue de prolonger de dix années supplémentaires la durée de vie de 32 réacteurs de 900 MWe. Elle a estimé que les mesures envisagées par EDF, conjuguées à celles qu'elle avait elle-même prescrites, permettaient d'espérer le maintien en exploitation de ces réacteurs pour dix années supplémentaires à l'issue du quatrième examen périodique de la sûreté dont ils ont fait l'objet. L'actualisation des études de conception et le remplacement de certains équipements exigés pour la prolongation de l'exploitation des réacteurs Tricastin-1 et Bugey-2 sont d'ores et déjà chose faite, de sorte qu'ils pourront fonctionner jusqu'en 2031.

9. En 2021, une capacité nucléaire de 8,7 GWe (dix réacteurs) a été définitivement retirée du réseau. Cette perte de capacité est due à moitié à la mise à l'arrêt, en Allemagne, des trois réacteurs suivants : Brokdorf (REP, 1 410 MWe), Grohnde (REP, 1 360 MWe) et Gundremmingen-C (REB, 1 288 MWe). Trois réacteurs refroidis par gaz — Dungeness B-1 (545 MWe), Dungeness B-2 (545 MWe) et Hunterston B-1 (490 MWe) ont été retirés du service au Royaume-Uni. Les quatre autres réacteurs qui ont été mis à l'arrêt sont les suivants : KANUPP-1 (RELP, 90 MWe) au Pakistan, Kursk-1 (réacteur refroidi par eau ordinaire et modéré au graphite, 925 MWe) en Fédération de Russie, Indian Point-3 (REP, 1 030 MWe) aux États-Unis d'Amérique et Kuosheng-1 (REB, 985 MWe) à Taïwan (Chine).

Tendances

10. Dans l'ensemble, la capacité électronucléaire a progressivement augmenté ces dix dernières années, avec une augmentation de quelque 20,7 GWe de capacité résultant du couplage de nouvelles tranches au réseau et de la mise à niveau de réacteurs existants (figure A.4).



FIG. A-4. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, observant le chantier de construction du réacteur Angra III à la centrale nucléaire Amiral Alvaro Alberto (Brésil).

11. L'exploitation à long terme est indispensable pour assurer le passage à des systèmes de production d'électricité à faible émission de carbone et pour atteindre les objectifs de neutralité carbone, mais aussi pour ménager un délai en attendant l'accroissement des capacités de production d'électricité sobre en carbone, notamment la construction de nouvelles centrales nucléaires. Qui plus est, les centrales nucléaires actuelles représentent la source d'électricité à faible émission de carbone sûre et sécurisée la moins coûteuse. Certains réacteurs ont néanmoins été mis à l'arrêt ces dix dernières années, et d'autres le seront probablement à court terme pour des raisons économiques, même si des exploitants voient leur licence prolongée. De plus, les chaînes d'approvisionnement existantes connaissent des difficultés qui pourraient avoir des conséquences sur les activités, les projets et la planification des arrêts en cours. Néanmoins, d'autres voient le jour dans des pays primo-accédants, ouvrant ainsi des perspectives à de nouveaux acteurs.

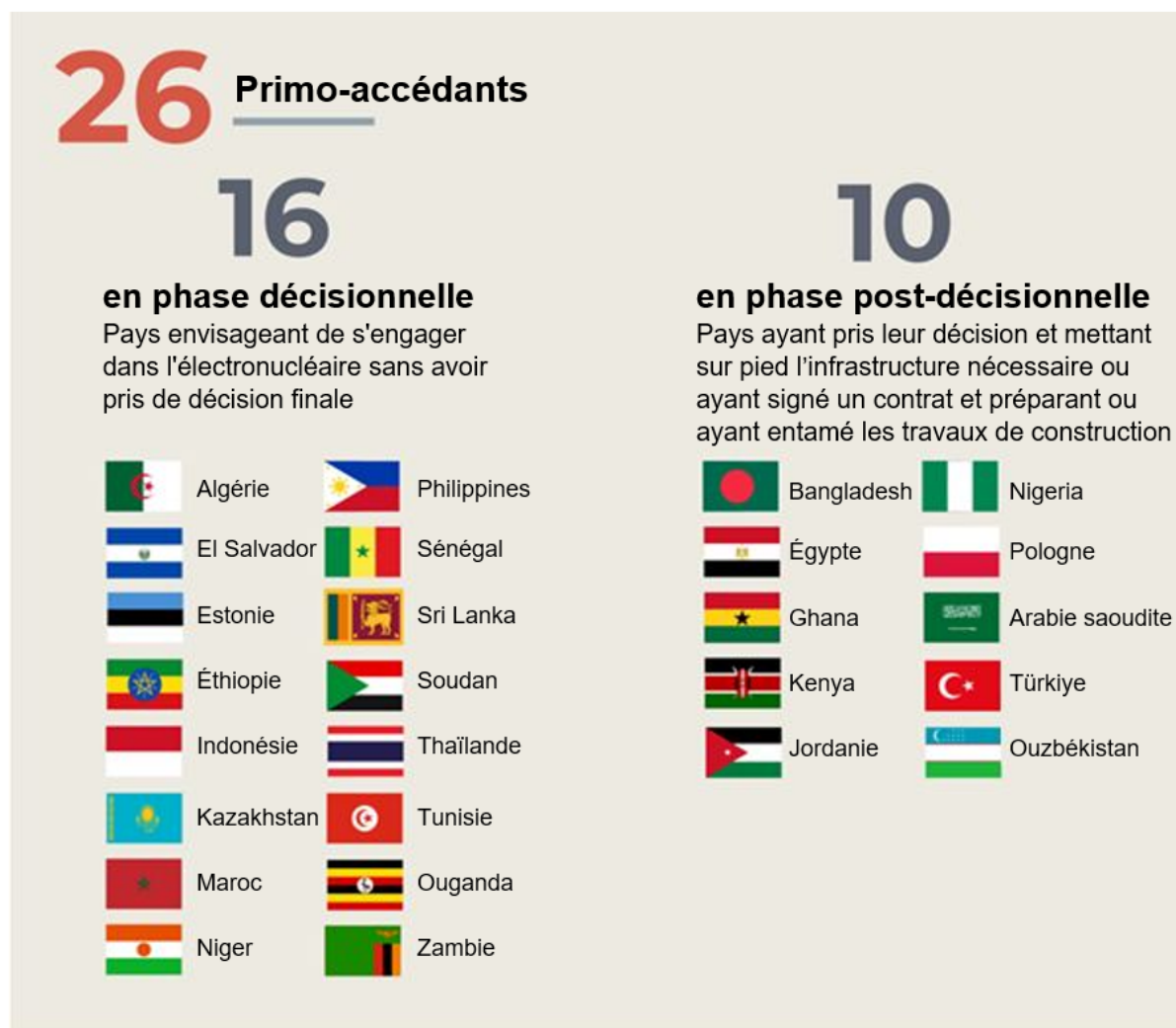
A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion

Situation

12. Parmi les 50 États Membres qui ont déclaré souhaiter recourir à l'électronucléaire, 24 sont au stade pré-décisionnel et mènent des activités de planification. Les 26 autres, qui s'emploient à introduire l'électronucléaire, se rangent en deux groupes :

- seize en sont à la phase décisionnelle, c'est-à-dire qu'ils envisagent de recourir à l'électronucléaire, certains d'entre eux ayant entrepris une étude de préfaisabilité ou préparant activement l'infrastructure sans avoir pris de décision (Algérie, El Salvador, Estonie, Éthiopie, Indonésie, Kazakhstan, Maroc, Niger, Ouganda, Philippines, Sénégal, Soudan, Sri Lanka, Thaïlande, Tunisie, Zambie) ;
- dix en sont à la phase post-décisionnelle, c'est-à-dire qu'ils ont pris leur décision et mettent sur pied l'infrastructure, ou ont signé un contrat et entameront prochainement les travaux de

construction (Arabie saoudite, Bangladesh, Égypte, Ghana, Kenya, Jordanie, Nigeria, Ouzbékistan, Pologne, Türkiye).



13. Au Bangladesh, la première centrale nucléaire est actuellement en construction et l'exploitation commerciale de ses deux tranches devrait démarrer en 2024 et 2025. En 2021, la construction de quatre tranches s'est poursuivie à la centrale nucléaire d'Akkuyu (Türkiye), pour une mise en service prévue entre 2023 et 2026. En Égypte, l'Autorité des centrales nucléaires a sollicité en juillet 2021 un permis de construire pour les première et deuxième tranches de la centrale d'El Dabaa. La préparation du site retenu pour son implantation se poursuit. Les deux principaux organismes en charge du projet (l'Autorité des centrales nucléaires et l'Autorité égyptienne de réglementation nucléaire et radiologique) ont entrepris de se restructurer en fonction des besoins du programme. En Pologne, la société PGE EJ 1 a été entièrement rachetée par l'État en mars 2021 et rebaptisée PEJ. La nouvelle entité jouera le rôle d'investisseur pour les REP envisagés, dont la capacité nucléaire installée devrait se situer entre 6 000 et 9 000 MWe d'ici 2042. La construction des deux premières centrales devrait débuter en 2026 et 2032, avec une mise en service de la première tranche en 2033. En Argentine, la construction du réacteur CAREM sur le site adjacent à la centrale Atucha 1 est bien avancée, l'objectif étant de produire 32 MWe pour faire la démonstration du prototype.

14. En Arabie saoudite, le cahier des charges pour l'appel d'offres concernant les deux premières tranches de 1 000 à 1 600 MWe de la centrale nucléaire est en cours d'élaboration. La Jordanie a décidé de mener deux stratégies en parallèle dans le cadre de son programme électronucléaire, l'une axée sur une grande centrale nucléaire (1 000 MWe sur un modèle de construction-propriété-exploitation-cession), l'autre — prioritaire — tournée vers les RFMP. Les documents constitutifs du cahier des

charges relatif au projet de RFMP ont été rédigés ; ils devraient être établis sous leur forme définitive et annoncés au début de 2022. Le Ghana a continué de développer son infrastructure nationale de façon à pouvoir mener à bien un programme électronucléaire et a notamment renforcé plus encore les capacités des principaux organismes concernés. Le Ministère de l'énergie a lancé auprès de fournisseurs potentiels un appel à manifestation d'intérêt pour la mise au point d'un réacteur offrant une capacité d'environ 1 000 MWe. La première centrale nucléaire devrait être mise en chantier en 2023 et sa mise en service est prévue pour 2029. Le Kenya a annoncé qu'il envisageait de se doter d'un réacteur de recherche et d'une grande centrale nucléaire ; il songe également à s'équiper de RFM. Après les retards auxquels le Nigeria a dû faire face suite aux restructurations dont les principaux organismes concernés ont fait l'objet et à la pandémie de COVID-19, les activités relatives au programme électronucléaire ont repris et ont notamment permis de mettre à jour les études de préfaisabilité et de faisabilité en vue de réévaluer la viabilité économique du projet de centrale nucléaire. Pour nombre de ces pays, l'introduction de l'électronucléaire dans le bouquet énergétique représente une importante contribution à leurs objectifs en matière d'atténuation du changement climatique. Ils sont plusieurs (l'Égypte, la Jordanie et la Türkiye) à avoir intégré le nucléaire dans les contributions déterminées au niveau national qu'ils ont soumises à la CCNUCC au titre de l'Accord de Paris.

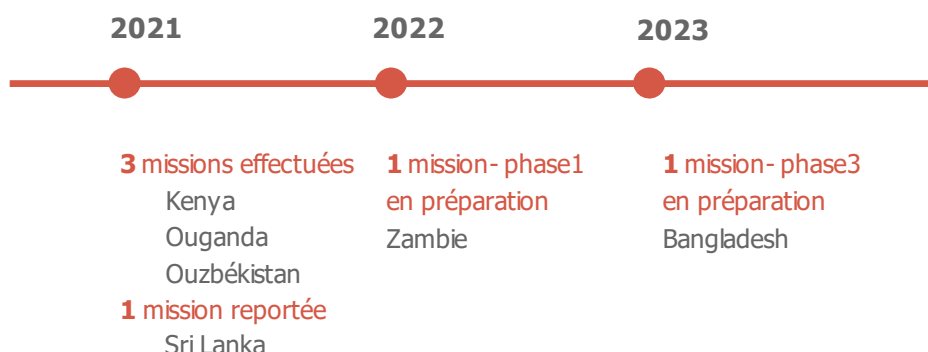
15. En 2021, l'Agence a mené trois missions d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR), au Kenya (suivi de phase 1), en Ouganda (phase 1) et en Ouzbékistan (phase 2). La mission prévue à Sri Lanka (phase 1) a été reportée en raison de la pandémie de COVID-19 (figure A.5). L'Agence a également reçu de la Zambie une demande de mission INIR (phase 1) et du Bangladesh une demande dans le même sens (phase 3) ; ces deux missions sont en préparation et devraient avoir lieu en 2022 et 2023 respectivement.



FIG. A-5. Examen par l'AIEA de la mise en place de l'infrastructure électronucléaire de l'Ouganda.

16. Par ailleurs, 15 États Membres mettent en œuvre des plans de travail intégrés (PTI). Sous l'effet de la pandémie, les examens complets et à mi-parcours des PTI se sont déroulés au cours de réunions en ligne avec les équipes restreintes.

Missions d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire



Tendances

17. Le nombre de pays qui exploitent des centrales nucléaires pourrait augmenter de quelque 30 % d'ici 2035 ; 10 à 12 nouveaux États viendraient ainsi s'ajouter à la liste des 32 pays actuels. Cette hausse significative exige un effort accru de préparation des infrastructures de la part de ces pays, avec le concours de l'Agence, afin de garantir un déploiement responsable.

En 2035,

30 % de nouveaux pays



soit 10 à 12 pays de plus

pourraient exploiter des centrales nucléaires.

18. La mise à disposition et l'implantation attendues de plusieurs modèles inédits de RFMP d'ici 2030 constituent une évolution technologique de taille qui attire l'attention des planificateurs et des décideurs chargés de la politique énergétique. C'est là ce qui a incité plusieurs pays à intégrer les RFMP dans leur réflexion sur les questions d'ordre technologique ou à continuer de suivre la situation : c'est notamment le cas, pour les primo-accédants, de l'Arabie saoudite, de l'Estonie, du Ghana, de l'Indonésie, de la Jordanie, du Kenya, des Philippines, de la Pologne, du Soudan et de la Zambie, et, parmi les pays qui développent leur programme électronucléaire, de l'Afrique du Sud, de la Bulgarie, de la République tchèque et de la Roumanie. Les progrès de la technologie des RFMP et les avantages que ces derniers peuvent offrir comparativement aux grandes centrales nucléaires, tels que les investissements initiaux moins élevés, la possibilité de couplage à de petits réseaux, les applications non électriques et leur modularité extensible, sont autant d'arguments qui les séduisent.

19. Il importe de souligner ici que l'infrastructure électronucléaire nationale exige la même attention constante et scrupuleuse à la sûreté nucléaire, à la sécurité nucléaire et aux garanties, que le programme repose sur de grandes centrales ou sur des RFMP.

20. Les progrès des dix États Membres qui ont entrepris de développer leur programme électronucléaire fondé sur des centrales nucléaires évolutives traduisent un intérêt constant pour les technologies des centrales à grande échelle. Dans le même temps, les États disent vouloir utiliser des modèles de référence en exploitation et tirer profit de l'expérience acquise par les organismes de réglementation et les exploitants dans le pays d'origine.

A.4. Développement de la technologie électronucléaire

Situation

21. Les réacteurs nucléaires de puissance évolutifs, c'est-à-dire des modèles dont la conception a fait l'objet de modifications ou d'améliorations relativement mineures au regard des centrales qui composent le parc actuel, sont d'ores et déjà une réalité bien ancrée dans de nombreuses régions du monde. Des réacteurs avancés refroidis par eau sont exploités au Bélarus, en Chine, aux Émirats arabes unis, en Fédération de Russie et au Japon. Dans d'autres pays, comme en Argentine, aux États-Unis, en France, en Finlande et au Royaume-Uni, des réacteurs du même type mais d'une puissance différente sont à un stade de construction avancé, et certains sont en passe d'entrer en service. Deux réacteurs industriels à neutrons rapides refroidis au sodium fonctionnent en Fédération de Russie ; c'est également dans cet État qu'a démarré le chantier du tout premier réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb. Des réacteurs à neutrons rapides sont par ailleurs en exploitation ou en construction en Chine et en Inde. Le premier réacteur modulaire à haute température à lit de boulets refroidi par gaz a été couplé au réseau en Chine, en décembre 2021.

22. Parallèlement, les États Membres manifestent un intérêt de plus en plus marqué pour la mise au point et le déploiement rapides de réacteurs innovants, c'est-à-dire de modèles avancés intégrant des changements radicaux de conception ou de configuration des systèmes par rapport à ce qui se faisait jusqu'ici. Des concepts novateurs sont à l'étude dans chacune des grandes filières de réacteurs — les réacteurs refroidis par eau, les réacteurs à haute et très haute température refroidis par gaz, les réacteurs à spectre de neutrons rapides refroidis au sodium, au plomb et par gaz, les réacteurs à sels fondus et, plus récemment, les microréacteurs. Certains de ces concepts, qui pouvaient être développés à court terme, sont pratiquement au point ; pour d'autres modèles en revanche, plus innovants, il reste encore beaucoup d'étapes à franchir, notamment des travaux de recherche-développement (R-D), des essais de faisabilité, et l'élaboration de tout l'argumentaire de sûreté. Plusieurs concepteurs et fournisseurs s'emploient cependant à mettre au point des prototypes et réacteurs innovants de démonstration partout dans le monde.

23. Ces dix dernières années, le secteur nucléaire et un nombre croissant d'États Membres se sont beaucoup intéressés à une catégorie particulière de réacteurs avancés, à savoir les petits réacteurs modulaires susceptibles d'être déployés à court terme. Nombre de ces réacteurs sont destinés à des marchés de niche de production d'électricité ou d'énergie dans lesquels les grands réacteurs avancés ne constitueraient pas une solution viable. Ils devraient permettre de répondre à la nécessité de produire de l'électricité de manière souple pour un large éventail d'utilisateurs et d'applications, notamment pour le remplacement des centrales à combustibles fossiles vieillissantes, l'approvisionnement de régions isolées ou non reliées au réseau, la cogénération d'énergie pour des applications électriques et non électriques, ou encore la possibilité d'utiliser des systèmes hybrides associant énergie nucléaire et énergies renouvelables.

Tendances

24. Grâce à la puissance des capacités informatiques et des outils d'analyse de données désormais disponibles, le secteur nucléaire se tourne vers des techniques faisant appel à l'intelligence artificielle, à l'apprentissage automatique et à l'apprentissage en profondeur qu'il met à profit pour mener un large éventail d'activités susceptibles de révolutionner la conception des systèmes nucléaires, leur autorisation et leur fonctionnement. L'intelligence artificielle peut améliorer l'intégration de calculs et de données

expérimentales provenant d'expériences réalisées à petite échelle ou obtenus au moyen de capteurs pendant l'exploitation. Une fois optimisée, cette intégration permet aux informaticiens de mettre au point des modèles physiques d'une précision inégalée et aux scientifiques chargés des expérimentations de réduire au maximum le coût et le nombre des expériences qu'ils sont amenés à réaliser pour valider des systèmes inédits. Elle donne également aux opérateurs la possibilité de surveiller l'état d'un système qui ne peut être directement équipé d'instruments de contrôle. Des méthodes et outils reposant sur l'intelligence artificielle peuvent être utilisés pour établir des analyses prédictives fondées sur des paramètres physiques qui serviront à optimiser les phases de conception, de fabrication et de construction, à obtenir des gains d'efficacité d'exploitation, à améliorer les processus itératifs de conception de nouveaux réacteurs, à détecter des failles propres à un modèle déterminé, et à élaborer des systèmes de contrôle sophistiqués. L'intelligence artificielle peut aussi offrir d'autres avantages au secteur nucléaire en termes de fiabilité, de sûreté et d'efficacité globale.

A.4.1. Réacteurs avancés refroidis par eau

Situation

25. Les réacteurs refroidis par eau ont d'emblée joué un rôle important dans le secteur nucléaire commercial et représentent aujourd'hui plus de 95 % des réacteurs de puissance civils en exploitation dans le monde. À la fin de 2021, 48 des 51 réacteurs nucléaires en construction étaient des réacteurs refroidis à l'eau ordinaire ou à l'eau lourde.

26. Parmi les principaux faits nouveaux intervenus dans le secteur des réacteurs avancés refroidis par eau en 2021, on retiendra la mise en chantier d'un réacteur HPR-1000 (Chiangjiang-3) en Chine, de réacteurs VVER-1200 (V-491) (Tianwan-7 et Xudabao-3) en Chine, d'un réacteur VVER (V-509) (Akkuyu-3) en Turquie, ainsi que le couplage au réseau d'un réacteur APR-1400 (Barakah-2) aux Émirats arabes unis, d'un réacteur ACPR-1000 (Hongyanhe-5) en Chine, d'un réacteur CNP-1000 (Tianwan-6) en Chine également, d'un réacteur ACP-1000 (KANUPP-2) au Pakistan et d'un réacteur PHWR-700 (Kakrapar-3) en Inde.

27. Des modèles avancés de réacteurs refroidis par eau sont aussi de plus en plus envisagés, étudiés et déployés dans plusieurs pays, du fait de la mise en place progressive de cycles du combustible de pointe plus efficaces.

28. Quatre pays (le Canada, la Chine, la Fédération de Russie et le Japon) ainsi que l'Union européenne participent conjointement à des activités de R-D portant sur les concepts du réacteur refroidi par eau supercritique (RESC), dont l'objectif principal est de produire de l'électricité de manière efficace, économique et sûre. La majorité des centrales qui en seront dotées sont conçues pour produire plus de 1 000 MWe d'électricité à des pressions de fonctionnement d'environ 25 MPa et des températures en sortie de réacteur comprises entre 500 et 625 °C. Par conséquent, les RESC pourraient produire de l'électricité avec une efficacité thermique de 43 à 48 %, bien supérieure à celles du parc actuel de réacteurs nucléaires. La température élevée en sortie du cœur des RESC facilite la cogénération, notamment pour la production d'hydrogène, le chauffage et la production de vapeur. Les modèles de RESC sont pour la plupart conçus pour une production d'électricité en charge de base supérieure à 1 000 MWe, ce qui est jugé excessif pour de modestes localités isolées, pour des petites exploitations minières et pour la production de pétrole. Dans une configuration modulaire, les RESC peuvent être ramenés à une plus petite échelle de façon à répondre à des besoins locaux. Des petits et très petits modèles de RESC ont également commencé à être développés. La Chine développe un modèle de 150 MWe pour une centrale de démonstration. Les études de conception du modèle de RESC canadien, un réacteur à tubes de force modéré à eau lourde, et du CSR1000 chinois ont été menées à bien (figure A.6).

