



Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire ■ 2021

Rapport du Directeur général



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

L'atome pour la paix et le développement

GC(65)/INF/2

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2021

Rapport du Directeur général

GC(65)/INF/2

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Septembre 2021
IAEA/NTR/2021

Contents

Avant-propos	5
Résumé	7
A. Énergie d'origine nucléaire	10
A.1. Projections relatives à l'électronucléaire	10
A.2. Centrales nucléaires en exploitation	11
A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion	15
A.4. Développement de la technologie électronucléaire	18
A.4.1 Réacteurs avancés refroidis par eau	18
A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires et microréacteurs	19
A.4.3 Systèmes à neutrons rapides	23
A.4.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire	24
A.4.5. Recherche sur la fusion nucléaire et développement de technologies pour la production d'énergie future	27
B. Cycle du combustible nucléaire	30
B.1. Partie initiale	30
B.2. Partie terminale	33
C. Déclassement, remédiation de l'environnement et gestion des déchets radioactifs	34
C.1. Déclassement	34
C.2. Remédiation de l'environnement	38
C.3. Gestion des déchets radioactifs	39
D. Réacteurs de recherche et accélérateurs de particules	43
D.1. Réacteurs de recherche	43
D.2. Accélérateurs de particules et instrumentation	47
E. Alimentation et agriculture	50
E.1. Marquage isotopique et techniques nucléaires innovantes pour la mesure des résidus dans l'alimentation – Répondre aux besoins en matière de santé publique et de commerce	50
F. Santé humaine	52
F.1. Avancées en microdosimétrie et en nanodosimétrie	52
G. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements	54
G.1. Le rôle des radiopharmaceutiques dans la détection, le diagnostic et la prise en charge des maladies infectieuses	54
H. Environnement	57
H.1. Techniques nucléaires et dérivées au service d'une meilleure connaissance du carbone bleu dans le monde et de la lutte contre les effets du changement climatique	57
Annexe	61

Avant-propos

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2021* couvre les domaines suivants : énergie d'origine nucléaire, cycle du combustible nucléaire, déclassé, remédiation de l'environnement et gestion des déchets radioactifs, réacteurs de recherche et accélérateurs de particules, techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, radio-isotopes et technologies des rayonnements, et enfin environnement.
- Le projet de rapport a été soumis à la réunion du Conseil des gouverneurs de mars 2021 (document GOV/2021/2). La version finale définitive a été établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.

Résumé

1. Les projections de l'Agence pour 2020 sont restées largement conformes à celles de l'année précédente. Dans l'hypothèse haute, la capacité mondiale de production d'électricité d'origine nucléaire devait augmenter de 82 % pour atteindre 715 gigawatts (électriques) (GWe) d'ici à 2050, soit 11 % de la production mondiale d'électricité, contre environ 10 % en 2019. Dans l'hypothèse basse, elle devait diminuer de 7 % pour tomber à 363 GWe, soit 6 % de la production mondiale d'électricité.
2. À la fin de 2020, la capacité nucléaire mondiale totale était de 392,6 GWe, que produisaient 442 réacteurs nucléaires de puissance en service dans 32 pays. Le secteur nucléaire s'est adapté aux lignes directrices nationales en ce qui concerne la pandémie de maladie à coronavirus (COVID-19) en prenant des mesures efficaces. Au début de la pandémie, à l'orée de 2020, l'Agence a créé le Réseau sur l'expérience d'exploitation des centrales nucléaires concernant la COVID-19 pour faciliter l'échange d'informations sur les mesures destinées à atténuer la pandémie et ses effets sur l'exploitation des centrales nucléaires. Aucun des 32 pays exploitant des centrales nucléaires n'a fait état de répercussions de la pandémie sur la sûreté et la fiabilité de l'exploitation des centrales nucléaires.
3. Source d'énergie propre, fiable, durable et moderne, l'électronucléaire contribue considérablement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre du monde entier, tout en répondant à sa demande d'énergie croissante et en soutenant le développement durable et le relèvement après la pandémie de COVID-19. En 2020, l'électronucléaire a fourni 2 553,2 térawatt-heures d'électricité, soit près d'un tiers de la production mondiale d'électricité bas carbone. On considère généralement que l'électronucléaire devra jouer un rôle de premier plan pour faire face aux difficultés de la transition vers une énergie propre.
4. Quelque 5,5 GWe de nouvelle capacité nucléaire ont été produits du fait de la connexion au réseau de cinq nouveaux réacteurs à eau sous pression au Bélarus, en Chine, aux Émirats arabes unis et en Fédération de Russie. Le démarrage de Belarusian-1 au Bélarus et de Barakah-1 aux Émirats arabes unis a marqué le début de la production d'électricité d'origine nucléaire dans ces deux pays.
5. Les activités menées à l'échelle mondiale pour développer la technologie des réacteurs de faible ou moyenne puissance ou des petits réacteurs modulaires (RFMP) en vue d'une implantation à court terme ont nettement progressé. L'exploitation commerciale de l'Akademik Lomonosov, premier réacteur avancé de faible ou moyenne puissance et unique centrale nucléaire flottante au monde, a commencé en Fédération de Russie. Plus de 70 modèles de RFMP fondés sur les principales technologies étaient en gestation aux fins de différentes applications dans le monde.
6. 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. Aux États-Unis d'Amérique, les licences d'exploitation des tranches Peach Bottom-2 et -3 ont été renouvelées, ouvrant la voie à une exploitation sûre et sécurisée pour 60 à 80 autres années.
7. Au total, 27 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 implanter des centrales nucléaires d'ici à 2035, ajoutant ainsi au niveau mondial une capacité de production estimée à 26 GWe.
8. Les spécialistes de la fusion ont célébré le début de l'assemblage et de l'intégration d'ITER après plus de dix années d'un processus de construction complexe. Une fois en exploitation, ITER fournira la