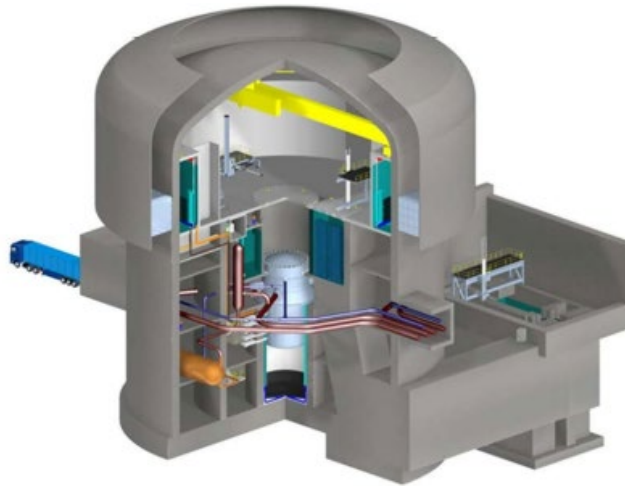


FIG. A-6. Étude de conception du modèle de REESC canadien — Vue en coupe du bâtiment du réacteur (Image : Schulenberg et Leung, Laboratoires nucléaires canadiens)

29. En Europe, le concept de réacteur à eau ordinaire de haute performance, qui répond à la faisabilité économique d'un REO de haute efficacité refroidi à l'eau supercritique, devrait atteindre un rendement supérieur d'environ 44 % et une température cible de sortie de la vapeur d'eau de 500 °C sans dépasser les limites du matériau de gainage disponible. La conception de réacteurs innovants de puissance refroidis et modérés par eau supercritique (VVER) par la Fédération de Russie fait aussi apparaître la possibilité d'utiliser un cœur à spectre rapide.

Tendances

30. La plupart des réacteurs avancés refroidis par eau ont une capacité de production accrue (entre 1 000 et 1 700 MWe par tranche pour les derniers construits), que l'on s'efforce d'augmenter encore lors de la conception de grands modèles évolutifs de tels réacteurs. En outre, la tendance est clairement aux sites à plusieurs tranches, avec un seul ou plusieurs types de réacteurs, ce qui souligne l'importance des économies d'échelle pour les réacteurs nucléaires commerciaux. Ils sont actuellement une trentaine de pays à n'être pas équipés de centrales nucléaires et à envisager d'en construire. Pour ces primo-accédants, les premiers réacteurs seront probablement des réacteurs avancés refroidis par eau.

A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires, y compris les réacteurs à haute température

Situation

31. Tout au long de l'année 2021, le développement de la technologie des RFMP en vue d'une implantation à court terme a nettement progressé dans de nombreux États Membres. Plus de 70 modèles de petits réacteurs modulaires fondés sur les principales technologies sont en gestation aux fins de différentes applications.

32. En Fédération de Russie, la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov équipée de deux réacteurs KLT-40S est exploitée commercialement depuis mai 2020 à la suite de son couplage au réseau en décembre 2019 et alimente en électricité et en chaleur décarbonée le port de Pevek. En Chine, le réacteur modulaire à lit de boulets à haute température refroidi par gaz (HTR-PM) a été couplé au réseau le 20 décembre 2021 (figure A.7). Ses deux modules ont divergé respectivement en août et en novembre 2021. Le HTR-PM, qui sera une centrale de démonstration, produira 210 MWe. En Argentine, le réacteur CAREM-25, un prototype de REP intégré, en est à un stade de construction avancé sur le site de la centrale nucléaire Néstor Carlos Kirchner ; le chargement en combustible, la mise en

service et le démarrage sont prévus pour 2024, l'objectif étant d'atteindre une puissance brute de 100 MWth et 34 MWe.



*FIG. A-7. En Chine, le HTR-PM a été couplé au réseau électrique le 20 décembre 2021.
(Photo : Université de Tsinghua, Institut de technologie de l'énergie nucléaire
et des énergies nouvelles, Chine)*

33. En juillet 2021, la Chine a entamé la construction d'un réacteur ACP100 de 125 MWe, aussi appelé Linglong One, qui sera implanté à Changjiang, dans la province de Hainan. Ce REP de type intégré est conçu comme un petit réacteur de puissance polyvalent. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a délivré l'agrément du modèle type pour le réacteur de NuScale. Le Power Module de NuScale (NPM) est un REP intégré à circulation naturelle, qui comprend six modules de 77 MWe chacun. Sa construction débutera dans les trois prochaines années, sur un site proche du Laboratoire national de l'Idaho. Il entrera en service d'ici 2029.

34. Fin 2021, pas moins de 16 États Membres menaient des programmes nationaux de développement de la technologie et de la conception des RFMP, le plus souvent en collaboration avec d'autres acteurs au niveau international. En juillet 2021, l'exploitation du réacteur expérimental à haute température (HTTR), dont le cœur constitué de blocs prismatiques permet de générer 30 MWth, a repris au Japon. Quelque temps auparavant, l'Arabie saoudite et la République de Corée ont terminé conjointement la phase d'études techniques de l'avant-projet de réacteur avancé modulaire intégré (SMART), qui a débouché sur un rapport préliminaire d'analyse de la sûreté concernant le REP intégré de 110 MWe. La France progresse dans la mise au point du PRM NUWARD, un REP intégré de 340 MWe (deux réacteurs de 170 MWe) avec convection forcée et systèmes de sûreté avancés qui pourrait être implanté à l'étranger au début des années 2030. De même, le Royaume-Uni a poursuivi ses activités de développement de la technologie de son RFMP à trois boucles de type REP d'une puissance de 470 MWe, en vue d'un déploiement national et international d'ici à 2030. En Fédération de Russie, il a été décidé d'entamer en 2024 la construction, en Yakoutie, du RITM-200N — un REP intégré pour des centrales terrestres capable de produire 50 MWe. Plusieurs tranches de réacteurs RIRM-200N ont été installées dans des brise-glaces à propulsion nucléaire. Au Canada, la feuille de route et le plan d'action concernant les PRM prévoit pour ces réacteurs de possibles applications dans la perspective du remplacement, en réseau et hors réseau, de centrales alimentées par des combustibles fossiles et au diesel, y compris dans les industries pétrolière et minière.

Tendances

35. En 2021, les activités liées à la mise au point d'un sous-ensemble de RFMP connus sous le nom de « microréacteurs » se sont également intensifiées dans plusieurs pays, notamment au Canada, aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie, au Japon, en République tchèque et au Royaume-Uni. Ces réacteurs issus des principales filières technologiques, qui devraient constituer la solution optimale pour produire simultanément de la chaleur et de l'électricité dans des régions reculées ou sur de petites îles, pourraient remplacer les générateurs diesel.

36. De nouveaux pays se sont lancés dans la mise au point de réacteurs de navire. La Fédération de Russie a élaboré quatre modèles de RFMP pour des unités flottantes de production d'électricité et un modèle, baptisé « SHELF », pour une unité immergée sur les fonds marins (figure A.8). La Chine possède au moins un modèle, l'« ACPR100 », conçu pour fournir de l'électricité aux plateformes pétrolières et gazières en mer. La mise au point par la République de Corée de BANDI-60, unité flottante de production d'électricité de type REP, s'est également poursuivie.



FIG. A-8. D'une capacité de 70 MWe, la centrale nucléaire Akademik Lomonosov équipée de deux réacteurs KLT-40S est exploitée à des fins commerciales depuis mai 2020 à Pevek (Fédération de Russie). (Photo : OKBM Afrikantov, filiale de Rosatom)

37. L'objectif général du développement des RFMP est de démontrer qu'il est possible, en misant sur une puissance réduite et sur la modularité, de limiter le montant de l'investissement initial grâce aux économies associées à la production en série et de mettre en place des mécanismes de financement accessibles en simplifiant la conception et en raccourcissant les délais de construction. Pour favoriser la convergence des vues des États Membres quant à leurs besoins et particularités en matière de technologie des RFMP, l'Agence a mis en place un nouveau cadre destiné à établir des conditions et des critères génériques d'utilisation des modèles et de la technologie des petits réacteurs modulaires. Le document national fixant les conditions et critères précités a pour principal intérêt de définir un ensemble de prescriptions générales, techniques et économiques essentielles qui aideront les pays primo-accédants à évaluer cette technologie et à élaborer *in fine* des dossiers d'appel d'offres. Si les RFMP réussissent leur implantation au cours des dix prochaines années, un nombre croissant de pays primo-accédants pourraient être incités à prendre ces réacteurs en considération et à participer aux activités de R-D y afférentes.

A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides

Situation

38. La Fédération de Russie continue d'exploiter deux réacteurs industriels à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) (BN-600 et BN-800) à la centrale de Beloyarsk et s'emploie à mettre au point, sur

le même site, le RNR-Na de quatrième génération (BN-1200). Le réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides est en construction à Dimitrovgrad. Il a été procédé à Seversk, en juin 2021, à la première coulée de béton du futur réacteur expérimental de démonstration refroidi au plomb (BREST-OD-300). La Chine a poursuivi la construction d'un deuxième RNR-Na CFR-600 sur le territoire du comté de Zhapu, dans la province du Fujian. En Inde, les opérations censées permettre au prototype de surgénérateur à neutrons rapides refroidi au sodium, d'une capacité de 500 MWe, de diverger pour la première fois et d'entrer en service en 2020 ont été reportées. En 2021, TerraPower et GE Hitachi Nuclear Energy ont fait savoir qu'ils envisageaient de construire dans l'État du Wyoming, aux États-Unis, un réacteur hybride avancé Natrium caractérisé par un RNR-Na de 345 MWe combiné à un système à sels fondus capable de porter la puissance totale à 500 MWe (figure A.9).



FIG. A-9. Bill Gates dans les locaux de TerraPower, avec une maquette d'un sous-assemblage refroidi au sodium. (Photo : Gates Notes)

Tendances

39. Forts de leur technologie éprouvée et d'une expérience d'exploitation de plus de 400 années-réacteur, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium constituent la majorité des systèmes en exploitation et des systèmes d'énergie nucléaire à neutrons rapides nouvellement construits. Dans le même temps, la technologie des caloporteurs utilisant des métaux lourds liquides suscite de plus en plus d'intérêt, en particulier pour les RFMP, dont plusieurs modèles innovants reposent sur des réacteurs refroidis au plomb ou à l'eutectique plomb-bismuth. Plusieurs pays estiment également dans leurs études de conception de réacteurs innovants que d'autres caloporteurs, comme l'hélium et les sels fondus, constituent une technologie prometteuse. D'une manière générale, les réacteurs à neutrons rapides sont considérés comme un élément clé des systèmes d'énergie nucléaire durables de demain, dans la mesure où l'essor massif de l'électronucléaire passera nécessairement par l'exploitation de tout le potentiel qu'offrent les ressources en uranium naturel et/ou thorium.

A.4.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire

Situation

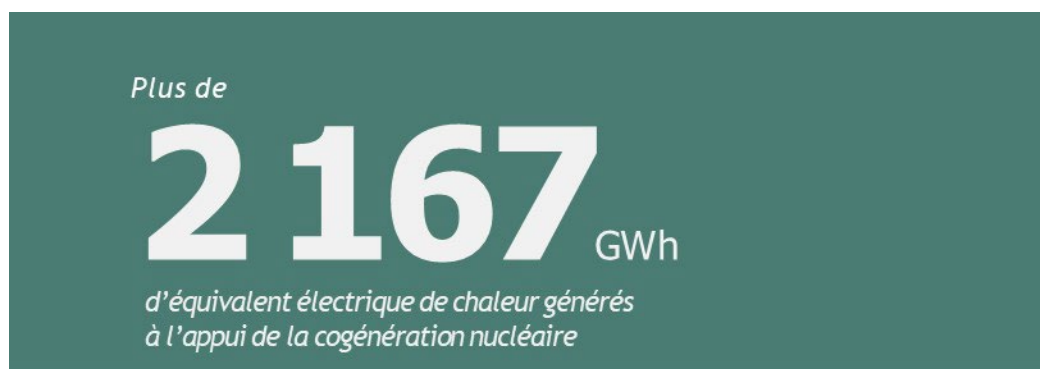
40. En 2021, 61 réacteurs nucléaires en exploitation étaient utilisés pour des applications non électriques (dessalement, chauffage urbain et chaleur industrielle), produisant chaque année plus de 2 167 GW·h d'équivalent électrique de chaleur. Sur ces 61 réacteurs, 48 facilitaient les applications liées au chauffage urbain, trois soutenaient celles liées à la chaleur industrielle, cinq contribuaient à la fourniture à la fois du chauffage urbain et de la chaleur industrielle et cinq appuyaient le dessalement.

41. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications utiles non électriques suscite un intérêt sans précédent dans le monde entier, au motif notamment qu'elle offre la possibilité de produire de la

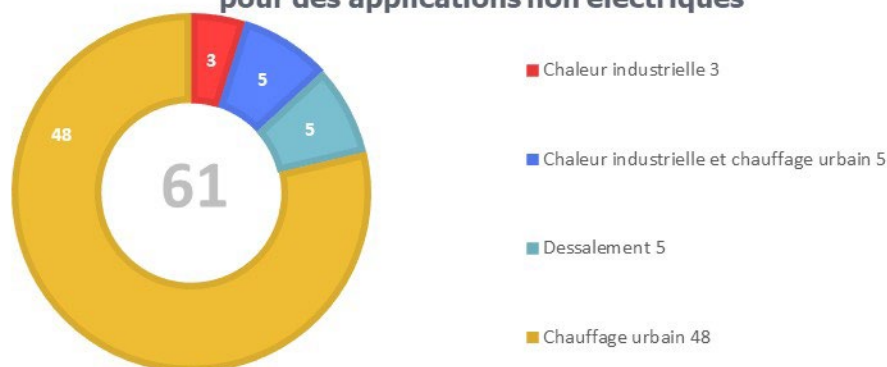
chaleur, de l'hydrogène ou d'autres produits sans aucune émission de carbone. La technologie de chauffage nucléaire repose sur des procédés éprouvés, ouvre de vastes débouchés et laisse entrevoir un formidable potentiel de développement. La Chine, qui a rejoint le groupe de pays qui expérimentent l'énergie nucléaire pour le chauffage urbain — groupe dont font partie la Bulgarie, la Fédération de Russie, la Hongrie, la République tchèque, la Roumanie, la Slovaquie, la Suisse et l'Ukraine —, a entamé elle aussi un projet de ce type fin 2020, projet qu'elle pilote depuis la centrale nucléaire de Haiyang, dans la province du Shandong. La chaleur fournie par les tranches 1 et 2 de la centrale de Haiyang (réacteurs de troisième génération basés sur la technologie AP1000) a permis de remplacer les chaudières au charbon, ce qui s'est traduit par une baisse des émissions de dioxyde de carbone de l'ordre de 180 000 tonnes par an. Un projet de démonstration de chauffage urbain a également été lancé à la centrale nucléaire de Qinshan, dans la province du Zhejiang ; il ambitionne d'assurer, d'ici 2025, le chauffage par énergie nucléaire d'une superficie de 4 millions de mètres carrés couvrant les principaux centres urbains du comté de Haiyan et toute la ville de Zhapu.

42. Plusieurs pays étudient la possibilité de produire de l'hydrogène à partir de l'électricité ou de la chaleur provenant de réacteurs nucléaires. Selon une étude exploratoire réalisée récemment par l'Agence sur la base de travaux de modélisation, l'énergie nucléaire pourrait devenir le moyen le plus économique de produire de l'hydrogène propre si les prix du gaz demeurent bien supérieurs aux faibles niveaux observés au cours des dernières décennies. Le basculement intervient lorsque le gaz naturel atteint 10 à 15 dollars par million d'unités thermiques britanniques — soit nettement moins que le prix déjà constaté au deuxième semestre de cette année au sein de l'Union européenne, au Royaume-Uni et dans certaines parties du continent asiatique.

43. La France a annoncé en octobre 2021 qu'elle s'était fixée pour objectif, à l'horizon 2030, de mettre en chantier un petit réacteur modulaire et d'utiliser d'autres centrales nucléaires pour produire de l'hydrogène propre par électrolyse. La Fédération de Russie a retenu le site de la centrale nucléaire de Kola pour mener des essais de production d'hydrogène propre par électrolyse. Toujours en 2021, les États-Unis ont annoncé qu'ils entendaient dégager une enveloppe de 20 millions de dollars pour promouvoir la technologie qui permettrait d'obtenir une énergie propre grâce à l'hydrogène généré par la voie nucléaire. Cette décision viendra appuyer l'initiative « Hydrogen Shot » qui a été lancée cette année et dont l'objectif est d'arriver, d'ici dix ans, à produire de l'hydrogène pour un coût de 1 dollar par kilogramme.



Nombre de réacteurs nucléaires utilisés pour des applications non électriques



Tendances

44. Les technologies émergentes que sont notamment les RFMP et les microréacteurs concernent surtout les systèmes de moindre puissance capables de se prêter à des applications qui ne se limitent pas au réseau électrique, telles que l'énergie de chauffage décarbonée pour les réseaux urbains, la chaleur industrielle, la production d'hydrogène et la production d'électricité modulable. Les microréacteurs constituent une solution particulièrement indiquée pour fournir de l'énergie propre et financièrement compétitive sur les marchés décentralisés et hors réseau. Les concepts de réacteurs avancés capables d'avoir des températures de sortie élevées présentent un intérêt particulier, en ce qu'ils pourraient ouvrir des perspectives nouvelles considérables pour l'utilisation de la chaleur ainsi produite. Des réacteurs à haute température (HTR) sont en cours de développement dans plusieurs pays, le Japon ayant réalisé d'importants progrès en la matière et la Chine venant de démarrer son premier réacteur HTR-PM dans la province du Shandong.

A.4.5. Recherches sur la fusion nucléaire et mise au point de technologies pour la future production d'énergie

Situation

45. L'assemblage de machines et installations dans le cadre du projet ITER continue de progresser régulièrement en dépit des contraintes sans précédent auxquelles il a fallu faire face en raison de la pandémie et des difficultés de fabrication de certains composants totalement nouveaux. Des avancées notables ont été réalisées en ce qui concerne l'assemblage et l'intégration de la machine ITER. Il a ainsi été procédé à l'installation du bouclier thermique du cylindre inférieur du cryostat dans le puits du tokamak, à la soudure des deux premières sections du cryostat, à l'installation des deux premiers aimants supraconducteurs dans le puits précité et à la réception sur site de deux bobines de champ toroïdal (en provenance d'Europe et du Japon) ainsi que du premier solénoïde central (venu des États-Unis) qui

seront assemblés à six modules indépendants empilés dans une structure haute de 18 mètres (figure A.10).



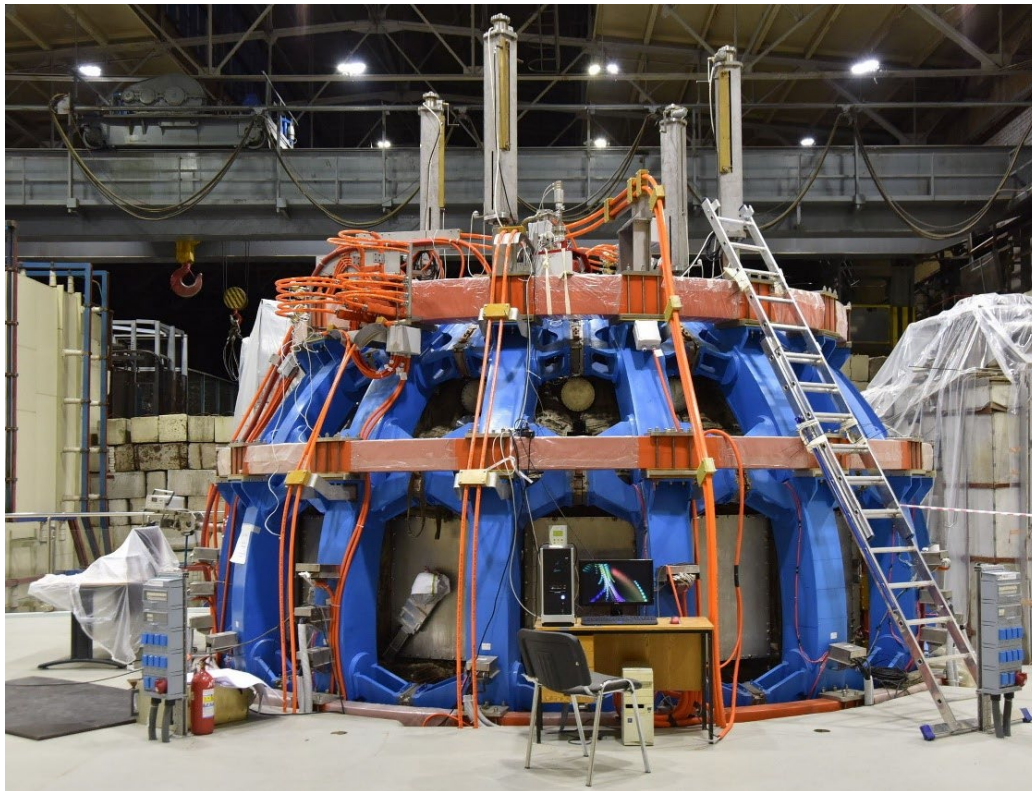
FIG. A-10. Chargement du solénoïde central de 110 tonnes dans la soute d'un cargo pour son transport des États-Unis vers le site ITER en France. D'une hauteur d'un immeuble de cinq étages, cet aimant central de 1 000 tonnes induira un courant électrique de 15 millions d'ampères dans le plasma du réacteur ITER afin d'initier chaque pulsation de plasma et d'assurer la stabilité verticale de ce dernier. Pour ce faire, le solénoïde central générera un champ magnétique d'une force de 13 teslas, soit un champ environ 280 000 plus puissant que le champ magnétique terrestre. (Photo : US ITER)

46. La 28^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, qui s'est tenue en ligne du 10 au 15 mai 2021, a mis en évidence la qualité des travaux menés au plan mondial dans divers domaines (théorie, expérimentation, technologie et matériaux), ainsi que les importantes avancées obtenues en termes de performance des machines actuellement en service, dont un certain nombre de nouveaux tokamaks mis récemment en exploitation — le JT-60SA au Japon, le HL-2M en Chine et le MAST-U au Royaume-Uni.

47. Les résultats des expériences effectuées dans le tokamak européen JET en prévision de la campagne tritium pur et deutérium-tritium ont permis à ITER d'obtenir de précieuses informations pour la mise au point de son système d'atténuation des disruptions, ainsi que des données d'une importance essentielle pour les composants exposés frontalement au plasma et pour la technologie nucléaire. Les enseignements tirés de l'analyse des expériences qui ont été menées en Allemagne dans le stellarateur optimisé Wendelstein 7-X ont confirmé la réduction des pertes énergétiques du plasma, ce qui porte à croire que les défauts des précédents modèles de stellarateurs peuvent être corrigés et que des réacteurs de type stellarateur pourraient également convenir pour des centrales nucléaires. Les résultats de l'expérimentation du nouveau tokamak MAST-U que l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni a installé au Culham Centre for Fusion Energy ont prouvé l'efficacité du système innovant d'évacuation de la chaleur qui devrait assurer la viabilité commerciale des centrales à fusion. Ce nouveau dispositif baptisé « divertor super-X » devrait allonger sensiblement la durée de vie des composants des futurs tokamaks à usage commercial, accroître la disponibilité opérationnelle des centrales nucléaires qui en seraient équipées et améliorer la viabilité économique de ces dernières. Au cours des prochaines décennies, l'installation Divertor Tokamak Test (DTT) en cours de construction à Frascati, sur le site de

l'Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable, permettra de tester différentes géométries de divertor et de les comparer dans un plasma à haute densité de puissance de décharge aussi semblable que possible à un véritable plasma en combustion.

48. En Fédération de Russie, l'Institut Kourtchatov, a fêté la mise en service du tokamak T-15MD, version optimisée du T-15 (figure A.11). Le programme de recherche qui lui est consacré s'efforcera de résoudre les problèmes les plus pressants que rencontre ITER. Aux États-Unis, les expérimentations effectuées au sein de l'Installation nationale d'ignition du Laboratoire national Lawrence de Livermore ont permis de faire un grand pas en avant dans la promotion de l'énergie de fusion, en réussissant à démontrer que son rendement pouvait être supérieur à 1,3 mégajoule.



*FIG. A-11. Le tokamak T-15MD est un réacteur refroidi par eau capable de créer un champ magnétique toroïdal de 2 T à l'axe du plasma ; il sera également équipé de puissants systèmes supplémentaires de chauffage assurant au plasma un apport total d'énergie pouvant aller jusqu'à 20 MW, ainsi que d'une infrastructure technique moderne. Le courant engendré dans le plasma devrait ici atteindre 2 méga-ampères en 10 secondes. Les travaux de construction du tokamak T-15MD se sont étalés sur dix ans. Son programme expérimental contribuera à la mise en service d'ITER et de futures centrales de puissance de fusion.
(Photo : Institut Kourtchatov)*

49. Le développement de la fusion en tant que source d'énergie commercialement viable dépend, entre autres facteurs clés, de la mise en place d'un cadre de sûreté et de réglementation adéquat pour les dispositifs de fusion. En 2021, plusieurs initiatives visant à établir un cadre réglementaire national propre à la fusion ont été lancées en Chine, aux États-Unis, en Europe et au Royaume-Uni. L'Agence a également commencé à réunir toutes les informations disponibles en la matière en vue d'édicter des orientations et bonnes pratiques à l'échelon international, le but final étant d'œuvrer à l'harmonisation de ces instruments.

Tendances

50. La création d'entreprises de fusion à capitaux privés s'est accélérée ces sept dernières années. De nouvelles sociétés sont apparues partout dans le monde, principalement dans les États Membres qui

participent au projet ITER (Chine, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Inde, Japon, République de Corée, Union européenne), ainsi qu'au Royaume-Uni. Une start-up de haute technologie a en outre été constituée en 2020 à l'Université de Nouvelle-Galles du Sud, en Australie. Le type de partenariats public-privé imaginé aux États-Unis s'est révélé très efficace et d'autres États Membres songent à reproduire cette même formule. Le Système d'information sur les dispositifs de fusion¹ (figure A.12) donne un aperçu des différents dispositifs de fusion publics et privés conçus à des fins d'expérimentation et de démonstration qui sont actuellement en service, en construction ou à l'étude.

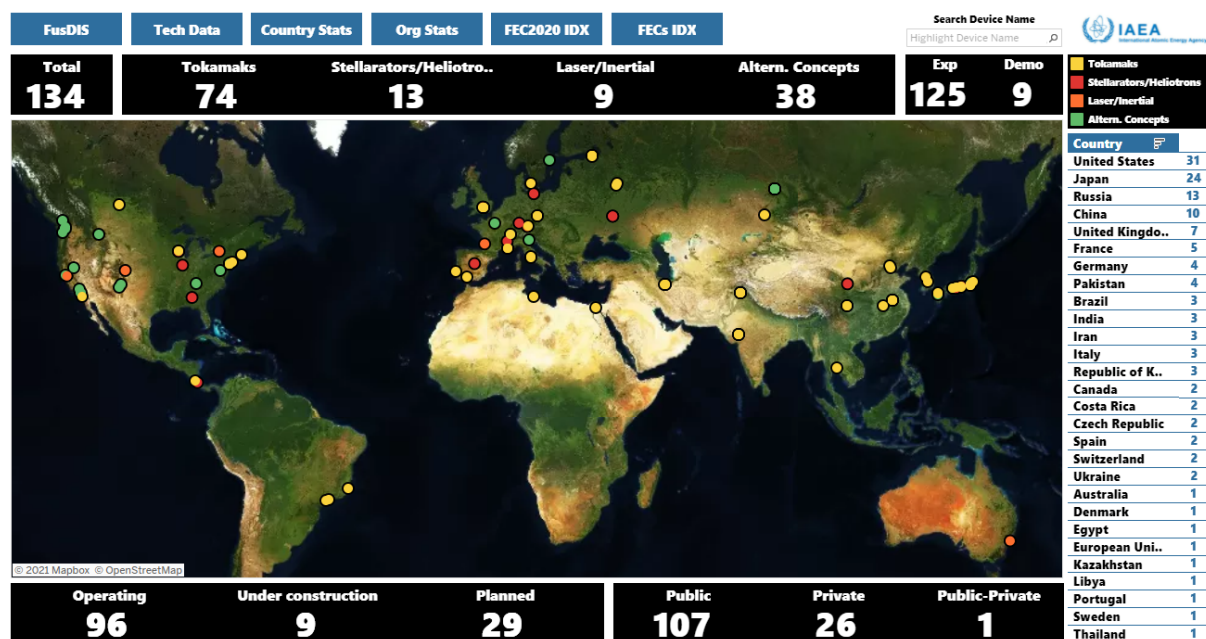


FIG. A-12. Plus de 130 dispositifs de fusion publics et privés à usage expérimental sont en service, en construction ou à l'étude, et plusieurs organismes envisagent de mettre au point des modèles destinés à des centrales de démonstration à fusion.
(Source : Système d'information sur les dispositifs de fusion, AIEA)

51. L'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni a mis en chantier un ambitieux projet visant à montrer, à l'horizon 2040, que la fusion peut générer une puissance électrique nette, projet qui impliquera la construction du tokamak sphérique pour la production d'énergie (STEP). Cette centrale permettra d'acquérir des connaissances et des données d'expérience pour ce qui concerne la maintenance de l'installation tout au long de sa durée de vie opérationnelle, ainsi qu'en matière d'autonomie du combustible. Les études de conception du tokamak STEP devraient être approuvées d'ici 2024 ; il s'agira, dans un premier temps, d'un tokamak sphérique qui sera connecté au réseau national et produira une puissance électrique nette, mais qui ne sera pas utilisé à des fins commerciales. Une enveloppe de 222 millions de livres (264 millions d'euros) a été allouée pour lancer les travaux de conception de STEP. Plusieurs sites sont à l'étude sur le territoire britannique ; la décision définitive devrait être prise à la fin de 2022 (figure A.13).

¹ <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>



*FIG. A-13. Vue du bâtiment dans lequel le tokamak STEP devrait être installé.
(Image : Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni)*

B. Cycle du combustible nucléaire

B.1. Partie initiale

Situation

52. Au premier trimestre de 2021, le prix au comptant de l'uranium était approximativement de 58,40 \$/kg de U_3O_8 . Ce prix persistant a contraint plusieurs producteurs de cette énergie primaire à s'en tenir à des opérations d'entretien et de maintenance ou à des taux de production limités². Depuis 2011, l'offre d'uranium sur le marché est excédentaire ; cependant, en raison de la demande constante de ce minerai pour le combustible nucléaire et du fléchissement de la production primaire, les stocks mondiaux de U_3O_8 diminuent régulièrement face à la baisse durable des prix du marché. La tendance à la diminution des stocks est clairement apparue en 2020 et 2021.

53. La baisse continue de la production primaire dans le monde tout au long de 2020 mais également en 2021 a mis en évidence la fragilité du marché de l'uranium. Elle a incité plusieurs investisseurs, fonds, négociants et producteurs d'uranium à acheter de l' U_3O_8 sur le marché en prévision de l'évolution de l'offre et de la demande de cette ressource. Par exemple, Kazatomprom a annoncé en octobre 2021 son intention de participer à un fonds d'uranium physique, ANU Energy, qui détiendra de l'uranium physique comme placement sur le long terme. De tels achats de U_3O_8 à l'échelle mondiale par divers acteurs des services d'utilité publique hors secteur nucléaire sont inédits sur les marchés de l'uranium. En raison de la diminution des stocks et de l'accélération des échanges de U_3O_8 en 2021, le prix au comptant à la fin du mois d'octobre 2021 avait augmenté de 74 % par rapport au premier trimestre de la même année, pour atteindre environ 101,40 \$/kg de U_3O_8 .

54. La production de combustible nucléaire est une technologie éprouvée, qui s'est continuellement améliorée au fil des ans grâce à l'automatisation et à la numérisation, à la réduction de la production de déchets issus de l'exploitation, à l'amélioration de la radioprotection des travailleurs, ainsi qu'à la diminution du nombre des défaillances du combustible dans les réacteurs. Les capacités actuelles de fabrication de combustible nucléaire dans le monde suffisent pour satisfaire la demande anticipée

² Un autre grand producteur d'uranium, Kazatomprom, au Kazakhstan, a annoncé une réduction de 20 % de la production dans ses mines de récupération in situ du minerai en raison de la persistance de cette baisse de production en 2021.

d'énergie d'origine nucléaire, et des progrès notables attestent de la sûreté du comportement de nouveaux combustibles de technologie avancée destinés à être irradiés dans les réacteurs nucléaires de puissance des générations actuelle et futures, y compris les RFMP (p. ex. le modèle GAIA de Framatome comprenant du combustible PROtect plus résistant aux accidents, ainsi que les modèles de combustible résistant aux accidents de Global Nuclear Fuel et de Westinghouse qui consistent en des pastilles d'UO₂ dopées avec des gaines en zircaloy, le modèle TVS-2M de TVEL doté d'une gaine en zirconium avec revêtement en chrome et alliage Cr-Ni, le combustible REMIX de Rosatom conçu pour le recyclage multiple de l'uranium et du plutonium dans des réacteurs à eau ordinaire (REO), et le combustible ANEEL (Advanced Nuclear Energy for Enriched Life) de Clean Core, qui fait appel à une combinaison de thorium et d'uranium faiblement enrichi de haute densité (HALEU) pour avoir de bien meilleures performances dans les réacteurs CANDU.

55. Le Laboratoire nucléaire national (NNL) du Royaume-Uni a évalué plusieurs modèles de combustibles de technologie avancée du point de vue de leur maturité, de leurs coûts et de leur sûreté.

Tendances

56. Les coûts de prospection de l'uranium diminuent régulièrement depuis 2012 en raison de la faiblesse persistante des prix de l'uranium, que la pandémie de COVID-19 a accentuée à partir du début de l'année de 2020. Les récentes augmentations du prix de l'uranium sur le marché ont conduit certains à investir, et l'on a constaté une reprise des activités de prospection et d'exploitation en 2021, ainsi que le redémarrage de certaines activités de production primaire.

57. La forte augmentation du prix au comptant de l'uranium en 2021 a incité certains exploitants³ qui avaient des mines et des installations de traitement de l'uranium en régime d'entretien et de maintenance à étudier des plans de redémarrage. Une nouvelle diminution des stocks mondiaux de U₃O₈ et une augmentation continue du prix au comptant de l'uranium pourraient en inciter d'autres dans la même situation à redémarrer leurs activités et conduire au lancement de nouveaux projets d'uranium à des fins commerciales ou d'assurance de la sécurité de l'approvisionnement au niveau national⁴.

58. Il faut innover pour inciter à la production dans des gisements d'uranium marginaux. On peut citer à titre d'exemple fourni par le secteur de l'extraction de l'uranium en 2021 les résultats positifs d'études de faisabilité de l'exploitation d'une mine de récupération in situ dans un gisement à haute teneur associé à des discordances. Les méthodes de biolixiviation constituent une autre innovation importante qui se prête à une application pour la récupération in situ d'uranium dans des gisements de type gréseux.

59. Depuis 2011, les travaux menés à l'échelle internationale se concentrent sur l'amélioration de la sûreté et de la performance des combustibles employés dans les REO existants. D'autres facteurs contribuent à la mise au point de combustibles nucléaires, notamment l'émergence de modèles de réacteurs innovants, comme les réacteurs de génération IV et les RFMP (associés aussi bien à des modèles réduits de combustibles pour REO qu'à des modèles de combustibles de génération IV entièrement nouveaux), dont certains en sont au stade de la démonstration (comme le réacteur à haute température HTR-PM en Chine), ainsi que l'amélioration des coûts et de la viabilité de l'énergie d'origine nucléaire (allongement des cycles d'irradiation du combustible, taux de combustion plus élevés, campagnes zéro défaut, méthodes innovantes de fabrication de combustible, nouveaux cycles du combustible et recyclage multiple de matières nucléaires à partir de combustible nucléaire usé). La

³ Par exemple, l'exploitant de la mine d'uranium de Langer Heinrich en Namibie a annoncé en octobre qu'il travaillait sur les éléments des phases critiques à suivre pour le redémarrage de cette mine et installation de traitement d'uranium actuellement inactive.

⁴ On peut citer à titre d'exemple le projet de la société Badrakh Energy en Mongolie, dont on a appris en juillet qu'elle avait entrepris des essais pilotes dans le gisement de Zuuvch Ovoo. En outre, en juillet, la Société jordanienne d'extraction d'uranium a annoncé que son usine de démonstration, capable de traiter 70 tonnes de minerai par an, était pleinement en service. Les résultats de ces essais permettront d'évaluer la faisabilité technique, environnementale et économique des gisements en question et de déterminer s'ils peuvent passer à une production à grande échelle.

fabrication de nombreux modèles de combustibles nucléaires innovants, comme ceux de technologie avancée ou ceux des RFMP, requiert des combustibles à base d'HALEU.

B.2. Partie terminale

Situation

60. Les stocks de combustible nucléaire usé s'accumulent dans le monde au rythme d'environ 7 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, leur volume total avoisinant les 300 000 t ML. Pour les pays dotés de programmes nucléaires établis de longue date qui suivent des stratégies de cycle ouvert, les principales difficultés à surmonter résident dans la nécessité d'augmenter les capacités d'entreposage du combustible nucléaire usé et dans l'allongement de la durée d'entreposage (au-delà de 100 ans).

61. Le combustible nucléaire usé passe de l'entreposage en piscine à l'entreposage à sec après un temps de refroidissement initial. Comme il est de plus en plus courant de raccourcir ce dernier, il faut renforcer les capacités d'évacuation de la chaleur des systèmes d'entreposage à sec⁵. De nouvelles installations d'entreposage centralisées ont été autorisées en Ukraine et aux États-Unis d'Amérique. Le combustible nucléaire usé est acheminé dans certains pays et des mesures visant à en améliorer le transport sont régulièrement mises en œuvre. Les États Membres poursuivent les opérations d'enlèvement et de relocalisation de leur combustible nucléaire usé dans le cadre des projets de déclassement de leurs centrales nucléaires. Des chercheurs de la République tchèque ont mis au point et breveté une technologie innovante appelée Teplator, qui permet de chauffer de l'eau à partir de la chaleur de décroissance radioactive produite par le combustible usé⁶.

62. Plusieurs opérations de recyclage sont envisagées : en France, il s'agit d'une activité industrielle arrivée à maturité ; au Japon, la Fédération des producteurs d'électricité (FEPC) prévoit d'utiliser du combustible MOX dans au moins 12 tranches d'ici à 2030⁷ ; en Fédération de Russie, une installation de démonstration expérimentale au Combinat minier et chimique de Krasnoïarsk, qui servira à tester des nouvelles technologies de retraitement du combustible nucléaire usé en vue de leur déploiement à grande échelle, est bientôt terminée⁸ ; aux États-Unis, Oklo et le Laboratoire national d'Argonne se sont associés pour mener des travaux de recherche-développement sur la technologie d'électroraffinage aux fins du recyclage du combustible pour utilisation dans les centrales à fission avancées⁹.

63. Dans plusieurs pays (comme la Chine, la Fédération de Russie, la France, le Japon et la République de Corée), des projets de R-D continuent d'être menés concernant la séparation sélective des actinides

⁵ En mai, les derniers assemblages de combustible usé de la centrale nucléaire d'Oyster Creek ont été entreposés à sec 32 mois après la mise à l'arrêt définitive du réacteur — un taux de déchargement sans précédent. La campagne de chargement des châteaux d'entreposage s'est déroulée en toute sûreté en 21 semaines.

⁶ En avril, des chercheurs de l'Université technique tchèque de Prague et de l'Université de Bohême de l'Ouest à Pilsen ont présenté une solution innovante brevetée qui utilise la chaleur de décroissance radioactive produite par les barres de combustible usé pour chauffer de l'eau.

⁷ En février, la FEPC a révisé le plan d'utilisation du plutonium, sur la base du dernier plan opérationnel de l'usine de retraitement de Rokkasho et de l'usine de fabrication de combustible MOX et des changements survenus dans le secteur commercial durant l'année écoulée.

⁸ En outre, en Fédération de Russie, des travaux sont en cours pour construire l'infrastructure nécessaire à la démonstration du cycle fermé du combustible nucléaire avec des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 2017, la production industrielle de combustible MOX pour le réacteur à neutrons rapides BN-800 est en cours en Fédération de Russie, le combustible nucléaire pour les réacteurs RBMK et VVER est fabriqué à l'aide d'uranium régénéré.

⁹ En juin, le Laboratoire national d'Argonne a reçu des fonds du Ministère de l'énergie des États-Unis pour entreprendre des travaux de recherche-développement sur la technologie d'électroraffinage aux fins du recyclage du combustible pour utilisation dans des centrales à fission avancées. Ce financement a été égalé par Oklo.

mineurs en vue de leur transmutation dans des réacteurs à neutrons rapides et/ou des systèmes sous-critiques afin de réduire au minimum la charge des déchets nucléaires de haute activité.

64. Le NNL du Royaume-Uni a publié sa feuille de route dans laquelle il explique en quoi les évolutions du cycle du combustible avancé vont contribuer à soutenir le nucléaire dans un avenir sobre en carbone.

Tendances

65. La connaissance du comportement des éléments combustibles nucléaires usés dans les différents systèmes d'entreposage et des mécanismes de vieillissement et de dégradation des structures, systèmes et composants des lieux d'entreposage reste essentielle pour continuer à assurer l'entreposage de ces éléments en toute sûreté, puis leur transport vers des installations de stockage définitif ou de retraitement. L'Agence coordonne des activités de recherche sur cette question pour recueillir auprès des États Membres les données sur leur expérience d'exploitation et favoriser l'échange d'informations.

66. Les gains d'efficacité obtenus dans la gestion des réacteurs nucléaires ont permis, au fil du temps, de réduire la quantité de combustible nucléaire usé retiré des réacteurs nucléaires, mais la tendance à accroître les taux d'enrichissement initiaux et les taux de combustion se traduit par une augmentation de la chaleur résiduelle et des risques de fragilisation des gaines, ce qui peut avoir des retombées sur les mesures de gestion du combustible nucléaire usé.

67. Il faudra mener des recherches pour gérer les combustibles nucléaires usés de conception nouvelle (par exemple, les combustibles évolutifs de technologie avancée et ceux à base d'HALEU) dotés de taux d'enrichissements en uranium 235 plus élevés (jusqu'à 20 %) et de nouveaux matériaux de gainage, en tenant plus particulièrement compte des charges thermiques plus élevées et du comportement potentiellement différent de ces combustibles sur le long terme. Des installations d'entreposage centralisées pourraient être une solution à retenir dans un avenir proche pour accueillir le combustible usé provenant de réacteurs de puissance à l'arrêt, afin de pouvoir mener à terme toutes les opérations de déclasserment et de remédiation des sites.

68. Des procédés avancés de multi-recyclage du plutonium (REMIX en Russie, CORAIL et MIX en France) dans des REO sont actuellement soumis à des essais de démonstration en vue de l'adoption à l'avenir de stratégies de multi-recyclage du plutonium dans des réacteurs à neutrons rapides.

69. La mise au point de différents modèles de RFMP destinés à être construits au cours des dix prochaines années environ, pour lesquels il faudra concevoir un cycle du combustible sûr, sécurisé et durable, suscite un intérêt croissant.

70. Ces travaux vont dans le sens des efforts inlassablement déployés en vue de la mise en place de réacteurs avancés qui nécessiteront de tels cycles, tout aussi évolués.

C. Déclasserment, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs

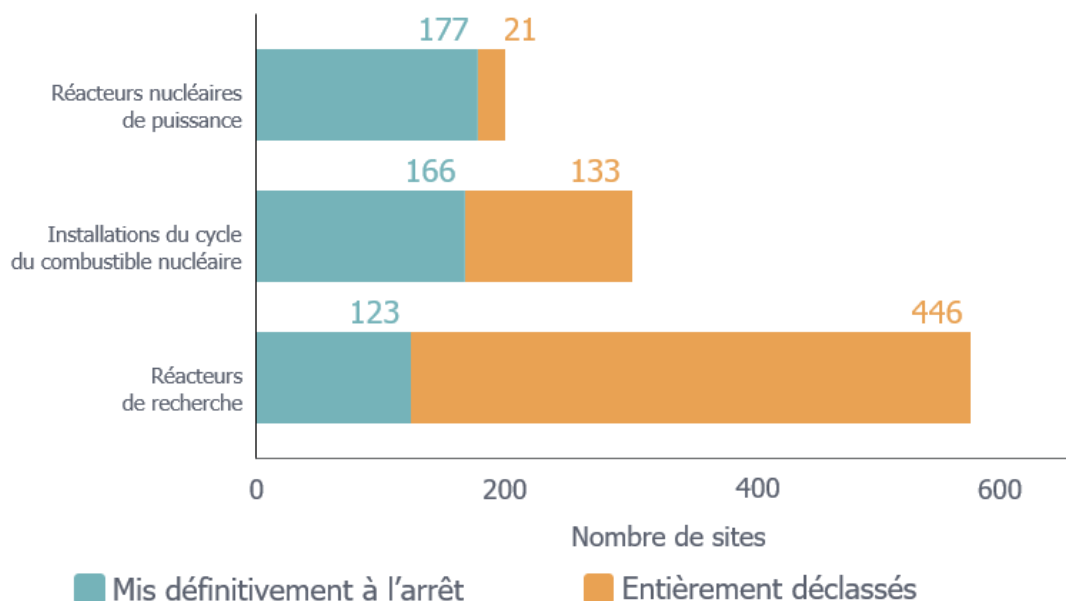
C.1. Déclasserment

Situation

71. Cinq réacteurs nucléaires (Dungeness B1 et B2 au Royaume-Uni, Indian Point-3 aux États-Unis, KANUPP-1 au Pakistan et Kuosheng-1 à Taïwan (Chine) ont été mis définitivement à l'arrêt en 2021. Ce chiffre correspond globalement au nombre de mises à l'arrêt définitives enregistrées ces dix dernières

années, au cours desquelles 57 réacteurs ont été retirés du service (dont 18 au Japon et 12 aux États-Unis). La fermeture des tranches B1 et B2 de la centrale de Dungeness constitue la première mise à l'arrêt définitive d'un réacteur avancé refroidi par gaz au Royaume-Uni ; le reste du parc devrait connaître le même sort d'ici la fin de la décennie. Le réacteur KANUPP-1 de type CANDU est le premier réacteur du Pakistan à être mis définitivement à l'arrêt.