plupart des données scientifiques et technologiques de base nécessaires à la mise au point et à la conception de réacteurs à fusion destinés à la production d'énergie.

9. Du fait de la pandémie mondiale de COVID-19, plusieurs grands producteurs d'uranium ont suspendu leurs activités ou fortement réduit leur production. Dans l'ensemble, en 2020, l'offre d'uranium provenant de sources primaires a diminué, ce qui met sous tension les ressources secondaires pour répondre à la demande d'uranium en tant que combustible nucléaire.

10. Durant la pandémie de COVID-19, il a été déclaré que les réacteurs de recherche produisant des radio-isotopes médicaux pour la communauté mondiale fournissaient des services essentiels pour réduire au minimum l'effet des restrictions dues à la pandémie.

11. Bien que les RFMP continuent de susciter un intérêt considérable, les grands réacteurs avancés refroidis par eau devraient constituer la majeure partie des nouvelles capacités ajoutées au cours des trente prochaines années. Pour que la projection de l'hypothèse haute de l'Agence se concrétise, il faudrait que le taux annuel de connexion au réseau soit au moins de 16 GWe jusqu'en 2050. Il faudrait néanmoins relever un certain nombre de défis pour faciliter les projets de nouvelles constructions, notamment réduire les coûts et renforcer la normalisation pour améliorer la compétitivité, et faire en sorte que des financements soient accessibles dans des conditions identiques à celles des autres sources d'énergie bas carbone.

12. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour d'autres fins que la production d'électricité gagne du terrain dans le secteur de l'énergie nucléaire en raison de la part croissante des énergies renouvelables variables connectées au réseau. Au total, 64 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation ont produit 3 396,4 gigawatt-heures (GW·h) d'équivalent électrique de la chaleur pour des applications non électriques. Cinquante-six réacteurs ont contribué au chauffage urbain et aux applications liées à la chaleur industrielle et 8 ont facilité le dessalement. En plus de contribuer à la décarbonation des secteurs d'utilisation finale, comme le transport, l'industrie et le logement, la cogénération nucléaire est apparue de plus en plus comme un argument économique contre la mise hors service précoce de certaines centrales nucléaires non rentables. La production nucléaire d'hydrogène à l'aide de réacteurs refroidis à l'eau à basse température devait continuer de susciter un intérêt jusqu'à la phase de commercialisation.

13. Des progrès majeurs ont été constatés en ce qui concerne les installations de stockage définitif en formations géologiques profondes dont on a besoin pour les déchets de haute activité et le combustible usé déclaré comme déchet. L'Autorité finlandaise de sûreté radiologique et nucléaire a annoncé que la Finlande entendait commencer le stockage définitif de combustible nucléaire usé vers le milieu des années 2020. En Suède, le conseil municipal d'Östhammar a voté en faveur de l'implantation d'un dépôt prévu pour le stockage définitif de combustible nucléaire usé à Forsmark.

14. Alors qu'au cours des décennies précédentes, le démantèlement différé était la stratégie de déclassement majoritairement adoptée par les propriétaires d'installations, le démantèlement immédiat gagne en popularité. Les délais pour le début du démantèlement final de centrales retirées du service ont été de plus en plus raccourcis, le souci étant de réduire les incertitudes relatives aux coûts de leur déclassement.