État des réacteurs nucléaires de puissance, des installations du cycle du combustible et des réacteurs de recherche



72. En novembre 2021, la licence d'exploitation de la troisième tranche de la centrale nucléaire implantée à Humbolt Bay en Californie (États-Unis) est venue à expiration, et le site a été libéré aux fins d'une utilisation inconditionnelle. Cela porte à 21 le nombre de réacteurs nucléaires de puissance déclassés ; 177 autres, soit environ 28 % du parc mondial de réacteurs¹⁰, sont définitivement à l'arrêt ou en cours de déclassement. À cela s'ajoutent 166 installations du cycle du combustible nucléaire définitivement à l'arrêt ou en cours de déclassement, et 133 entièrement déclassées. En outre, 123 réacteurs de recherche sont définitivement à l'arrêt ou en cours de déclassement, et 446 ont été entièrement déclassés. Les principaux programmes de déclassement de réacteurs de puissance concernent actuellement l'Allemagne, où 27 d'entre eux sont mis définitivement à l'arrêt ou sont en cours de déclassement, le Japon, où 26 réacteurs sont dans le même cas, et les États-Unis, avec 25 réacteurs visés par de telles mesures.

73. La situation sur les sites de réacteurs nucléaires ayant enregistré des accidents majeurs progresse. C'est notamment le cas à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, au Japon, touchée par un accident consécutif au grand séisme de l'est du Japon survenu en 2011 (figure C.1). Les travaux entrepris pour retirer le combustible usé des piscines affectées à leur entreposage dans les tranches 1 à 4 de la centrale se poursuivent dans les délais prévus et se concentrent à présent sur les tranches 1 et 2 (les interventions sur les tranches 3 et 4 étant déjà terminées). Une étape importante a par ailleurs été franchie dans la tranche 4 endommagée de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, où un permis d'exploitation a été délivré en août 2021 pour la nouvelle enveloppe de confinement sûr (figure C.2). Le déclassement

¹⁰ Le parc mondial de réacteurs comprend 442 réacteurs (69 %) en exploitation, 177 (28 %) mis définitivement à l'arrêt et 21 (3 %) entièrement déclassés.

de la tranche 2 de la centrale de Three Mile Island aux États-Unis a été confié à un consortium spécialisé en décembre 2020 ; les opérations de déclasserment de l'installation endommagée ont démarré et devraient s'achever d'ici 2037.



FIG. C-1. Gestion du combustible usé à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

74. S'agissant des activités de déclasserment menées dans des installations du cycle du combustible, l'une des phases déterminantes qui doit précéder le démantèlement est en général celle qui consiste à enlever les déchets hérités du passé, qui sont le plus souvent entreposés dans des piscines ou des tranchées en béton. Cet aspect du déclasserment continue de bénéficier d'avancées non négligeables dans plusieurs installations d'une importance majeure : enlèvement des boues présentes dans d'anciennes piscines d'entreposage de combustible à la centrale de Sellafield (Royaume-Uni), enlèvement d'anciens déchets de graphite et de magnésium entreposés dans des silos en béton à la centrale de La Hague (France), démolition des bâtiments et enlèvement des dalles de béton formant la base de l'usine de diffusion gazeuse d'Oak Ridge (États-Unis), et démolition de plusieurs bâtiments contaminés par des matières radioactives précédemment occupés par l'usine radiochimique du complexe nucléaire Maïak (Fédération de Russie).

75. Les réacteurs de recherche en cours de déclasserment se trouvent principalement en Allemagne, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France, au Japon et au Royaume-Uni. Plusieurs projets de déclasserment de réacteurs de ce type sont en cours en Scandinavie. Une étape importante a été franchie en 2021 en Finlande sur le site du réacteur FiR-1, à savoir l'expédition aux États-Unis de son combustible. Autre exemple de progrès intervenu sur ce terrain : en mars 2021, l'Institut de recherche-développement de l'Agence japonaise de l'énergie atomique situé à Ōarai (préfecture d'Ibaraki) a approuvé le plan de déclasserment du réacteur d'essais de matériaux. Le programme de démantèlement a été divisé en quatre étapes, et la première de ces étapes a commencé.



FIG. C-2. Lors d'une cérémonie de commémoration du 35^e anniversaire de l'accident nucléaire de Tchernobyl, le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, rend hommage aux victimes devant la nouvelle enveloppe de confinement sûr.

Tendances

76. Bon nombre de conditions qui ont conduit à fermer des installations nucléaires au cours des dix années écoulées — facteurs politiques et économiques, coûts de maintenance et/ou de rénovation, évolution du marché de l'électricité — sont appelées à perdurer et le rythme des mises à l'arrêt pourrait même s'accélérer en raison de l'âge des parcs actuels de centrales, partiellement compensé par une prolongation de leur durée de vie. La grande majorité des quelque 300 réacteurs nucléaires de puissance qui ont aujourd'hui 30 ans ou plus pourraient être mis hors service au cours des trois prochaines décennies. Une évolution similaire est prévue pour les réacteurs de recherche, dont le parc est assez semblable en termes d'ancienneté.

77. L'idée prévaut de plus en plus qu'il est préférable de démanteler rapidement les installations une fois que celles-ci ont été définitivement mises à l'arrêt. Bien souvent, le choix d'une stratégie de démantèlement immédiat est dicté par la politique des pouvoirs publics ; la France et l'Allemagne suivent ainsi une ligne allant clairement dans ce sens. Les aléas quant au coût des projets qui se situent dans un avenir lointain constituent eux aussi un facteur auquel les propriétaires d'installations sont très sensibles : beaucoup préfèrent éviter d'avoir à assumer des obligations à long terme dans un climat de forte incertitude. Il semble qu'il s'agisse là d'un argument de poids qui alimente la tendance actuellement observée aux États-Unis consistant à délaissier les stratégies qui privilégient un démantèlement différé.

78. Le démantèlement différé était auparavant la solution prônée en priorité pour les réacteurs modérés au graphite, d'une part parce qu'aucun mode de gestion à long terme du graphite irradié n'avait recueilli un consensus général, et d'autre part parce que, dans la mesure où la plupart des réacteurs précités étaient de taille nettement plus grande que ceux modérés par eau, les opérations à prévoir pour les démanteler étaient considérablement plus complexes. Cela étant, même pour ces réacteurs, la tendance actuelle penche apparemment en faveur d'un démantèlement immédiat. Au Royaume-Uni par exemple, l'Autorité du déclasserement nucléaire a décidé d'adopter une stratégie de déclasserement propre à chacun de ses sites de réacteurs Magnox, le démantèlement des tranches Dungeness A et Trawsfynydd avançant

à grands pas sur la base des principes « diriger et apprendre ». En Lituanie, la centrale nucléaire d'Ignalina procède elle aussi au démantèlement immédiat de ses installations, et notamment à l'établissement d'une installation d'entreposage du graphite irradié, dans l'attente de l'aménagement d'une installation de stockage géologique, pour le long terme.

C.2. Remédiation de l'environnement

Situation

79. La remédiation de l'environnement consiste en un ensemble de solutions destinées à faire face à la contamination de terres (sols et eaux souterraines) consécutive à des pratiques antérieures de gestion inappropriées. Au nombre de ces sites hérités du passé peuvent figurer des sites nucléaires (occupés parfois par des installations redondantes du cycle du combustible et de recherche), d'anciens sites d'essais nucléaires, des sites voués auparavant à l'extraction et au traitement du minerai d'uranium et autres activités impliquant l'utilisation de matières radioactives naturelles, ou encore des sites qui ont été le théâtre d'accidents nucléaires ou radiologiques majeurs. Le secteur nucléaire a laissé son empreinte dans 31 pays — sans compter les sites d'extraction et de traitement de l'uranium.

80. Dans la plupart de ces pays, cette empreinte est relativement ténue, mais il en est où les filières nucléaires sont implantées de longue date tant dans le domaine civil comme dans le domaine militaire, et où les activités nucléaires, notamment la production d'électricité, le retraitement et les expérimentations s'entremêlent pour laisser derrière elles des installations redondantes, des déchets nucléaires et des sites désaffectés. Pour autant, les activités nucléaires ne sont responsables, sur le continent européen, que de 0,1 % des terres contaminées. À l'échelle mondiale, la nécessité de se pencher sur le problème que posent les sites touchés par des matières radioactives naturelles est mieux comprise.

81. Aux États-Unis, l'année 2020 a été marquée par la mise en service de l'installation de traitement des déchets salins sur le site de Savannah River et par la fin des travaux de décontamination et de déclassement du parc technologique d'Oak Ridge dans l'est de l'État du Tennessee. En 2022, le Bureau de la gestion de l'environnement du Département de l'énergie devrait dépolluer les eaux souterraines contaminées par le chrome sur le site du Laboratoire national de Los Alamos et achever les opérations de désenfouissement ciblé de déchets sur le site du Laboratoire national de l'Idaho.

82. Au Japon, les activités de décontamination engagées à la suite de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi se poursuivent à un rythme soutenu. Les travaux de décontamination qui devaient être réalisés sur toute la zone spéciale ont été menés à bien. Ceux entrepris par les municipalités dans la zone d'étude intensive de la contamination sont elles aussi terminés. Exception faite de la zone d'accès restreint, toutes les superficies visées par la loi sur les mesures spéciales à prendre face à une pollution radioactive ont ainsi été décontaminées. Les débits de dose dans l'air mesurés dans l'environnement ne cessent de baisser. Fin avril 2021, environ 10 730 000 mètres cubes de sols et déchets retirés du site ont été transportés à l'installation d'entreposage provisoire. La quasi-totalité des sols retirés devrait y être déposée avant la fin mars 2022.

Tendances

83. Dans certains pays, la remédiation stagne, faute de moyens. Son financement représente donc un enjeu majeur. Sous la houlette de l'Union européenne, la communauté internationale a créé un Fonds pour la remédiation environnementale en Asie centrale. Il convient de réunir les fonds manquants pour financer les travaux qui doivent être rapidement réalisés sur les anciens sites d'extraction d'uranium de la région. En septembre 2021, le déficit de financement était estimé à 40 millions d'euros. Les fonds publics risquent cependant de ne pas suffire, à eux seuls, pour prendre en charge toutes les opérations de remédiation qui sont nécessaires. Aussi faut-il impérativement mettre en place de nouveaux mécanismes de financement, en privilégiant les initiatives susceptibles de mobiliser des capitaux privés.

84. Si la tendance actuelle est aux mécanismes décisionnels inclusifs, il convient cependant de clarifier les rôles et les responsabilités des acteurs et de renforcer leur coordination, d'engager le dialogue avec les parties prenantes locales pour mieux s'entendre sur la notion de communauté/territoire affecté, et d'anticiper les protocoles de gestion auxquels ils donneront lieu. La science citoyenne, c'est-à-dire la participation et la collaboration du public à la recherche scientifique dans le but de développer les connaissances scientifiques, permet notamment à chacun de surveiller son environnement et son habitat, et d'influer sur les relations que la population entretient avec les pouvoirs publics et les principales institutions. Les organisations nationales et internationales doivent se préparer à intervenir dans le processus participatif d'élaboration des politiques et de prise de décisions

C.3. Gestion des déchets radioactifs

Situation

85. En 2021, le Gouvernement australien a annoncé qu'il envisageait d'implanter l'installation nationale d'entreposage de déchets nucléaires à Napandee, en Australie méridionale. Le site servira à stocker définitivement les déchets de faible activité et pourra héberger temporairement des déchets de moyenne activité. De même, l'Italie est à la recherche de sites susceptibles de constituer un dépôt où pourraient être stockés définitivement 78 000 mètres cubes de déchets de très faible et de faible activité et entreposés provisoirement sur une longue durée quelque 17 000 mètres cubes de déchets de moyenne et de haute activité. Le dépôt sera une installation de stockage en surface ou à faible profondeur assortie d'un parc technologique pour la mise en œuvre d'activités de recherche dans le domaine nucléaire.

86. Grâce à d'importants progrès réalisés en 2021, certains États Membres sont en passe d'achever les opérations de stockage définitif de leurs déchets de faible activité. En Slovaquie, la mise en place d'une couverture définitive par-dessus les déchets de très faible activité stockés sur le site de Mochovce a été approuvée. Au Royaume-Uni, il a été procédé cette année à des travaux préparatoires qui devraient permettre de recouvrir les déchets dans la casemate 8 ainsi qu'une partie des tranchées du dépôt accueillant les déchets de faible activité. L'idée d'utiliser le site pour y implanter une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur est par ailleurs à l'étude et l'analyse du socle rocheux est en cours (figure C.3).



*FIG. C-3. Travaux préparatoires de mise en place d'une couverture définitive sur une partie du dépôt de déchets de faible activité (Royaume-Uni).
(Photo : Autorité du déclassé nucléaire du Royaume-Uni, 2021)*

87. Des progrès considérables ont aussi été réalisés dans la mise en œuvre des programmes de dépôt géologique profond pour le stockage définitif des déchets de haute activité. Par exemple, l'organisme finlandais de gestion des déchets Posiva a déposé une demande de licence d'exploitation en décembre 2021, et la première installation de stockage du combustible usé sur le site d'Onkalo est prévue pour mi-2023. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires attend la décision du Gouvernement pour lancer les études appelées à confirmer les travaux de construction en sous-sol sur le site dont elle a proposé de faire le dépôt géologique profond suédois. L'Agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs devrait soumettre en 2022 sa demande de permis de bâtir relative à l'implantation d'une installation de stockage définitif de déchets de haute et moyenne activité en formation géologique profonde. La Société coopérative nationale suisse pour le stockage des déchets radioactifs et la Société canadienne de gestion des déchets nucléaires ont, elles aussi, entrepris des démarches en vue de la sélection de sites qui pourraient accueillir un dépôt géologique profond pour le combustible usé.

88. Les avancées réalisées dans ces États Membres sont le fruit de plusieurs décennies de travaux de R-D, principalement menés dans des installations souterraines expérimentales. Trois installations de ce type sont actuellement en service. La Chine a commencé à construire le laboratoire de recherche souterrain de Beishan en juin 2021 et a ouvert à la coopération internationale le futur programme de recherche, développement et démonstration sur les installations souterraines expérimentales ; ce laboratoire deviendra ainsi un centre collaborateur de l'Agence dans le domaine du stockage géologique.

89. Des progrès considérables ont été accomplis en 2021 en matière de gestion des sources radioactives scellées retirées du service, en particulier pour ce qui concerne leur retrait et leur conditionnement. En Jordanie, d'anciennes sources radioactives retirées du service provenant d'un puits d'entreposage souterrain ont été récupérées et reconditionnées (figure C.4).



FIG. C-4. Retrait et reconditionnement de sources radioactives dans de nouveaux colis sur un ancien site d'entreposage de déchets en Jordanie. (Photos : Commission jordanienne de l'énergie atomique)

Tendances

90. Un nombre non négligeable d'États Membres ont entrepris ou relancé l'élaboration d'une politique et de stratégies nationales de gestion des déchets radioactifs ces dernières années, et d'importantes avancées ont été obtenues sur ce terrain en 2021. Tout au long de l'année, les autorités canadiennes ont eu des échanges avec les citoyens, notamment les populations autochtones, avec les parties prenantes et avec les experts concernant la révision et la modernisation de leur politique en matière de déchets radioactifs. Au Royaume-Uni, l'entreprise qui accueille le dépôt de déchets de faible activité est devenue, en juillet 2021, une filiale directe de l'Autorité du déclassement nucléaire, conformément à la nouvelle stratégie nationale de cette dernière relative au traitement des déchets de déclassement existants ou prévus.

91. Le besoin d'accroître la capacité d'entreposage et de stockage définitif des déchets radioactifs, tous types confondus, se fait de plus en plus sentir et il s'agit là d'une tendance qui risque fort de s'intensifier compte tenu du nombre croissant de centrales nucléaires qu'il est envisagé de déclasser dans

les dix prochaines années, tant et si bien que le nombre de demandes de permis et des nouveaux chantiers de construction a augmenté. La Commission de la sûreté et de la sécurité nucléaires de la République de Corée a ainsi approuvé en 2020 les travaux nécessaires à l'accroissement de la capacité d'entreposage provisoire de combustible usé à la centrale nucléaire de Wolsong, l'installation existante étant bientôt pleine.

92. Durant les dernières décennies, une attention de plus en plus grande a été accordée au dialogue constant et mesuré avec le public. Face à la pandémie de COVID-19, les États Membres n'ont pas ménagé leurs efforts pour impliquer les parties prenantes et ont réussi, en recourant aux moyens de communication virtuels, à mieux les sensibiliser (le séminaire national consacré au processus de sélection du site du dépôt national en Italie a ainsi été diffusé en ligne).

93. Bien que la gestion des sources radioactives scellées retirées du service se soit améliorée dans de nombreux pays, leur stockage définitif demeure problématique, en particulier dans les États dotés de programmes nucléaires plus modestes. La Malaisie prévoit de procéder en 2022 au premier stockage en puits de sources radioactives scellées retirées du service. On constate par ailleurs que de plus en plus de sources de haute activité retirées du service sont réexpédiées aux fournisseurs en vue de leur recyclage et de leur stockage définitif. Une bonne douzaine d'États Membres devrait procéder à l'enlèvement de plus de 50 sources de haute activité en 2022.

94. La collaboration internationale continue de s'intensifier dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, en particulier pour ce qui concerne les programmes de stockage définitif en formations géologiques profondes. La Plateforme technologique sur le stockage géologique des déchets radioactifs lancée en 2009 par l'Union européenne continue d'œuvrer activement à son rapport intitulé « Vision 2025 Report », qui expose son ambition de disposer en Europe, à l'horizon 2025, des premières installations assurant le stockage géologique en toute sécurité du combustible usé, des déchets de haute activité et autres déchets radioactifs à longue période. Dans le même temps, l'Association pour des solutions multinationales concernant les déchets radioactifs (ERDO) établie en 2021, anciennement connue comme l'Organisation européenne pour la mise en place de dépôts, poursuit ses travaux consacrés aux possibilités d'implantation d'un ou de plusieurs dépôts géologiques partagés en Europe.

D. Réacteurs de recherche et accélérateurs de particules

D.1. Réacteurs de recherche

Situation

95. A la fin de 2021, 235 réacteurs de recherche, y compris ceux mis temporairement à l'arrêt, étaient en service dans 53 pays. Ils ont continué à émettre des faisceaux de neutrons et à proposer des services d'irradiation indispensables dans les domaines de la science, de la médecine et de l'industrie, et à contribuer à la formation théorique et pratique. Leurs applications les plus courantes sont présentées dans le tableau D-1 en annexe.



11

nouveaux réacteurs de recherche
sont en construction dans
10 pays



14

États Membres ont formellement
établi des plans de construction de
nouveaux réacteurs de recherche



16

pays envisagent de
construire des réacteurs de recherche

96. Onze nouveaux réacteurs de recherche sont en construction dans dix pays : Arabie saoudite, Argentine, Bolivie (État plurinational de), Brésil, Chine, Fédération de Russie, France, République de Corée, République tchèque et Ukraine (figures D.1a, D.1b et D.1c). En 2021, il a été procédé à la première coulée de béton du premier réacteur de recherche dans l'État plurinational de Bolivie, et le réacteur PIK en Fédération de Russie est entré dans la phase finale des essais de mise en service. L'Afrique du Sud a établi les plans officiels de construction d'un nouveau réacteur de recherche — les États Membres actuellement dotés de tels plans sont l'Afrique du Sud, le Bangladesh, le Bélarus, la Belgique, la Chine, les États-Unis d'Amérique, l'Inde, le Nigeria, les Pays-Bas, les Philippines, le Tadjikistan, la Thaïlande, le Viet Nam et la Zambie. Un grand nombre de pays envisagent de construire des réacteurs de recherche, à savoir l'Azerbaïdjan, l'Éthiopie, le Ghana, l'Inde, l'Iraq, le Kenya, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Niger, les Philippines, la République-Unie de Tanzanie, le Rwanda, le Sénégal, le Soudan et la Tunisie.



FIG. D-1 a. Construction d'un réacteur de recherche RA-10 au Centre atomique Ezeiza en Argentine. (Photo : CNEA)

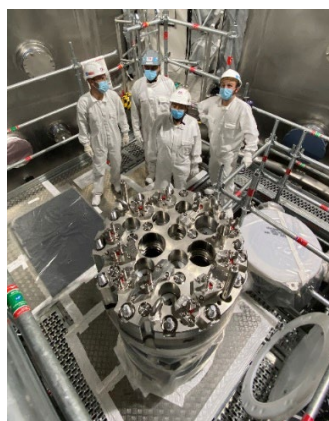


FIG. D-1 b. Pose du couvercle sur le réacteur Jules Horowitz de Cadarache (France). (Photo : CEA)

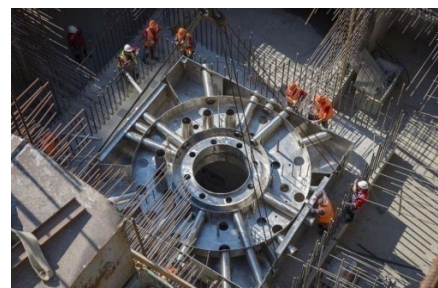


FIG. D-1 c. Installation du plancher de la cavité du réacteur MBIR, Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires, Dimitrovgrad, Fédération de Russie. (Photo : Rosatom)

97. Les initiatives internationales visant à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur civil se sont poursuivies. À ce jour, 6 826 kilogrammes d'UHE ont été renvoyés vers leur pays d'origine ou évacués d'une autre façon de 48 pays (et de Taïwan, Chine). En outre, 107 réacteurs de recherche et grandes installations de production d'isotopes médicaux qui fonctionnaient à l'UHE ont été transformés pour pouvoir utiliser de l'uranium faiblement enrichi (UFE) ou leur mise à l'arrêt a été confirmée. D'importants travaux de R-D sont menés en vue de la mise au point de nouveaux combustibles à l'UFE de haute densité destinés à des réacteurs de recherche à haute performance. L'Institut des radioéléments de Belgique est en bonne voie d'achever sa totale conversion à l'UFE qui doit lui permettre de produire du molybdène 99 en 2022, date à laquelle tous les producteurs mondiaux de cet isotope médical très demandé emploieront des méthodes de production sans UHE. L'Administration nationale de la sécurité nucléaire du Ministère de l'énergie des États-Unis a octroyé par appels d'offres trois nouveaux accords de coopération à coûts partagés à des entreprises privées pour la production commerciale de molybdène 99 sans UHE d'ici à la fin de 2023.