15. L'intérêt pour les réacteurs de recherche a continué de croître dans le monde. De nombreux pays ont tiré profit des possibilités d'accès au parc de ces réacteurs, offertes notamment grâce aux sessions régionales d'écoles que l'Agence organise pour la création de capacités dans ce domaine et le programme des centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR). En 2020, l'Institut de recherche nucléaire Pitesti en Roumanie a été désigné pour la première fois comme un tel centre, tandis que la désignation du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives était renouvelée pour une nouvelle période de cinq ans.

16. Au cours du processus de production alimentaire, des produits chimiques tels que les médicaments vétérinaires et les pesticides sont utilisés pour prévenir et traiter les parasites et les maladies des animaux et des plantes. Leurs résidus subsistant dans les aliments, qui peuvent susciter des préoccupations au regard de la santé publique et du commerce, font donc l'objet d'une réglementation qui en prescrit les concentrations maximales autorisées dans ou sur les denrées alimentaires. Les composés radiomarqués jouent un rôle primordial, car ils permettent de tracer et d'étudier tous les résidus chimiques dans divers tissus. Ces études sont capitales pour l'établissement de normes acceptables. La production de nouveaux médicaments et produits chimiques augmentant, la demande de réglementation de ces produits à l'aide de techniques d'analyse innovantes et rentables ne cesse de croître.

17. La microdosimétrie, sous-domaine de la physique des rayonnements, traite de l'étude systématique de la distribution spatiale de l'énergie absorbée dans des structures microscopiques au sein de la matière irradiée. Bien qu'elle ait vu le jour il y a plus de 60 ans, elle continue de susciter l'intérêt des scientifiques en médecine radiologique, en radioprotection, en radiobiologie et dans d'autres domaines tels que la recherche spatiale. En médecine radiologique, elle est particulièrement intéressante pour la thérapie par faisceaux d'ions, technique de pointe qui consiste à cibler plusieurs tumeurs avec des faisceaux de protons et d'ions carbone pour les détruire tout en réduisant le plus possible les effets dommageables sur les tissus sains.

18. Les maladies infectieuses sont une menace pour les êtres humains. Dans les disciplines scientifiques, on s'attache essentiellement à mieux comprendre ces maladies à l'aide de technologies avancées faisant appel à des radiopharmaceutiques. De nouveaux radiopharmaceutiques préparés avec des anticorps monoclonaux spécifiques de micro-organismes en sont à un stade où la visualisation non invasive des processus cellulaires et biochimiques devient possible, ce qui permet d'améliorer le diagnostic et les méthodes thérapeutiques pouvant être retenues pour le traitement des maladies infectieuses.

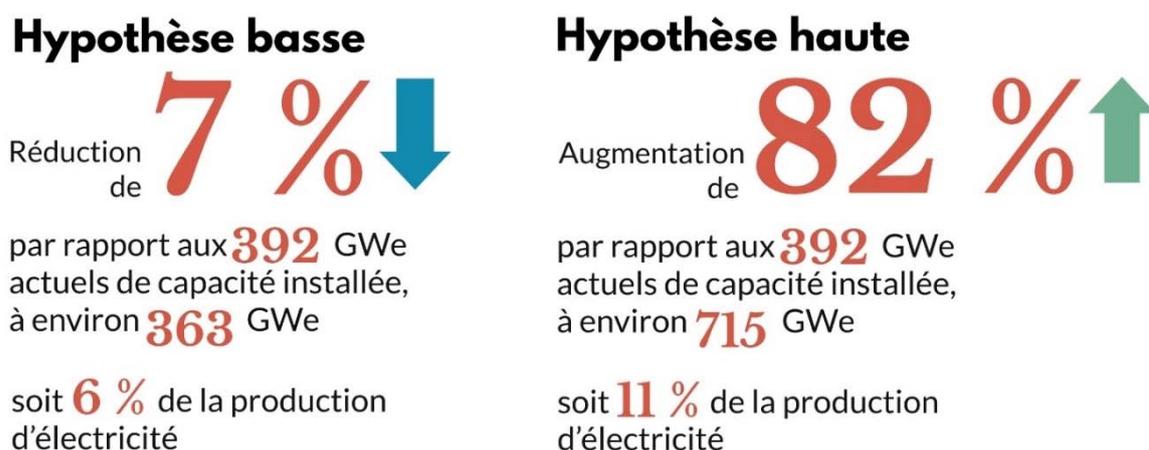
19. L'augmentation rapide des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, depuis la fin du XIX^e siècle contribue au réchauffement climatique. Les océans et les écosystèmes côtiers végétalisés ont un bon potentiel de séquestration du carbone organique, car ils peuvent capturer et stocker le dioxyde de carbone à l'écart de l'atmosphère, ralentissant ainsi le réchauffement climatique. Le carbone organique capturé et stocké par les océans est connu sous le nom de carbone bleu. Les techniques nucléaires et dérivées jouent un rôle déterminant pour l'évaluation des carbonates et des macroalgues dans le cycle du carbone bleu, la détermination de la provenance du carbone, la compréhension des facteurs qui ont des incidences sur la séquestration dans les écosystèmes de carbone bleu et les budgets correspondants à prévoir, ainsi que dans les mesures de gestion qui favorisent les stratégies concernant le carbone bleu.