Tendances

98. La part des réacteurs de recherche fonctionnant depuis au moins 50 ans avoisine les 50 %. Pour pouvoir continuer à les exploiter de manière sûre et fiable et d'en valoriser l'utilisation, de nombreuses installations ont mis sur pied des stratégies proactives et des activités systématiques de gestion du vieillissement, de rénovation et de modernisation, ou s'approprient à le faire. Certains organismes exploitant des réacteurs de recherche très sollicités se préparent à prolonger leur durée de vie utile jusqu'à 80, voire 100 ans, ou envisagent de le faire (figure D.2). L'une des opérations les plus souvent mentionnées à cet égard est le remplacement des systèmes de contrôle-commande analogiques obsolètes par de nouveaux systèmes numériques.

99. De nombreux pays profitent des possibilités d'accès aux réacteurs de recherche que leur offre la collaboration internationale et régionale. En 2021, deux réacteurs-laboratoires par Internet avec accès en ligne avec des réacteurs hôtes en République tchèque et en République de Corée ont commencé à transmettre des expériences à des étudiants d'autres pays, et la plateforme européenne d'études expérimentales dans le domaine nucléaire, qui propose des formations pratiques dans de petits réacteurs de recherche à des universités et à de jeunes spécialistes du nucléaire du monde entier, est à présent opérationnelle.

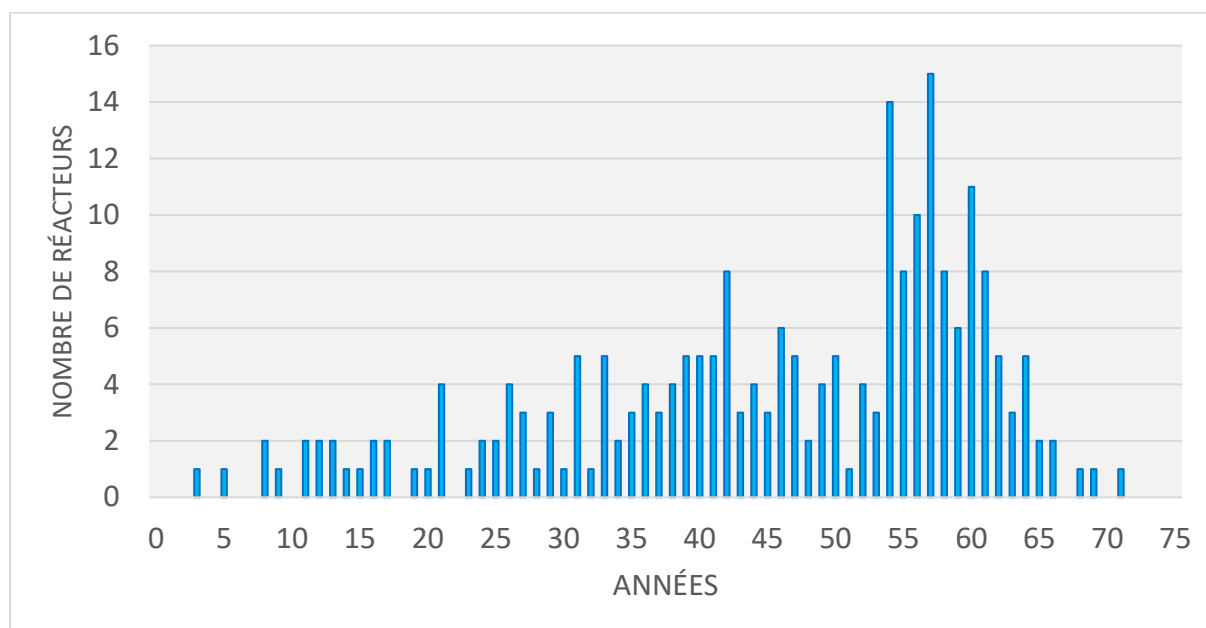


FIG. D-2. Répartition par âge des réacteurs de recherche en service, novembre 2021.
(Source : Base de données de l'AIEA sur les réacteurs de recherche)

100. La diffusion neutronique, à laquelle il est fait appel dans le monde entier pour résoudre un certain nombre de problèmes qui touchent à la santé et aux sciences de la vie, fournit des informations sur la fonction biologique, ainsi que sur les virus, les protéines et les maladies dégénératives, et facilite la mise au point de nouveaux médicaments et de nouvelles méthodes thérapeutiques. Elle contribue à la compréhension des processus liés à la production, à la pollution, à la purification et à la conservation des aliments et de l'eau. Elle joue un rôle important dans l'étude des nouvelles sources d'énergie visant à protéger l'environnement et à lutter contre le changement climatique, comme le stockage de l'hydrogène, les piles à combustible, les cellules solaires et les nouveaux types de batteries. Elle intervient dans de nombreuses autres applications de R-D, industrielles et techniques. Alors que des travaux très avancés de R-D menés avec des instruments de diffusion neutronique dernier cri se déroulent en général dans des sources de neutrons à haut flux ultraperformantes, des progrès technologiques intervenus récemment dans des sources compactes de neutrons alimentées par accélérateur, notamment en lien avec l'incorporation de postes avancés d'échantillonnage in situ, laissent entrevoir de nouvelles possibilités de diffusion neutronique dans les réacteurs de recherche à flux moyen et les sources de neutrons alimentées par accélérateur.

D.2. Accélérateurs de particules et instrumentation

Situation

101. Les réacteurs de recherche sont depuis longtemps les sources de neutrons les plus puissantes disponibles pour les recherches qui s'appuient sur des faisceaux de neutrons. Cependant, du fait des limites inhérentes à ceux qui fonctionnent en régime stable, conjuguées à une moindre utilisation de l'UHE à des fins civiles, ils n'ont connu aucune amélioration significative de la performance de leur flux de neutrons. Ils commencent à céder la place à des sources de neutrons alimentées par accélérateur, qui ont fait l'objet de progrès constants enregistrés dans de nombreux domaines technologiques.

102. La source de spallation européenne (ESS), en cours de construction près de Lund (Suède), que subventionnent 13 États Membres participants, devrait entrer en service en 2023. Son flux intégré dans le temps en fera la source de neutrons la plus brillante au monde, détrônant ainsi le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble (France) qui l'a été pendant près d'un demi-siècle. Sa cible de spallation qui produit des neutrons est une roue de tungstène en mouvement refroidie à l'hélium que percute un faisceau de protons pulsé de 2 GeV émis par un accélérateur linéaire de protons de 5 MW (en moyenne).

Tendances

103. La spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) s'est révélée être non seulement une technique ultra-sensible pour le comptage de divers atomes, mais aussi une méthode qui, du fait de son association avec un accélérateur, ouvre de grandes perspectives pour des applications analytiques en rapport avec les problèmes de la société moderne. Elle est actuellement employée en archéologie, dans des applications biomédicales, dans les études sur le changement climatique, en hydrologie, en océanographie et dans de nombreux autres domaines qui suscitent de plus en plus des préoccupations sociétales et économiques. Elle peut aussi être un outil très puissant pour des applications intéressant la réglementation nucléaire, en particulier dans les installations de déchets radioactifs. Comme cela a été démontré au cours des cinq dernières années, elle a permis de trouver des solutions à des problèmes majeurs liés au démantèlement et à la sûreté à long terme des installations nucléaires, tels que la caractérisation des sites et des déchets et le contrôle radiologique de l'environnement des installations de déchets radioactifs. Les radionucléides intéressants pour la caractérisation de sites que la SMA est capable de quantifier sont notamment le carbone 14, l'iode 129, le chlore 36, le technétium 99, le krypton 81, le béryllium 10 et l'aluminium 26, tandis que pour la caractérisation des déchets, les principaux radionucléides sont l'hydrogène 3, le carbone 14, le chlore 36, le césium 135, l'iode 129, le technétium 99, l'uranium 236, le zirconium 93 et le plutonium 240, 241 et 242. L'intérêt particulier que portent les organismes de réglementation à la caractérisation du béton utilisé dans les réacteurs

nucléaires a débouché sur le lancement de nouvelles études de faisabilité par SMA pour un certain nombre de nouveaux radioisotopes comme le calcium 41.

104. L'évolution technologique récente de la SMA a également permis d'élargir le champ de ses applications et notamment de l'étendre à l'étude d'un large éventail d'objets du patrimoine culturel et naturel ainsi qu'à la détection de faux et du commerce illicite de produits. Grâce, par exemple, à ses avancées à la pointe de la technologie, il est désormais possible de dater les couches de peinture, les pigments, les liants et les toiles d'œuvres d'art (figure D.3).

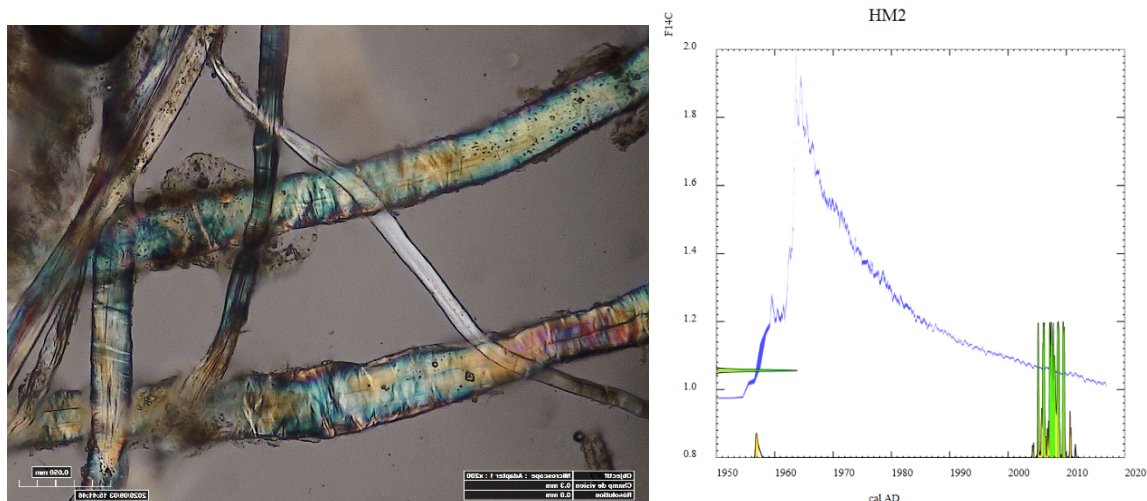


FIG. D-3. Analyse d'une peinture post-impressionniste. À gauche : fibres de tissu d'origine végétale recueillies dans la couche de peinture. À droite : les mesures effectuées par SMA pour en déterminer l'âge montrent que leur origine était postérieure à la mort de l'artiste présumé, ce qui prouve que la peinture est un faux. (Images : Laboratoire de mesure du carbone, Université Paris-Saclay, France)

105. La datation au carbone consiste à dater des objets qui en contiennent en mesurant la désintégration du carbone 14, isotope radioactif naturel présent dans tous les matériaux carbonés (tant organiques qu'inorganiques) dans le cadre du cycle mondial du carbone. La mesure du carbone 14, dont la période est de $5\,700 \pm 30$ ans, permet de déterminer l'âge d'un spécimen formé au cours des 55 000 dernières années.

106. À ce jour, le critère le plus probant pour la détection de contrefaçons est la preuve scientifique de la présence d'anachronismes matériels, qui repose sur la comparaison des matières présentes dans une œuvre d'art avec les informations obtenues sur leur date de découverte ou de production la plus ancienne. La datation au carbone est une méthode séduisante, car elle permet d'obtenir l'âge absolu des matières utilisées, sur une période déterminée.

107. La spectrométrie à fluorescence X est une technique d'analyse multi-élémentaire non destructive, rapide et simultanée qui sert à caractériser des échantillons de nature et de composition diverses. Elle représente une option rentable pour de nombreux projets de recherche fondamentale et appliquée. Combinée à des dispositifs de focalisation des faisceaux de rayons X, elle permet de déterminer par des moyens non destructifs la répartition de divers éléments en 2D et 3D. Les sources synchrotron émettent des rayons X de haute intensité dont il est possible d'ajuster l'énergie et la focalisation spatiale à l'appui de diverses techniques de pointe employées pour l'analyse de la répartition des éléments, l'analyse à faible profondeur et l'analyse d'éléments ultra-traces dans divers domaines de la science des matériaux (nanomatériaux, biomatériaux et matériaux énergétiques, p. ex.) (figure D.4).

108. D'après les informations figurant sur la carte interactive des laboratoires de spectrométrie à fluorescence X récemment mise au point par l'Agence¹¹, il y aurait actuellement plus

¹¹ <https://nucleus-new.iaea.org/sites/nuclear-instrumentation/Pages/World-Map-XRF-laboratories.aspx>

de 1 200 installations de ce type dans plus de 100 pays ; souvent, néanmoins, leurs capacités sont encore largement méconnues des utilisateurs finaux qui pourraient profiter de cette puissante technique d'analyse.

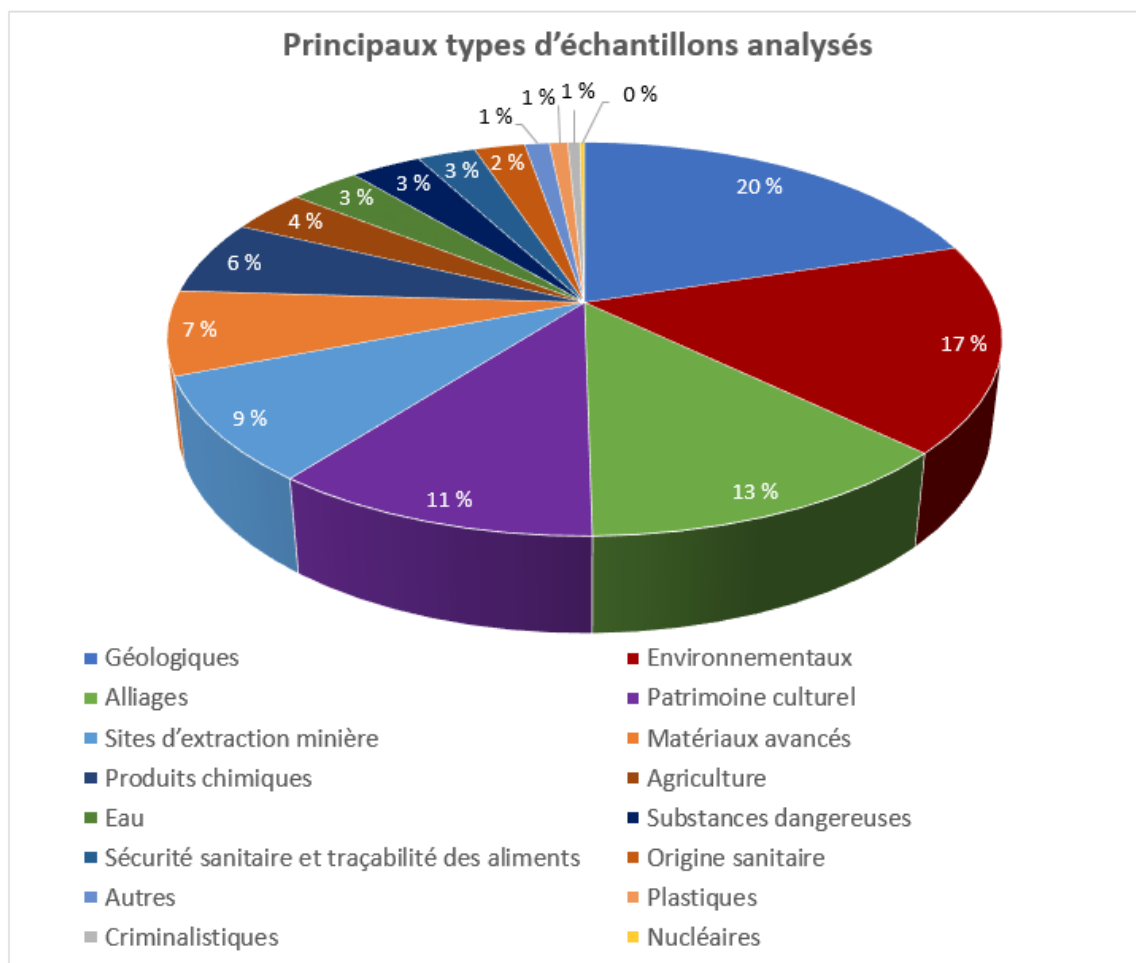


FIG. D-4. Principaux domaines d'application d'une installation de spectrométrie à fluorescence X particulière.

E. Données atomiques et nucléaires

Situation

109. Pour mettre au point des réacteurs de fusion, il faut pouvoir disposer de bases de données numériques de grande qualité pour les interactions à l'échelle de l'atome. Avec de telles données, il est possible d'effectuer sur ordinateur des simulations au stade de la conception. Les recherches actuelles se concentrent sur les simulations des interactions du plasma et des matériaux de la paroi du réacteur de fusion envisagé, ainsi que sur la modélisation fondamentale des interactions des atomes d'hydrogène avec ces matériaux (figure E.1). Les recherches expérimentales portent surtout sur la structure atomique fondamentale des matériaux de fusion en phase liquide et sur les expériences menées sur les plasmas de fusion-métal liquide à l'aide de dispositifs à plasma linéaire et à fusion de type stellarator. Les recherches théoriques et informatiques sont principalement consacrées à la simulation des effets de l'irradiation neutronique et de la perméation de l'hydrogène.

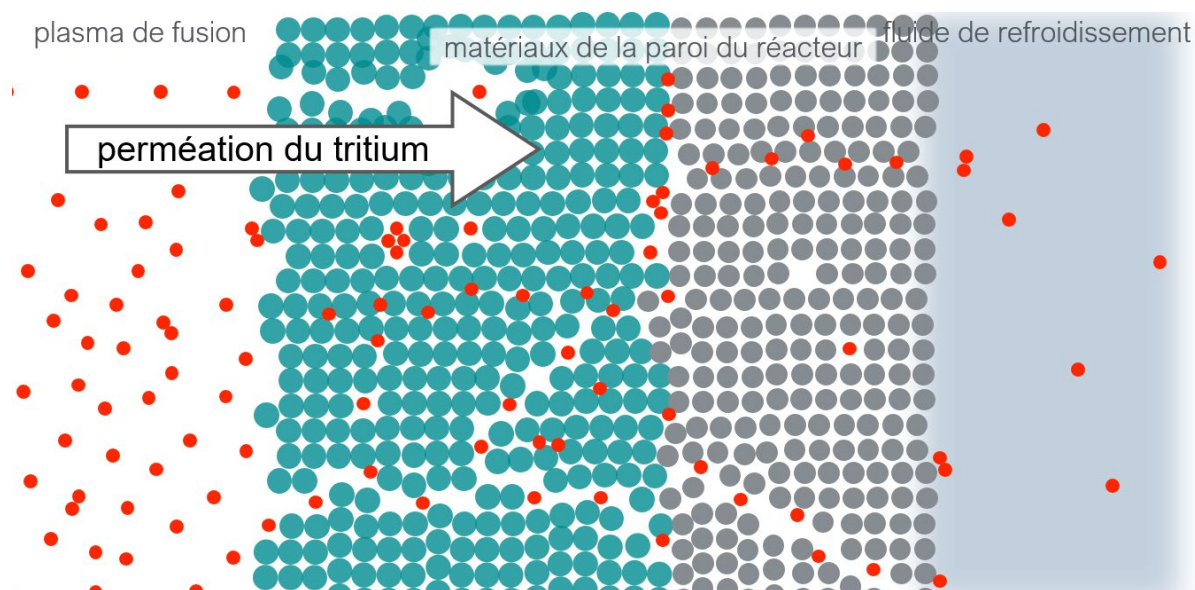


FIG. E-1. Présentation schématique du processus de perméation du tritium dans la paroi d'un réacteur de fusion.

Tendances

110. L'introduction rapide de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique que l'on voit très nettement se dessiner dans divers domaines va avoir des conséquences déterminantes sur la physique nucléaire et la création de bibliothèques de données nucléaires. L'éventail des applications possibles est large — de la prévision des paramètres utilisés dans les codes de calcul des modèles de réactions nucléaires comme TALYS à l'analyse des tendances concernant les données expérimentales et la constitution automatisée de la base de données sur les réactions nucléaires expérimentales, en passant par la détection et la localisation d'anomalies dans les centrales nucléaires grâce à des flux de données modernisés et automatisés. Les techniques modernes d'analyse des données devraient permettre d'affiner considérablement les évaluations des données nucléaires pour les applications nucléaires.

F. Environnement

111. La pollution par le plastique, un des problèmes environnementaux les plus pressants pour la planète, menace directement le développement durable. Lancée en 2021, l'initiative baptisée *Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique (NUTEC Plastics)*, prend appui sur les travaux menés par l'Agence pour combattre cette forme de pollution, grâce au recyclage basé sur la technologie des rayonnements et à la surveillance du milieu marin à l'aide de techniques de traçage isotopique.

F.1 Les technologies des rayonnements au service de la lutte contre la pollution par le plastique

Situation

112. Les technologies des rayonnements présentent des caractéristiques et des avantages uniques pour la limitation du volume des déchets plastiques et des polymères du fait qu'elles complètent le recyclage mécanique traditionnel des plastiques et facilitent le recyclage chimique. Il est possible de trier efficacement les déchets plastiques destinés aux flux de recyclage grâce à une utilisation innovante des faisceaux gamma et faisceaux d'électrons. Cela permet d'améliorer la qualité des plastiques recyclés et

d'accroître l'intérêt qu'ils présentent, de transformer les déchets plastiques en d'autres produits davantage valorisés et de favoriser le recyclage chimique des plastiques ou autres techniques de pointe en la matière. Ces applications permettent également d'économiser de l'énergie en réduisant le volume des polymères constituant les déchets plastiques pour les utiliser comme matières premières chimiques.

Tendances

113. Aux Philippines, une application, en cours de développement vise à induire une polymérisation par greffage au moyen de rayonnements afin de rendre compatibles fibres naturelles et plastique recyclé. Cette technique renforce l'adhésion fibre-plastique, améliorant ainsi les propriétés thermomécaniques globales du produit (figure F.1). Il existe au Philippines plusieurs variétés de fibres naturelles telles que l'abaca, le bananier, l'ananas et le jute, connues pour leurs excellentes propriétés mécaniques. Cependant, de par leur nature hydrophile, intrinsèque à la plupart des fibres lignocellulosiques, leur application dans les composites est limitée en raison d'une mauvaise adhésion interfaciale. La polymérisation par greffage induite par les rayonnements, qui permet de les mélanger ou de les homogénéiser, vient à bout de cette immiscibilité.

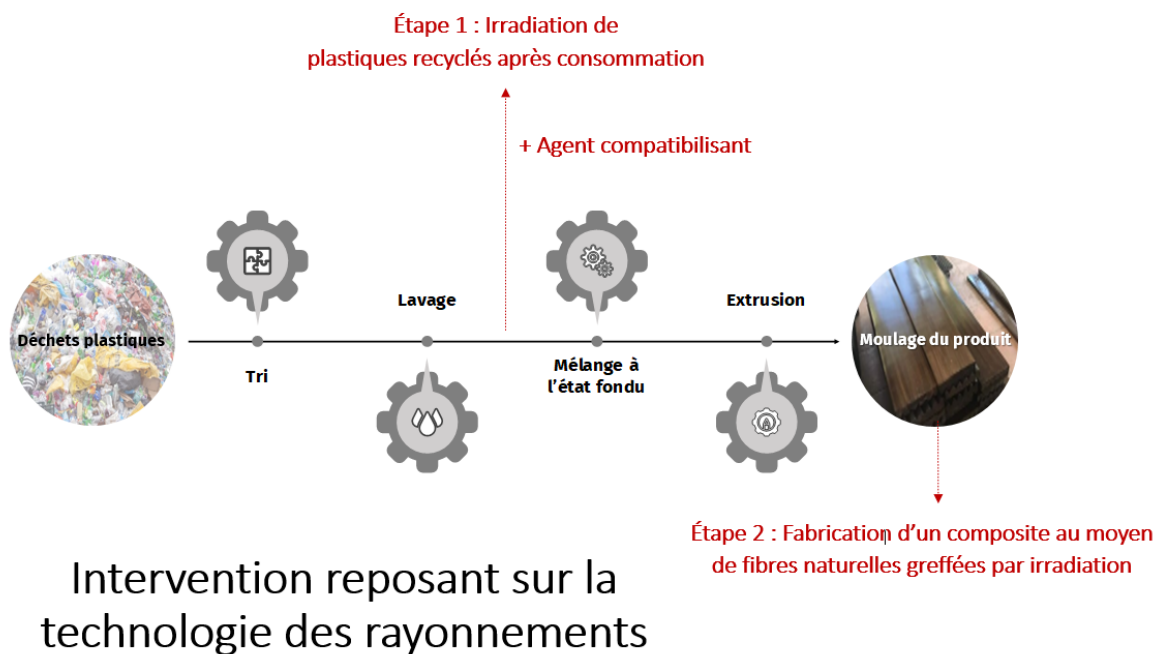


FIG. F-1. Schéma de la fabrication proposée d'un composite mêlant des fibres naturelles greffées par irradiation et des plastiques recyclés après consommation qui ont été irradiés aux Philippines. (Image : Institut philippin de recherche nucléaire)

114. Une autre application, en cours de développement en Indonésie, exploite la technologie des rayonnements pour résoudre les problèmes posés par deux flux de déchets. Avec cette méthode, les déchets plastiques seront irradiés de manière à pouvoir former des composites stables avec des fibres de biomasse résiduelle aux fins de la fabrication de matériaux de construction à partir de déchets plastiques et de déchets de palmiers (figure F.2). Les technologies des rayonnements facilitent la décomposition de la biomasse, favorisent la compatibilité des composants et améliorent la réticulation dans le produit final pour en adapter les propriétés.

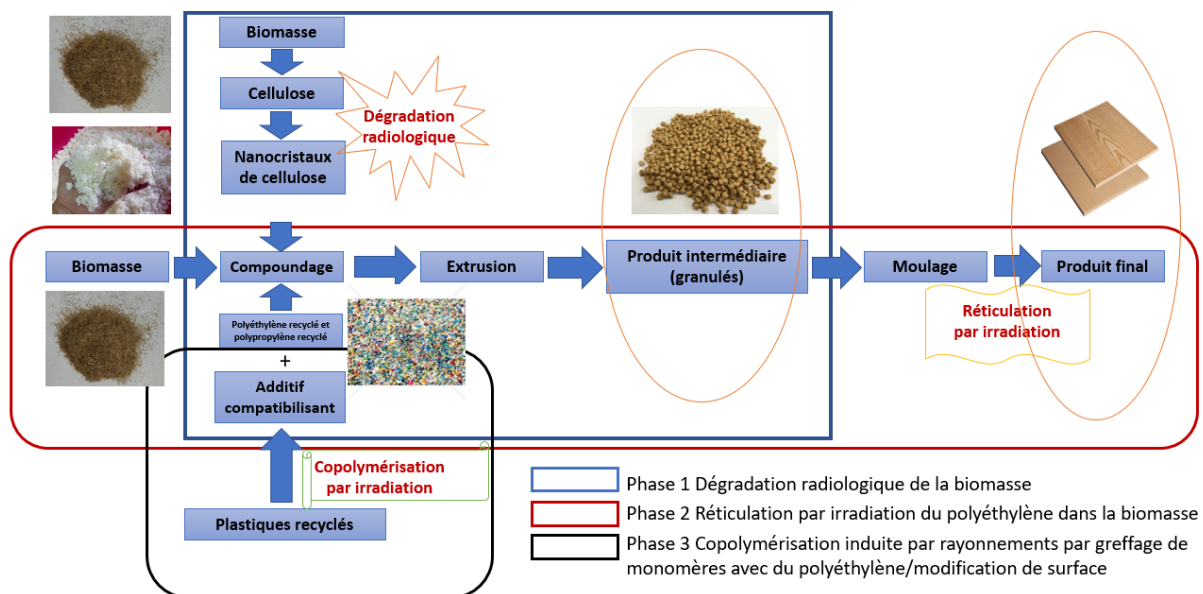


FIG. F-2. Schéma des étapes proposées pour la production d'un composite bois-plastique renforcé avec des fibres naturelles et des plastiques recyclés (polyéthylène recyclé et polypropylène recyclé). (Image : Agence nationale de l'énergie nucléaire de l'Indonésie)

F.2 Les techniques nucléaires et isotopiques au service de la lutte contre la pollution du milieu marin par le plastique

Situation

115. C'est dans l'océan que finissent les plastiques mal gérés et non recyclés provenant de sources terrestres. Si la communauté scientifique mondiale a fait de grands progrès au cours des dix dernières années pour mieux comprendre la pollution du milieu marin par le plastique et ses possibles répercussions sur divers organismes aquatiques, les connaissances sur l'abondance et les conséquences de la présence de microplastiques dans les océans sont encore lacunaires. L'impact visible, et très médiatisé, des macroplastiques (figure F.3) sur les organismes marins est certes un fait bien établi, mais les dommages qu'ils peuvent provoquer — quand leur diamètre est inférieur à cinq millimètres — sont beaucoup moins clairs. En raison de l'ampleur de ce problème, la pollution par le plastique est devenue un sujet de préoccupation environnementale dans le monde entier, attirant l'attention des pouvoirs publics, de la société civile, des scientifiques et des organisations non gouvernementales.



FIG. F-3. Macroplastiques pris dans les rets d'un filet à plancton dans les eaux côtières de la Méditerranée.

116. Les technologies nucléaires ont largement servi les travaux scientifiques menés à l'échelle mondiale sur la pollution du milieu marin par le plastique. Ces dernières années, des techniques nucléaires et isotopiques très diverses ont été mises au point pour faciliter la détermination de la composition, de la taille et de la quantité des débris plastiques dans le milieu marin. Ces techniques, qui reposent sur l'imagerie spectroscopique, comme la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et la microscopie Raman, permettent d'identifier le type de polymère présent dans un échantillon naturel et d'y quantifier le nombre de particules de plastique de plus de dix microns. En complément, la pyrolyse-chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse et la désorption thermique-chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse permettent simultanément d'identifier le polymère en question et d'analyser aussi bien la masse de chaque type de polymère plastique (de 500 microns à un millième de micron) que les additifs organiques associés à la particule de plastique dans des échantillons de l'environnement complexes.

117. Toutes ces techniques nucléaires et isotopiques peuvent être appliquées à la surveillance des plastiques dans le milieu marin à l'échelle planétaire. Associées aux méthodes de modélisation de la circulation océanique et des phénomènes de dispersion dans les océans, elles contribuent à en déterminer aussi bien l'origine que leur devenir dans cet environnement. L'utilisation conjointe de ces techniques et des mesures des radionucléides de l'environnement (béryllium 7, plomb 210, césium 137 et plutonium 239/240) présents dans les sédiments et ainsi que de la fluorescence X permet aux scientifiques d'établir la géochronologie des carottes de sédiments. Ils s'en servent pour reconstituer rétrospectivement les tendances en matière de pollution du milieu marin par le plastique et mieux comprendre le vieillissement des microplastiques après la sédimentation.

118. Les technologies nucléaires ont aussi largement contribué à la compréhension du transfert des microplastiques vers les organismes marins et de leurs impacts sur ces derniers. Certaines particules de microplastique sont si petites qu'elles peuvent être ingérées par ces organismes et pénétrer dans leurs organes, ce qui influe sur leur survie. En outre, les microplastiques peuvent être un vecteur pour d'autres polluants. De récentes études ont mis en évidence l'utilité des techniques nucléaires employées en laboratoire pour quantifier le mouvement et les effets biologiques des microplastiques et des

contaminants qui leur sont associés, ainsi que pour détecter le stress qu'ils induisent dans les organismes marins. Outre leur utilisation à des fins d'évaluation de la biodistribution, les techniques d'imagerie nucléaire telles que l'autoradiographie, la tomographie à émission de positons (PET) et la tomographie d'émission monophotonique peuvent également servir à mesurer les effets morphologiques des plastiques au niveau des tissus et des organismes.

Tendances

119. Pour combler les lacunes en matière de surveillance et de caractérisation de la pollution du milieu marin par le plastique, notamment par les particules de petite taille, toute une série de travaux de recherche-développement s'impose. Il est impératif de mieux comprendre les effets physiques des particules de plastique elles-mêmes, notamment leur accumulation, leur translocation et leur transfert trophique dans le milieu marin.

120. Les travaux consacrés à l'étude de l'accumulation de particules de plastique dans le biote consistent pour la plupart à effectuer des mesures dans tout l'organisme ou sur certains tissus qui ont été ingérés et dont les particules sont séparées par filtration, ou à procéder à des coupes de tissus et à leur évaluation histologique, qui seront suivies d'une confirmation par observation visuelle et/ou par spectroscopie. Les limites inhérentes à l'utilisation des techniques traditionnelles pourraient être surmontées si l'on recourait à des méthodes nucléaires pour créer des particules de plastique radioactives, que l'on peut suivre à l'aide de radiotraceurs. Bien que de telles particules aient été récemment associées à des polymères marqués au carbone 14 (émetteurs bêta), on pourrait en utiliser ultérieurement comme émetteurs gamma pour déterminer la rétention des microplastiques après ingestion et leur transfert dans une chaîne alimentaire. L'Agence et des organismes collaborateurs s'emploient à mettre au point d'autres techniques nucléaires qui font appel à des microplastiques marqués avec des isotopes stables, ce qui pourrait faire progresser de manière décisive la compréhension du transfert des microplastiques et de leurs effets sur les organismes marins.

121. Des chercheurs ont également commencé à s'intéresser à la fragmentation de plastiques de taille plus réduite, les nanoplastiques. Actuellement, ceux-ci ne peuvent pas être quantifiés dans l'environnement. Il existe certes des méthodes d'analyse (fluorimétrie et pyrolyse-chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse) pour les étudier en laboratoire (figure F.4), mais elles ne se prêtent pas nécessairement à l'évaluation des échantillons de l'environnement. Les techniques nucléaires et isotopiques ont un rôle à jouer à l'avenir dans l'étude et le suivi de la fragmentation des microplastiques et de la quantité de nanoplastiques. Le problème de la séparation et de la caractérisation des débris plastiques en fonction de leur taille (microplastiques et nanoplastiques) est de plus en plus préoccupant, car l'échelle nanométrique pourrait révéler des interactions avec des systèmes biologiques plus complexes et plus dangereuses. Le fractionnement par couplage flux-force associé à la pyrolyse-chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse est une méthodologie prometteuse pour la détermination des effets potentiels des nanoplastiques sur l'environnement. Parmi les autres toutes nouvelles technologies qui permettent de quantifier les particules de plastique dans le milieu marin, il convient de citer la spectrométrie de masse à source plasma à couplage inductif qui permet d'obtenir des informations sur la répartition granulométrique des particules et la concentration massique des nano- et microplastiques par la détection au carbone 13, ainsi que la tomographie informatisée en 3D, technique couramment employée dans la recherche en ingénierie.

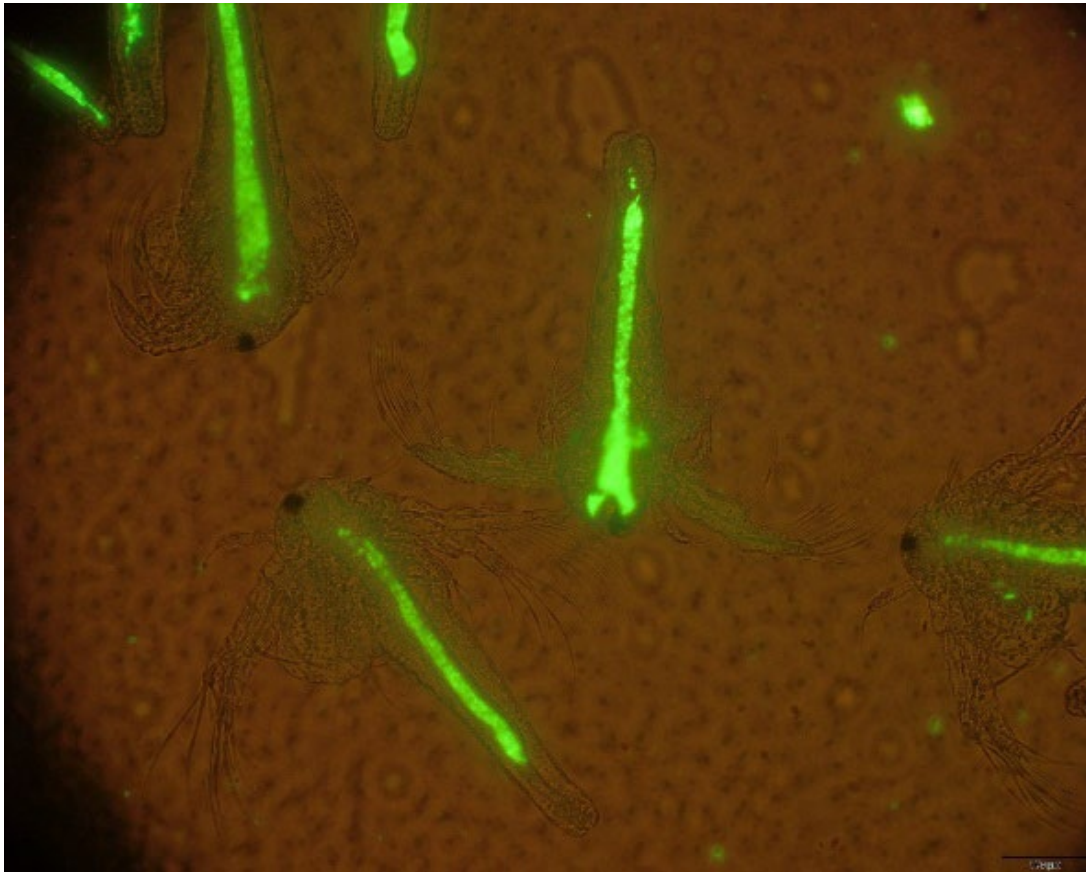


FIG. F-4. Ingestion de nanoplastiques par des nauplii de la crevette de salines (premier stade de vie d'Artemia salina) rendue visible par fluorescence.

122. Les risques et dangers que pourrait entraîner la présence de nanoplastiques dans l'environnement doivent être examinés et traités ; des techniques nucléaires actuellement utilisées en laboratoire le permettent d'ores et déjà. Cependant, le devenir et l'impact de ces nanoparticules sur l'environnement n'ont été jusqu'à présent que très peu étudiés.

123. Les progrès escomptés dans l'utilisation des techniques nucléaires et isotopiques pour la surveillance de la pollution marine et une meilleure évaluation de son impact sur les organismes marins doivent s'accompagner de deux évolutions essentielles : il faut que les capacités à entreprendre des activités de surveillance et d'évaluation des données sur les plastiques dans le milieu marin se développent à travers le monde pour atteindre des niveaux similaires, et il convient de résorber les disparités dans la validation des méthodes de surveillance dans le cadre d'un processus de comparaison, d'harmonisation et de normalisation qui garantisse des résultats fiables. Des matériaux de référence reflétant la variété des types de polymères, l'éventail des tailles, les différentes formes et l'état de vieillissement des particules de microplastique trouvées dans l'océan sont indispensables ; malheureusement, pour l'instant, il n'en existe pas.

124. Les techniques nucléaires et isotopiques sont appelées à jouer durablement un rôle crucial dans le cadre de la lutte contre la pollution du milieu marin par le plastique en permettant d'améliorer la prise de décisions avisées et de mieux gérer nos océans à partir de données scientifiques.

G. Alimentation et agriculture

G.1 L’empreinte isotopique, un procédé novateur pour évaluer et atténuer la persistance et le transport d’antibiotiques ainsi que leurs implications sur la résistance aux antimicrobiens

Situation

125. Les agents antimicrobiens tels que les antibiotiques, les antiviraux, les antifongiques et les antiparasitaires servent à prévenir et traiter des infections qui touchent les êtres humains, les animaux et les plantes. S’ils sauvent des vies, ce sont eux aussi qui sont principalement responsables, pour peu que l’on en fasse un usage impropre ou excessif, de l’apparition de pathogènes résistants aux médicaments. La résistance aux antimicrobiens, qui est actuellement à l’origine de 700 000 décès chaque année et dont on pense qu’elle pourrait causer la mort de dix millions d’individus par an d’ici 2050, a été officiellement classée par l’Organisation mondiale de la Santé parmi les dix menaces les plus graves pour la santé publique dans le monde.

126. Les antibiotiques sont largement utilisés dans les secteurs de la production animale et de l’aviculture afin de lutter contre les maladies et de favoriser la croissance. Entre 10 et 90 % des médicaments administrés ne sont pas complètement absorbés/métabolisés par les animaux et sont éliminés dans l’urine et les matières fécales, lesquelles peuvent ensuite être utilisées de manière directe sous forme de fumier (figure G.1) ou indirecte sous forme de boues d’épuration, et servir d’engrais ou contribuer à l’amendement de terres agricoles en libérant dans le sol aussi bien les bactéries et substances antimicrobiennes que leurs métabolites.



*FIG. G-1. Le fait d’amender les sols en épandant du fumier pour obtenir une meilleure fertilisation libère dans les champs à la fois des antimicrobiens et leurs métabolites (gènes antimicrobiens).
(Photo : Chesapeake Bay Program)*

127. La résistance antimicrobienne est un phénomène lié à l’évolution des bactéries, des virus, des champignons et des parasites, qui mutent et s’adaptent peu à peu, et finissent par ne plus réagir aux agents antimicrobiens, rendant ainsi les infections plus difficiles à traiter. Les organismes qui résistent aux antimicrobiens sont présents chez l’homme, chez l’animal, dans les aliments et les végétaux et dans l’environnement (en particulier dans l’eau et dans les sols). Bénéficiant d’un avantage évolutif, ils

peuvent déclencher la formation d'un microbiome, c'est-à-dire d'une population bactérienne, porteur de gènes résistant aux antimicrobiens. Si la résistance antimicrobienne a été largement étudiée sous l'angle de la santé humaine et animale, ses effets sur les sols et sur l'eau demeurent méconnus.

128. Les végétaux, les animaux et les denrées alimentaires peuvent contenir des résidus de substances antimicrobiennes transférées par l'environnement, et nombreux sont les maillons de la chaîne alimentaire qui recèlent d'abondantes populations microbiennes, les conditions propices à l'apparition d'une résistance antimicrobienne étant ainsi réunies. Les aliments tout comme l'environnement jouent donc un rôle important dans la transmission complexe de la résistance antimicrobienne à l'homme. Le fait de pouvoir déterminer l'origine et l'évolution de cette résistance, pour ensuite élaborer des solutions qui permettent de gérer le problème, devrait contribuer à limiter le nombre de décès qui y sont liés. Tel est aussi le sens du principe « Une seule santé », qui repose sur la prise de conscience des liens étroits et interdépendants qui existent entre la santé humaine, les animaux (domestiques et faune sauvage) et l'environnement au sens large (notamment les écosystèmes).

129. Les méthodes chimiques conventionnelles auxquelles nous avons aujourd'hui recours peuvent servir à évaluer la propagation de substances antimicrobiennes dans l'environnement et dans les denrées alimentaires ainsi qu'à étudier leur résistance dans les bactéries, mais elles sont incapables d'expliquer le devenir, la dynamique et la persistance de ces substances et de la résistance aux antimicrobiens dans les systèmes agricoles. Elles peuvent aider à dresser l'inventaire de concentrations antimicrobiennes à l'instant T, mais il leur est impossible de mesurer des inconnues telles que les métabolites. Les antimicrobiens sont couramment employés dans les champs, mais l'usage répété qui en est fait stabilise leurs concentrations. D'où la difficulté de détecter comment ces agents chimiques se dégradent avec le temps, d'autant plus que les analyses conventionnelles ne permettent pas de savoir à quelle vitesse les substances antimicrobiennes se propagent dans l'environnement après leur application, quel est le délai de transformation/métabolisation d'un nouvel apport antimicrobien et quels sont les métabolites qui en résultent, en quoi les métabolites antimicrobiens contribuent au développement de populations bactériennes résistantes aux antimicrobiens, ni quelle est l'importance de l'apport réalisé à un moment donné au regard de celui effectué précédemment et celui à venir.

Tendances

130. Les techniques d'analyse et de sondage de composés spécifiques au moyen d'isotopes stables constituent de puissants outils d'évaluation des substances antimicrobiennes. Elles permettent de mesurer les rapports d'isotopes stables naturels (par exemple, carbone 13 et azote 15) dans des échantillons de l'environnement en faisant appel à la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse isotopique et à la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse isotopique. Elles peuvent éclairer les responsables chargés des questions de remédiation environnementale quant aux sources de contamination potentielle et à l'ampleur de la dégradation de l'environnement. Les techniques de sondage aux isotopes stables sont utiles pour déterminer si, sur un site contaminé, la biodégradation d'un contaminant donné peut advenir ou a déjà commencé. Toutes ces techniques ont recours à des contaminants marqués par des isotopes (carbone 13, azote 15 et oxygène 18), qui permettent de détecter et quantifier les processus de biodégradation, et de caractériser les micro-organismes qui en sont la cause. Pour comprendre la dynamique des antimicrobiens et de la résistance antimicrobienne dans la chaîne alimentaire, il pourrait être recommandé de suivre une approche intégrée s'appuyant sur la technologie des isotopes et le séquençage du génome. Cela permettrait de savoir comment se comportent les agents antimicrobiens excrétés par les animaux, ce qu'ils deviennent dans l'environnement (en particulier dans les sols et dans l'eau) et d'étudier parallèlement l'évolution et la propagation des gènes de résistance antimicrobienne.

131. Désireuse d'appliquer les techniques précitées pour suivre la trace des antimicrobiens dans les systèmes agricoles, l'Agence a lancé un projet de recherche coordonnée intitulé « Techniques isotopiques susceptibles de déterminer l'évolution des antimicrobiens et ses implications pour la

résistance antimicrobienne dans les systèmes agricoles ». La technique de l'analyse de composés spécifiques au moyen d'isotopes stables a été mise au point dans le but de pouvoir retrouver l'origine de pesticides/antimicrobiens vétérinaires et de voir ce qu'ils deviennent dans des zones agricoles. Elle est utilisée pour surveiller la provenance, la dynamique et la propagation d'antibiotiques après leur application en plein champ, et pour déterminer leurs effets potentiels sur l'environnement. La première étape consiste à harmoniser les techniques permettant d'établir la présence dans le fumier épandu d'antibiotiques synthétiques dotés de marqueurs isotopiques et de suivre leur évolution. Pour l'instant, les quantités de tels antibiotiques que l'on trouve dans le commerce ne suffisent pas pour tester la méthodologie sur le terrain.

132. Par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, l'Agence a entrepris, en collaboration avec l'Université technique de Munich, de fabriquer, par synthèse organique, du sulfaméthoxazole et de la tétracycline (antibiotiques couramment utilisés en médecine humaine et vétérinaire) pour mener une étude de terrain en collaboration avec des partenaires australiens, brésiliens, chinois, sud-africains et vietnamiens. L'objectif de cette étude est d'établir des protocoles/lignes directrices pour des analyses destinées à retracer le parcours suivi par les antibiotiques depuis leur administration sous forme de médicaments à usage humain ou vétérinaire jusqu'à leur ruissellement dans les terres agricoles, en passant par les différentes phases intermédiaires — excréments, fumier, contamination d'une superficie et des eaux souterraines destinées à l'irrigation. Le Laboratoire de la gestion des sols et de l'eau et de la nutrition des plantes de l'Agence, à Seibersdorf, dispensera une formation pratique sur l'application des techniques isotopiques à des fins de surveillance des antimicrobiens dans l'environnement. Cette formation indiquera également en quoi le recours à la méthodologie susmentionnée pourrait aider les pays en développement à mettre au point des stratégies visant à limiter la propagation d'antibiotiques dans l'environnement. Le Laboratoire de la protection des aliments et de l'environnement de l'Agence, à Seibersdorf, apportera son concours à l'étude en analysant les antimicrobiens présents dans les aliments ; il procédera pour ce faire à des analyses par dilution isotopique et à des analyses de composés spécifiques au moyen d'isotopes stables,

133. Les récentes avancées des techniques moléculaires/biologiques, comme la métagénomique aléatoire, peuvent servir à détecter et quantifier les gènes de résistance aux antimicrobiens. L'analyse d'autres gènes ou éléments génétiques, tels que l'intégrase d'intégrons de différentes classes, peut souvent constituer une bonne solution de remplacement pour détecter d'une manière générale la présence d'une pollution anthropique, notamment l'existence de bactéries résistantes dans des environnements pollués. Les plateformes de séquençage du génome dont est équipé le Laboratoire de la production et de la santé animales de l'Agence à Seibersdorf seront mises à contribution pour le projet : elles fourniront les techniques moléculaires et la formation pratique relative aux dosages en laboratoire nécessaires à l'identification des souches de résistance antimicrobienne et aideront ainsi à suivre la trace des gènes associés à cette dernière. La conjugaison de techniques isotopiques, notamment l'analyse de composés spécifiques au moyen d'isotopes stables, et de techniques moléculaires plus avancées devraient permettre de mieux comprendre comment se comportent et ce que deviennent les antibiotiques présents dans le fumier épandu et les implications qui en découlent en termes de résistance aux antibiotiques dans l'environnement.

G.2 Variations génétiques induites par l'espace, sélection des plantes et mise à profit de l'astrobiologie dans la lutte contre le changement climatique

Situation

134. L'espace est souvent utilisé à des fins de recherche dans le domaine de l'astrobiologie. Les conditions particulières qui prévalent en orbite terrestre et au-delà, notamment les rayonnements et la microgravité, ont incité, dès le début de l'exploration spatiale à la fin des années 1950, à réaliser toute une série d'expériences biologiques. Nombre d'entre elles se sont intéressées aux effets de la microgravité sur la croissance des végétaux, à l'image de celles réalisées dans la Station spatiale

internationale (ISS) par exemple, ou dans des simulateurs reproduisant sur terre les conditions rencontrées dans l'espace, tels que le Space Life Sciences Laboratory de la NASA.

135. Ces expériences, qui portaient surtout sur la biologie fondamentale, ont cherché à comprendre les mécanismes autorisant une production végétale dans les conditions de microgravité propres aux missions spatiales. Leurs résultats montrent que l'altération de la gravité influe sur la prolifération et la croissance des cellules, sur l'expression génétique et sur l'épigénétique. De récentes expériences consacrées aux variations génétiques induites par l'espace ont cherché à voir si les nouvelles variétés de plantes supporteraient des conditions particulièrement difficiles sur terre, notamment celles dues au changement climatique. En janvier 2021, quelque 320 boutures de vignes expédiées par des chercheurs français ont été renvoyées sur terre après avoir passé dix mois à l'intérieur de l'ISS. Les chercheurs entendaient essentiellement étudier les effets de la microgravité qui règne à bord de l'ISS sur le génome et le comportement physiologique de la vigne. En 2020, l'entreprise Front Range Biosciences spécialisée dans la phytotechnie a elle aussi fait parvenir à l'ISS, à des fins de recherche similaires, des cultures de tissus de chanvre et de tabac.

136. Si la plupart des expériences astrobiologiques menées à ce jour dans le monde ont été dictées par l'intérêt majeur que suscitent les effets de la microgravité sur la biologie végétale, les rayonnements cosmiques dans l'espace extra-atmosphérique ont également été mis à profit pour induire des variations génétiques dans des semences afin d'améliorer les cultures grâce à la sélection par mutation. La Chine a mis en circulation, ces 15 dernières années, plus de 30 nouvelles variétés végétales mutantes créées par mutagenèse à l'issue d'une exposition au milieu spatial pour laquelle il a été fait appel à des satellites en orbite, à des ballons de haute altitude ou à des rayonnements cosmiques simulés sur terre. Ces projets ont combiné les rayonnements et la microgravité propres à l'espace extra-atmosphérique pour induire des variations génétiques. Une fois dans l'espace extra-atmosphérique, les semences ont été exposées à l'environnement spatial externe, qui n'est pas protégé des rayonnements comme l'est l'intérieur de l'ISS.

137. Les expériences astrobiologiques consacrées à l'étude des effets de l'espace sur les semences demeurent extrêmement limitées et portent essentiellement sur la capacité de survie desdites semences et de plusieurs micro-organismes. La première exposition de micro-organismes à des rayonnements cosmiques a été réalisée en 1965 sur des fusées-sondes, à 150 kilomètres au-dessus de la Terre ; deux autres ont suivi en 1966, lors des missions Gemini 9 et 12, à 300 kilomètres d'altitude, et une dernière a eu lieu lors de la mission Apollo 16 à son retour de la Lune en 1974. Depuis, plusieurs expériences biologiques ont été menées ; soucieuses avant tout de démontrer que la vie est possible dans les conditions extrêmement difficiles que l'on rencontre dans l'espace, elles ont principalement porté sur des bactéries, des algues, des lichens et, dans une moindre mesure, des semences végétales. Elles se sont déroulées sur des plateformes spécifiques telles que la plateforme d'exposition prolongée au milieu spatial (LDEF), la plateforme européenne récupérable (EURECA), la station spatiale Mir, le programme de recherche Bioinformatics Methodology For Pathway Analysis (BioPAN), la plateforme EXPOSE (ISS) capable d'accueillir des charges utiles montées à l'extérieur pour une première phase d'utilisation, l'expérience TANPOPO menée sur le module d'expérimentation japonais (JEM) de l'ISS, ou encore le nanosatellite O/OREOS (Organism/Organic Exposure to Orbital Stresses) qui emporte des charges utiles de micro-organismes vivants pour tester leur capacité de survie dans l'environnement cosmique (projet SESLO). La récente mise à disposition de charges utiles commerciales facilite désormais les expériences astrobiologiques à bord de l'ISS, notamment celles menées avec des charges utiles internes ou externes de matériel végétal.

Tendances

138. Les publications scientifiques contiennent relativement peu d'informations concernant les effets mutagènes de l'environnement spatial sur la génomique et la physiologie des plantes cultivées. Selon des scientifiques chinois, c'est dans les semences de blé envoyées dans l'espace à bord du satellite

récupérable Shijian-8 que les rayonnements cosmiques et la microgravité ont induit les mutations les plus fréquentes, ce qui indique qu'il existerait un effet synergique entre les rayons cosmiques et la microgravité, alors que le seul effet de la microgravité était bien inférieur à celui des rayons cosmiques¹². D'autres chercheurs ont indiqué avoir trouvé sur des mutants des profils et gènes révélant une tolérance à la salinité qui serait due à une mutagenèse liée au vol spatial¹³. Des semences ont aussi été envoyées sur le premier module de la nouvelle station spatiale chinoise et d'autres ont été déposées sur la surface de la Lune, dans le cadre de la mission spatiale Chang'e-4.



FIG. G-2. Plateforme externe Nanoracks de l'ISS. (Photo : Nanoracks)

139. La question de savoir en quoi l'environnement spatial entraîne des mutations des génomes des plantes et modifie la physiologie de ces dernières, améliorant ainsi leur capacité à supporter de mauvaises conditions de croissance sur terre — du type de celles que génère le changement climatique — suscite désormais de plus en plus d'intérêt. Deux entités commerciales sont à présent en mesure d'assurer le convoyage de charges de semences ou de matériel végétal vers l'ISS ; elles semblent vouloir s'engouffrer dans la brèche pour proposer de faciliter ou de mener des travaux de recherche concernant les effets des rayonnements cosmiques et de la microgravité sur la modification de la capacité des végétaux à s'adapter à des conditions de croissance particulièrement difficiles. Des progrès devraient intervenir rapidement dans ce domaine, au vu de l'attention constante accordée à l'étude de la biologie végétale dans l'espace, qui apparaît comme un moyen non seulement de nourrir les astronautes mais aussi d'exploiter les précieuses mutations induites par l'exposition aux rayons cosmiques, pour sélectionner des variétés végétales résistantes.

140. L'Agence se lancera dans l'aventure de l'astrobiologie et de l'amélioration des plantes dans l'espace en 2022, par l'intermédiaire de son Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans

¹² Guo, H., et al., Mutagenic effects of different factors in spaceflight environment of Shijian-8 satellite of wheat, *Acta Agronomica Sinica* Vol. 36 n° 5, 2010.

¹³ Xiong, H., et al., RNAseq analysis reveals pathways and candidate genes associated with salinity tolerance in a spaceflight-induced wheat mutant, *Scientific Reports* 7, 2731, 2017.

l'alimentation et l'agriculture : elle procèdera à une expérience consistant à placer des semences de deux espèces végétales¹⁴ à l'intérieur et à l'extérieur de l'ISS pour une durée de trois à sept mois respectivement. Pour la charge utile externe, il sera fait appel à la plateforme externe Nanoracks, montée de manière semi-permanente sur la palette extérieure du JEM (figure G.2). La charge utile sera installée dans le module pressurisé de l'ISS avant d'être placée à l'extérieur. Il s'agira de la première exploration systématique destinée à comprendre et à mettre à profit les effets des rayonnements cosmiques et de la microgravité sur les variations génétiques induites en vue de leur possible utilisation dans la mise au point de cultures capables de supporter des conditions de croissance particulièrement difficiles sur terre, à l'image de celles auxquelles nous expose le changement climatique.

H. Santé humaine

H.1 Théranostique : feuille de route pour une prise en charge du cancer personnalisée

Situation

141. Chaque cancer touche différents types de cellules. Sa prise en charge médicale suppose, pour être optimale, le choix d'un traitement adéquat, lequel repose sur l'identification des sous-types de cancer que la médecine nucléaire peut aisément aider à caractériser, rendant ainsi possible une démarche thérapeutique personnalisée.

142. Ces dernières années, la médecine nucléaire a connu un formidable essor grâce, entre autres, au développement de la PET, surtout utilisée en association avec le fluorodésoxyglucose (¹⁸F-FDG), et à de nouveaux traitements ciblés aux radionucléides. Ces nouvelles avancées ouvrent la voie à une prise en charge personnalisée du cancer. Les radiopharmaceutiques qui ciblent des biomarqueurs particuliers sont d'une grande utilité pour localiser la maladie et en déterminer la propagation, établir un pronostic, évaluer la réponse thérapeutique et faciliter la planification du traitement ou les biopsies guidées. En outre, une fois marqués avec des émetteurs bêta ou alpha, ils peuvent, dès lors qu'ils visent des marqueurs moléculaires correspondants exprimés par différentes tumeurs solides et hématologiques, être intégrés dans un traitement ciblé faisant appel aux radionucléides.

143. La médecine nucléaire moderne a ceci d'essentiel qu'elle concourt à une médecine « personnalisée » ou médecine « de précision » et permet ainsi de choisir un traitement spécifique qui soit adapté à l'état de chaque patient ou qui tienne compte de sa prédisposition à l'une ou l'autre maladie. Elle peut donc s'appliquer à l'évaluation des risques, au diagnostic, au suivi thérapeutique et au traitement par des radionucléides qui correspondent aux caractéristiques uniques d'un patient donné afin d'en améliorer la qualité de vie, constituant ainsi un progrès en termes de santé publique. Ce faisant, elle contribue directement à la réalisation de l'objectif de développement durable n° 3 des Nations Unies (bonne santé et bien-être).

144. La théranostique, qui recourt aux isotopes, conjugue diagnostic et thérapie, laissant ainsi aux professionnels de santé la possibilité de se concentrer sur les besoins propres à chaque patient. Dans cette spécialité, des molécules similaires ancrées à des isotopes radioactifs différents sont utilisées à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. Tandis qu'un radio-isotope permet, avec une grande précision, de circonscrire un cancer, d'en déterminer la propagation et d'établir le type de ses cellules cancéreuses,

¹⁴ L'*Arabidopsis thaliana*, une petite plante à fleurs couramment utilisée comme organisme modèle en biologie végétale, et le *Sorghum bicolor*, plus simplement connu sous l'appellation « sorgho », cultivé pour ses graines qui servent à nourrir les hommes et les animaux et à produire de l'éthanol.

un autre émet des rayonnements pour anéantir ces dernières. Contrairement aux radiothérapies classiques, qui se montrent moins précises pour cibler la maladie et la localiser, la théranostique permet d'atteindre la tumeur avec des « balles » radioactives tout en épargnant les tissus sains adjacents, améliorant ainsi à la fois l'efficacité et la sûreté du traitement (figure H.1).

145. En aidant les États Membres à se doter des installations nécessaires et à former du personnel à l'utilisation de la théranostique dans le cadre de pratiques cliniques sûres et appropriées, l'Agence œuvre à la transition vers une médecine personnalisée



FIG. H-1. Résultat de la théranostique chez un patient de 82 ans atteint d'un cancer de la prostate propagé aux nœuds lymphatiques et aux os, De gauche à droite : du début du traitement à la rémission quasi totale. (Photos : Université américaine du Centre médical de Beyrouth)

Tendances

146. La médecine de précision, en particulier l'imagerie diagnostique ciblée, et les thérapies ont fait des progrès considérables au cours des dernières décennies, en partie grâce à la mise au point de nouvelles molécules et technologies, ce qui s'est traduit par une augmentation rapide du nombre d'applications théranostiques cliniques et de leur diffusion dans le monde.

147. Les applications cliniques se développent à un rythme de plus en plus soutenu. Actuellement, les plus notables s'adressent aux patients atteints de tumeurs neuroendocriniennes, de lymphomes, de cancers de la prostate, du sein, du poumon et de la thyroïde.

148. L'avenir de la théranostique repose sur la mise au point de nouvelles molécules qui cibleront des cellules tumorales spécifiques, ce qui permettra de traiter certains cancers à un stade avancé tout en atténuant les effets secondaires. Dans ce domaine en plein essor, il devient nécessaire d'étendre la coopération et l'application de normes au plan international, de former des spécialistes médicaux et des scientifiques et de mettre sur pied des infrastructures médicales spécialisées.

H.2 Progrès en sciences de la nutrition : exploiter les données disponibles pour aider les pays à lutter contre l'épidémie d'obésité

Situation

149. La nutrition est un paramètre d'une importance vitale pour tous les pays qui visent à atteindre l'objectif de développement durable n° 3 (bonne santé et bien-être). Alors même que la dénutrition

continue d'afficher des niveaux alarmants, l'obésité est en hausse. Selon le *Rapport sur la nutrition mondiale 2021*¹⁵, le surpoids et l'obésité au sein de la population adulte augmentent dans presque toutes les régions et tous les pays : 2,2 milliards de personnes sont en surcharge pondérale, dont 772 millions sont obèses. En 2020, environ 6 % des enfants de moins de cinq ans, dont près de la moitié vivent en Asie et plus d'un quart en Afrique, étaient considérés comme étant en surpoids. L'obésité est un facteur de risque majeur de diabète, de maladies cardiovasculaires, de cancer, de troubles musculo-squelettiques et de mortalité en général. Les maladies qui y sont liées ont pris des proportions épidémiques dans le monde entier : au moins 2,8 millions de personnes meurent chaque année par suite de surpoids ou d'obésité. À l'échelle mondiale, les maladies liées à l'obésité devraient coûter 1 200 milliards de dollars par an d'ici à 2025. Pour lutter contre l'épidémie d'obésité, les populations et les décideurs nationaux et internationaux doivent conjuguer leurs efforts et soutenir des interventions, des actions et des politiques efficaces en matière de nutrition. Dans ce contexte, il est crucial de disposer des données sur la dépense énergétique obtenues grâce à la technique de l'eau doublement marquée, basée sur des isotopes stables, qui fourniront aux décideurs les éléments nécessaires pour définir des politiques de nutrition et de santé plus efficaces face à la flambée épidémique d'obésité dans le monde.

150. La dépense énergétique totale (DET), mesurée par la technique de l'eau doublement marquée, désigne la quantité d'énergie que dépense un individu. Elle est importante pour déterminer les besoins en apport énergétique. Les données s'y rapportant aident à mettre sur pied et à évaluer les interventions relatives à la nutrition et à l'activité physique et constituent « la » référence permettant de valider de simples techniques d'apport énergétique. L'Agence soutient l'application de cette technique, qui est la seule à pouvoir évaluer la dépense énergétique totale dans des conditions normales sans perturber les activités quotidiennes, ce qui en fait un outil idéal pour une utilisation sur le terrain.

151. La technique de l'eau doublement marquée fait appel à deux traceurs isotopiques stables, le deutérium et l'oxygène 18, pour mesurer la dépense énergétique d'un individu. Elle consiste à faire boire une dose d'eau contenant ces deux isotopes non radioactifs, dose qui se mélange à l'eau présente dans l'organisme. Les isotopes sont évacués du corps dans l'urine et la sueur et grâce à la respiration. On prélève des échantillons d'urine avant d'administrer la dose et au cours des 7 à 14 jours qui suivent. Le deutérium quitte le corps uniquement sous forme d'eau corporelle, tandis que l'oxygène 18, éliminé sous forme d'eau et de dioxyde de carbone, est évacué plus rapidement. La différence entre le taux d'élimination du deutérium et celui de l'oxygène 18 est une mesure du taux de production de dioxyde de carbone, qui permet de calculer la dépense énergétique.

152. Bien que la technique de l'eau doublement marquée soit non invasive, sûre et facilement utilisable sur le terrain, son application à de larges groupes de population peut se révéler onéreuse en raison du coût des isotopes et du matériel d'analyse nécessaire. Les études qui y ont recours ont donc été en général limitées ; cependant, la mise en commun des données issues d'un grand nombre d'entre elles peut apporter des réponses à certaines questions — ce que ces études, prises isolément, ne permettent pas — dont celles qui portent sur la manière dont le changement climatique affectera les besoins énergétiques dans diverses populations. Pour mieux centraliser ces données venant du monde entier qui permettront de répondre à des questions importantes, l'Agence a créé en décembre 2018 une base de données qui contient des mesures de la dépense énergétique humaine effectuées au cours des trente dernières années. En novembre 2021, les données en question portaient sur plus de 7 600 sujets de 32 pays, âgés de huit jours à 95 ans. Près de 65 % des participants à l'étude sont des femmes, et les données proviennent pour la plupart de pays à revenu élevé.

¹⁵ <https://globalnutritionreport.org/reports/2021-global-nutrition-report/>

Tendances

153. La base de données de l'Agence sur la technique de l'eau doublement marquée revêt une importance déterminante dans la lutte contre l'obésité. L'analyse des données qu'elle contient a abouti en 2021 à la publication de nouvelles constatations qui montrent à quel point les techniques faisant appel aux isotopes stables sont essentielles à notre compréhension de la santé humaine et, en particulier, de la crise de l'obésité.

154. Un article publié dans la revue *Science*¹⁶ a battu en brèche nos connaissances antérieures sur le métabolisme (figure H.2). À partir des mesures figurant dans la base de données de l'Agence sur la technique de l'eau doublement marquée, ses auteurs ont étudié l'évolution de la dépense énergétique journalière au cours de la vie humaine et établi que le métabolisme comportait en fait quatre phases différentes, de la naissance jusqu'au-delà des quatre-vingt-dix ans. Les étapes importantes de la vie, comme la puberté, la grossesse et la ménopause, ainsi que le sexe et le vieillissement au milieu de la vie, influent moins sur le métabolisme qu'on ne le pensait auparavant. Ces résultats permettront aux scientifiques de mieux comprendre des points importants concernant la santé métabolique et de voir comment il serait possible d'aider tout un chacun à vivre plus sainement à chaque étape de sa vie.

155. Un autre article consacré à l'incidence de l'activité physique sur le bilan énergétique, qui a été publié dans la revue *Current Biology*¹⁷, montre qu'une activité physique accrue n'entraîne pas une dépense énergétique totale aussi importante que ce que l'on croyait jusqu'ici. Il se produit en effet un phénomène de compensation, c'est-à-dire qu'un exercice physique plus intensif entraîne une baisse du métabolisme de base. En outre, les personnes souffrant d'adiposité, ou d'obésité grave, peuvent avoir plus de mal à brûler les graisses par l'activité physique que les personnes maigres. Ces nouveaux résultats ont également des répercussions importantes sur les stratégies de santé publique visant à lutter contre le surpoids et l'obésité.

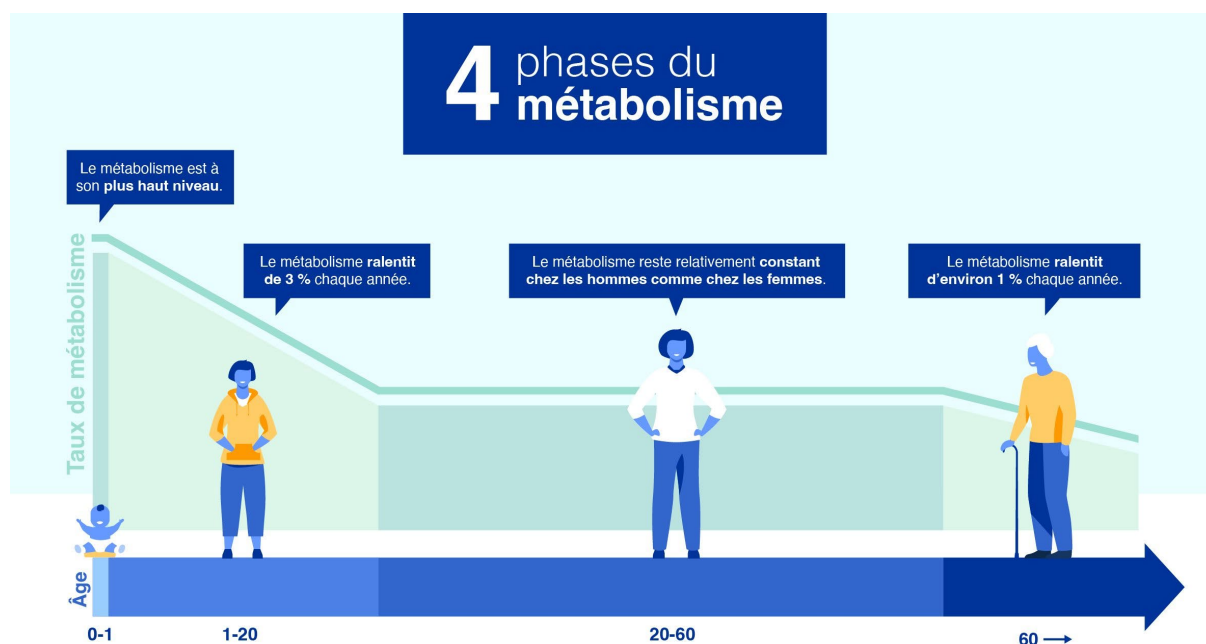


FIG. H-2. L'étude déterminante parue dans la revue *Science* a battu en brèche les connaissances antérieures sur le métabolisme.

156. D'autres études et publications sont en cours, qui portent sur des questions telles que les facteurs influençant la vitesse de renouvellement de l'eau et la quantité d'eau pure que chacun doit boire chaque

¹⁶ Daily energy expenditure through the human life course, *Science*, Vol. 373, No. 6556, 13 August 2021

¹⁷ Energy compensation and adiposity in humans, *Current Biology*, Vol. 31, Issue 20, 25 October 2021

jour, les incidences de la température ambiante et du réchauffement climatique sur les besoins énergétiques, et sur la question de savoir si la dépense énergétique a diminué pendant l'épidémie d'obésité. Toutefois, il faut obtenir davantage de données de la part des pays à revenu faible et intermédiaire pour obtenir une représentation plus fidèle au niveau international et permettre aux décideurs de disposer d'éléments probants pour hiérarchiser les mesures essentielles à prendre en matière de nutrition et lutter contre l'épidémie d'obésité. L'Agence soutiendra un nouveau projet de recherche coordonnée afin de recueillir davantage de données sur les dépenses énergétiques dans les pays à revenu faible et intermédiaire et veillera à enrichir sa base de données sur la technique de l'eau doublement marquée pour que tous les États Membres y soient représentés.

I. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements

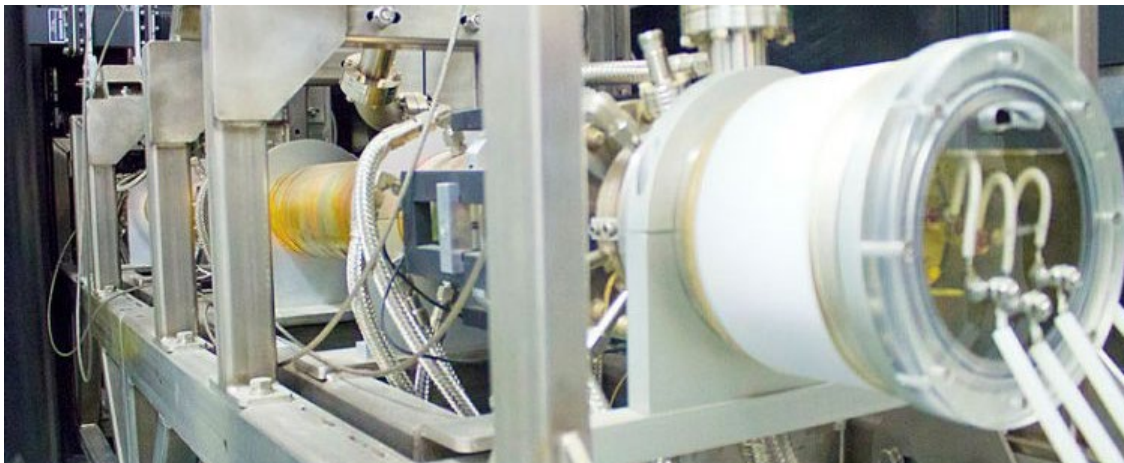
I.1. Nouvelles filières de production de radio-isotopes médicaux

Situation

157. Utilisés à la fois pour le diagnostic et le traitement du cancer et d'autres maladies chroniques, les radioisotopes et les radiopharmaceutiques sauvent des vies. Il est essentiel de faire en sorte que les radio-isotopes les plus importants soient constamment disponibles. Certains de ceux dont on se sert dans le domaine médical, comme le molybdène 99/technétium 99m, le fluor 18, le gallium 68, l'iode 131 et le lutécium 177, sont actuellement produits dans des réacteurs de recherche et des cyclotrons, selon une méthode consistant à bombarder une cible au moyen de particules énergétiques, comme des neutrons ou des protons, de façon à provoquer des réactions nucléaires. À la suite des perturbations qui ont affecté l'approvisionnement en molybdène 99 pendant la période 2007-2010 et les circuits de distribution pendant la pandémie de COVID-19, des chercheurs et des producteurs ont entrepris de mettre au point d'autres moyens de production. Au Canada, le technétium 99m produit par cyclotron a été approuvé et est maintenant commercialisé.

158. Deux nouvelles filières de production de molybdène 99 faisant appel à des accélérateurs linéaires et des centrales nucléaires ouvrent la voie à un renforcement et à l'autonomisation de la chaîne d'approvisionnement mondiale de ce radio-isotope médical, le plus utilisé au monde. Des travaux sont également en cours à l'échelle internationale pour produire, par des réactions photodynamiques (γ , n), des radio-isotopes médicaux, notamment l'actinium 225 et le cuivre 67, destinés à des agents thérapeutiques innovants et efficaces.

159. Des technologies reposant sur des accélérateurs autres que des cyclotrons peuvent être utilisées pour la production de radio-isotopes médicaux (figure I.1). Des cibles irradiées dans des accélérateurs linéaires sont soumises à des réactions (γ , n) et peuvent produire de nombreux isotopes médicaux, notamment du molybdène 99, de l'actinium 225, du cuivre 67 et du scandium 47. Une publication de l'Agence actuellement en préparation couvrira toutes les étapes du processus.



*FIG. I-1. Vue de l'accélérateur linéaire à la société Canadian Isotope Innovations.
(Photo : Centre canadien de rayonnement synchrotron)*

Tendances

160. Il est également possible de produire du cuivre 67 et de l'actinium 225 en provoquant des réactions photodynamiques de ce type. Du fait de sa période radioactive moyenne, de ses émissions de particules bêta pour la thérapie et de rayons gamma pour l'imagerie diagnostique, le cuivre 67 a permis à de nombreux chercheurs et scientifiques de mettre au point des radiopharmaceutiques théranostiques, notamment à base d'anticorps monoclonaux. Grâce à des études récentes s'appuyant sur la réaction photodynamique (γ , n), il a été possible d'en obtenir, d'une grande pureté, pour la fabrication de radiopharmaceutiques et leur application dans des essais cliniques aux États-Unis et en Australie.

161. L'actinium 225 présente également, en tant que radionucléide, un grand intérêt pour l'alphathérapie ciblée des patients atteints de cancer. Selon des informations¹⁸ relatives à une nouvelle approche photodynamique pour sa production, il semblerait que le produit final, obtenu en plus grande quantité, contienne moins d'impuretés que celui issu d'autres procédés. Il s'agit là d'un résultat décisif, qui laisse entrevoir l'espoir de satisfaire en partie la demande mondiale croissante d'actinium 225. Un nouveau projet de recherche coordonné de l'Agence sera consacré à la production et au contrôle de la qualité des radiopharmaceutiques à base d'actinium.

162. La production de radio-isotopes en réacteur repose sur la capture de neutrons dans un matériau cible. Les réacteurs de recherche sont généralement utilisés pour produire des radio-isotopes destinés à des applications thérapeutiques en médecine nucléaire. L'irradiation de cibles dans une centrale nucléaire est la voie habituellement empruntée pour produire certains radio-isotopes, comme le cobalt 60, utilisé dans l'industrie et en curiethérapie. En 2021, une centrale nucléaire commerciale de type CANDU a été autorisée par l'organisme de réglementation à produire du molybdène 99 (figure I.2). Un procédé semblable, capable de produire dans des centrales nucléaires d'autres radio-isotopes médicaux importants à courte période, notamment le lutécium 177 et l'holmium 166, est à l'étude. Cette évolution laisse entrevoir aussi de nouvelles perspectives aux concepteurs qui pourraient envisager de doter des réacteurs de puissance d'une capacité de production de radio-isotopes.

¹⁸ Actinium-225 production with an electron accelerator, Journal of Applied Physics 129, 104901 (2021)



*FIG. I-2. En 2021, la Commission canadienne de sûreté nucléaire a autorisé la centrale de Darlington à produire du molybdène 99, un radio-isotope médical qui sauve des vies.
(Photo : Ontario Power Generation)*

163. L'adoption plus large de ces applications, actuellement limitées à quelques pays, pourrait entraîner à l'avenir un changement de paradigme dans la production des radio-isotopes médicaux.

J. L'intelligence artificielle au service des sciences et des applications nucléaires

Situation

164. L'intelligence artificielle (IA) fait référence à un ensemble de technologies combinant des données numériques et des algorithmes de traitement, et dont la puissance de calcul augmente constamment au point de rendre possible la conception de systèmes capables d'aborder des problèmes complexes selon un cheminement qui présente des similitudes avec la logique et le raisonnement humains. Les technologies faisant appel à l'IA peuvent analyser de gros volumes de données et déterminer comment venir à bout d'une tâche particulière — c'est ce que l'on appelle l'apprentissage automatique.

165. L'intelligence artificielle progresse à une vitesse exponentielle et peut d'ores et déjà trier et interpréter des quantités considérables de données provenant de différentes sources pour exécuter un large éventail de tâches et contribuer à relever un grand nombre des défis mondiaux les plus pressants. Ses formidables potentialités lui permettent d'accélérer le développement technologique dans de multiples domaines nucléaires, qui vont de la médecine aux sciences et à l'industrie, en passant par la gestion des ressources en eau. Grâce à son aptitude à reconnaître des schémas de données et à analyser des images à haute résolution prises par des satellites, des drones ou des appareils d'imagerie médicale, l'IA est capable d'améliorer les interventions dans des situations d'urgence humanitaire, de détecter des changements hydro-climatiques mondiaux annonciateurs de sécheresses ou d'inondations, de surveiller et d'optimiser la productivité agricole, de suivre les migrations animales et marines, et d'aider les professionnels de santé à repérer et traiter des cancers et autres maladies.

166. En combinant la science isotopique et l'IA, il est possible d'obtenir un cadre interprétable qui puisse servir à tirer de nouvelles informations à partir de légères variations isotopiques, ce qui ouvre un

vaste champ de possibilités dans une multitude de domaines, notamment l'hydrologie isotopique, l'écologie, la criminalistique et la sécurité alimentaire. Les experts suivent déjà des approches fondées sur l'IA pour analyser rapidement les masses de données isotopiques relatives à l'eau qui sont stockées dans des réseaux mondiaux tels que le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations que gèrent l'Agence et l'Organisation météorologique mondiale. Une analyse efficace et efficiente de ces données facilitée par l'IA aide les scientifiques à comprendre le changement climatique ainsi que les effets de ce dernier et de la croissance démographique sur les ressources en eau dans le monde entier.

167. Dans les domaines de la recherche sur la fusion et des sciences nucléaires, l'apprentissage automatique offre la possibilité d'optimiser la planification des expériences et d'appliquer les solutions de contrôle en temps réel nécessaires à une exploitation prolongée, sûre et efficace des installations en maximisant le volume et la pertinence des informations extraites de données d'expérience et de simulation.

168. L'intelligence artificielle peut également contribuer à la lutte contre le cancer tout en maintenant les coûts y afférents à un faible niveau. Elle vient ici appuyer le diagnostic et le traitement des cancers en améliorant l'interprétation des images et en affinant le contourage des tumeurs, ce qui permet de définir des traitements plus précis et de recourir à la radiothérapie adaptative — un processus de radiothérapie qui s'adapte aux variantes anatomiques internes propres à chaque patient. L'apprentissage automatique joue un rôle de plus en plus important dans le domaine de l'imagerie médicale lorsqu'il s'agit de prédire l'évolution d'une maladie et la réponse à un traitement. Elle est aussi appelée à occuper une place non négligeable dans l'initiative Action intégrée contre les zoonoses (ZODIAC) de l'Agence en ce qu'elle aidera les experts à prévoir, détecter, évaluer et maîtriser les futures flambées de zoonoses.

Tendances

169. Le recours accru à l'IA dans les sciences et applications nucléaires exige de conjuguer des efforts dans plusieurs disciplines, notamment en matière de conservation et de partage des informations, et de mener des activités de développement en toute transparence afin de coordonner et de soutenir la collaboration entre des chercheurs travaillant dans un large éventail de domaines.

170. Les technologies faisant appel à l'intelligence artificielle doivent pouvoir s'appuyer sur de solides partenariats internationaux et sur une coopération transversale pour définir les orientations en matière de réglementation, d'éthique et de formation théorique et pratique, ainsi que pour assurer le partage d'expériences, de connaissances et de bonnes pratiques. Cela suppose que les applications qui utilisent l'IA soient inclusives, justes et équitables, de façon à profiter à la société tout entière. Ce point revêt une importance particulière lorsqu'il s'agit de mettre l'IA au service de technologies nucléaires axées sur le développement durable et équitable au profit des générations présentes et à venir.

171. Consciente des avantages et des possibilités qu'offre l'IA, mais aussi des préoccupations qu'elle soulève, notamment en termes de transparence, de confiance, de sécurité et d'éthique, l'Agence appelle à un dialogue ouvert et à la collaboration pour encourager l'application de l'intelligence artificielle aux sciences et technologies nucléaires, afin de mieux aider les États Membres à utiliser ces dernières à des fins pacifiques.

172. L'initiative baptisée « L'Intelligence artificielle au service du bien social » mise sur pied par l'Union internationale des télécommunications (UIT) et 38 organismes des Nations Unies, dont l'Agence, est une plateforme numérique permanente qui vise à recenser des applications fondées sur l'IA en vue d'accélérer la réalisation des objectifs de développement durable (figure J.1). Les deux webinaires organisés par l'Agence en novembre 2021 dans le cadre de cette initiative, de même que la Réunion technique sur l'intelligence artificielle au service de la technologie et des applications nucléaires — une première —, qui s'est tenue en octobre 2021, ont permis d'avoir des échanges internationaux et transversaux concernant les sciences, la technologie et les applications nucléaires, de les recenser et de les promouvoir.



FIG. J-1. La plateforme « L'intelligence artificielle au service du bien social » rassemble 38 organisations des Nations Unies. (Photo : UIT)

173. Ces manifestations ont mis en lumière à quel point l'élaboration de bases de données et l'accessibilité des données pouvaient réellement faciliter les applications faisant appel à l'IA. Elles ont fait ressortir combien il était important de constituer, lorsque cela était possible, des référentiels fédérés et centralisés rassemblant des données soigneusement conservées nécessaires au développement d'applications fondées sur l'IA et l'apprentissage automatique, d'encourager l'apprentissage fédéré (qui manipule des algorithmes plutôt que des données) pour entraîner l'algorithme d'une base de données sur une autre base de données, et de constituer des bibliothèques de documents réunissant des références pour l'IA et l'apprentissage automatique dans le domaine des technologies et applications nucléaires.

174. L'Agence souhaite jeter les bases d'une innovation permanente fondée sur l'IA dans le domaine des sciences et des applications nucléaires ; elle envisage pour ce faire de mettre sur pied une plateforme de partage de connaissances intitulée « L'intelligence artificielle au service de l'atome », d'apporter son soutien aux dispositifs de réglementation et de formation en la matière, et d'encourager le respect des principes éthiques que cela appelle.

Annexe

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde^a

Pays	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2021		Expérience d'exploitation totale en 2021	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
Afrique du Sud	2	1 854			12,2	6,0	74	3
Allemagne	3	4 055			65,4	11,9	830	11
Argentine	3	1 641	1	25	10,2	7,2	94	2
Arménie	1	448			1,9	25,3	47	8
Bangladesh			2	2 160	S/O	S/O		
Bélarus	1	1 110	1	1 110	5,4	14,1	1	2
Belgique	7	5 942			48,0	50,8	317	7
Bésil	2	1 884	1	1 340	13,9	2,4	61	3
Bulgarie	2	2 006			15,8	34,6	171	3
Canada	19	13 624			86,8	14,3	807	6
Chine	53	50 034	16	15 967	383,2	5,0	470	0
Corée, République de	24	23 091	4	5 360	150,5	28,0	620	2
Émirats arabes unis	2	2 762	2	2 690	10,1	1,3	1	9
Espagne	7	7 121			54,2	20,8	357	1
États-Unis d'Amérique	93	95 523	2	2 234	771,6	19,6	4 694	4
Fédération de Russie	37	27 727	4	3 759	208,4	20,0	1 410	7
Finlande	4	2 794	1	1 600	22,6	32,8	171	4
France	56	61 370	1	1 630	363,4	69,0	2 393	0
Hongrie	4	1 916			15,1	46,8	146	2
Inde	22	6 795	8	6 028	39,8	3,2	554	9
Iran, République islamique d'	1	915	1	974	3,2	1,0	10	4
Japon	33	31 679	2	2 653	61,3	7,2	1 965	6
Mexique	2	1 552			11,6	5,3	59	11
Pakistan	5	2 242	1	1 014	15,8	10,6	92	11
Pays-Bas	1	482			3,6	3,1	77	0
République tchèque	6	3 934			29,0	36,6	182	10
Roumanie	2	1 300			10,4	18,5	39	11
Royaume-Uni	12	7 343	2	3 260	41,8	14,8	1 648	6
Slovaquie	4	1 868	2	880	14,6	52,3	180	7
Slovénie	1	688			5,4	36,9	40	3
Suède	6	6 882			51,4	30,8	480	0
Suisse	4	2 960			18,6	28,8	232	11
Türkiye			3	3 342	S/O	S/O	S/O	S/O
Ukraine	15	13 107	2	2 070	81,1	55,0	548	6
Total ^{b,c}	437	389 508	56	58 096	2 653,1	S/O	19 170	9

Note : « S/O » signifie « sans objet ».

^a Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'Agence (www.iaea.org/pris) au 31 mai 2022.

^b Le total inclut les chiffres suivants pour Taïwan (Chine) : 3 tranches, 2 859 MWe en service et 26,8 TW·h d'électricité fournie, ce qui représente 10,8 % du bouquet énergétique.

^c L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois) et en Lituanie (43 ans et 6 mois), ainsi que des centrales à l'arrêt et des centrales en exploitation à Taïwan (Chine) (236 ans et 8 mois).

Tableau D-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde¹⁹

Type d'application ^a	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Formation théorique/pratique	162	50
Analyse par activation neutronique	117	49
Production de radio-isotopes	83	41
Neutronographie	69	37
Irradiation de matériaux/combustible	68	26
Diffusion neutronique	44	28
Géochronologie	24	21
Transmutation (dopage de silicium)	23	15
Transmutation (gemmes)	20	12
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	15	11
Mesure de données nucléaires	14	7
Autres ^c	118	34

^a La publication de l'Agence intitulée *Applications of Research Reactors* (IAEA Nuclear Energy Series n° NP-T-5.3, Vienna, 2014) décrit ces applications de manière plus détaillée.

^b Sur les 235 réacteurs de recherche considérés (220 en service, 15 provisoirement à l'arrêt, en décembre 2021).

^c Comme l'étalonnage et les essais d'instruments, les expériences de blindage, la création de sources de positrons et les études sur l'incinération des déchets nucléaires.

Abréviations et acronymes

ASN	Autorité française de sûreté nucléaire
BioPAN	Bioinformatics Methodology for Pathway Analysis
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
COP26	26 ^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (2021)
COP27	27 ^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (2022)
COVID-19	maladie à coronavirus 2019
DTT	Divertor Tokamak Test facility
EDF	Électricité de France
ESS	source de spallation européenne
EURECA	plateforme européenne récupérable
EXPOSE	Externally mounted payloads for 1st utilization phase
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEPC	Fédération japonaise des producteurs d'électricité
GWe	gigawatt électrique
GW·h	gigawatt-heure
HALEU	uranium faiblement enrichi de haute densité
HTR	réacteur à haute température
HTTR	réacteur expérimental à haute température
IA	intelligence artificielle
INIR	Examen intégré de l'infrastructure nucléaire
ISS	Station spatiale internationale
JEM	Japanese Experiment Module
LDEF	Long Duration Exposure Facility
MOX	(combustible) à mélange d'oxydes
MWe	mégawatt (électrique)
MWth	mégawatt (thermique)
NNL	Laboratoire nucléaire national (Royaume-Uni)
NPM	Power Module de NuScale
NRC	Commission de la réglementation nucléaire
NUTEC Plastics	Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique
O/OREOS	Organism/Organic Exposure to Orbital Stresses
PET	tomographie à émission de positons
PTI	plan de travail intégré
R-D	recherche-développement
REL P	réacteur à eau lourde sous pression
REO	réacteur à eau ordinaire
REP	réacteur à eau sous pression
RESC	réacteur refroidi par eau supercritique
RFMP	réacteur de faible ou moyenne puissance ou petit réacteur modulaire
RNR-Na	réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
SESLO	Space Environment Survivability of Live Organisms
SMA	spectrométrie de masse par accélérateur
SMART	réacteur avancé modulaire intégré
STEP	Spherical Tokamak for Energy Production
t ML	tonnes de métaux lourds
UFE	uranium faiblement enrichi
UHE	uranium hautement enrichi
UIT	Union internationale des télécommunications
ZODIAC	Action intégrée contre les zoonoses



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique
L'atome pour la paix et le développement

Agence internationale de l'énergie atomique
Centre international de Vienne, B.P. 100
1400 Vienne (Autriche)
Téléphone : (+43-1) 2600-0
Fax : (+43-1) 2600-7
Mél. : Official.Mail@iaea.org
www.iaea.org