A. Énergie d'origine nucléaire

A.1. Projections relatives à l'électronucléaire

Situation

1. Les projections de l'Agence pour 2020¹ étaient dans l'ensemble identiques à celles de l'année précédente. Dans l'hypothèse basse, la capacité mondiale de production d'électricité d'origine nucléaire diminuerait de 7 % d'ici à 2050 pour tomber à 363 GWe², soit 6 % de la production d'électricité mondiale, contre environ 10 % en 2019. Dans l'hypothèse haute, elle augmenterait de 82 % pour atteindre 715 GWe, soit 11 % de la production mondiale d'électricité.



2. Pour que la projection de 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 en faveur de l'augmentation des capacités – de l'ordre de 500 GWe sur 30 ans. Plus de 16 GWe de nouvelles capacités devront être couplées chaque année jusqu'en 2050, soit pratiquement le triple des connexions observées en moyenne entre 2010 et 2019. Cet objectif, certes ambitieux, ne représenterait pourtant que la moitié des connexions annuelles relevées au milieu des années 1980, qui s'élevaient à 30 GWe par an, un record.

Tendances

3. Les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP) suscitent un intérêt considérable et croissant, en particulier en vue d'une implantation dans des lieux isolés ou dans les pays dotés d'un réseau de faible capacité. Néanmoins, ce sont les grands réacteurs avancés refroidis par eau qui devraient représenter la majeure partie des nouvelles capacités au cours des trente prochaines années, car ils permettent d'accroître rapidement les capacités de production d'énergie sobre en carbone dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Le secteur nucléaire fait face à plusieurs défis à cet égard. Il lui faut notamment gagner en compétitivité en réduisant les coûts et en améliorant la normalisation, mais aussi faire en sorte de bénéficier d'un accès aux financements comparable à celui des autres sources d'énergie sobres en carbone.

¹ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series No. 1, IAEA, Vienna (2020).

² Un GWe (gigawatt électrique) correspond à un milliard de watts d'énergie électrique.

4. Un fort soutien des pouvoirs publics porté par la reconnaissance du rôle de l'électronucléaire en tant que système énergétique sobre en carbone³, à la fois résistant et fiable, sera nécessaire. Pour que l'électronucléaire devienne plus attractif aux yeux des investisseurs, il conviendrait aussi de mieux faire connaître ses contributions à la décarbonisation d'autres secteurs énergétiques, notamment grâce à la production d'hydrogène propre.

A.2. Centrales nucléaires en exploitation

Situation

5. À la fin de 2020, la capacité nucléaire mondiale totale était de 392,6 GWe⁴, que produisaient 442 réacteurs nucléaires de puissance en service dans 32 pays (tableau A-1 en annexe). Les pays ont démontré leur capacité d'adaptation face à la pandémie de maladie à coronavirus (COVID-19) en prenant des mesures efficaces, qui témoignent d'une solide culture organisationnelle. Au début de la pandémie, à l'orée de 2020, l'Agence a créé le Réseau sur l'expérience d'exploitation des centrales nucléaires concernant la COVID-19 (Réseau COVID-19 NPP OPEX) consacré à l'échange d'informations sur les mesures prises pour atténuer la pandémie et ses effets sur l'exploitation des centrales nucléaires. Aucun des 32 pays exploitant des centrales nucléaires 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.

L'électronucléaire aide les États Membres à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre

Utilisé dans **32** pays, l'électronucléaire fournit

environ **1/3** de l'électricité bas carbone dans le monde.

L'électronucléaire réduit les émissions de dioxyde de carbone d'environ **2** gigatonnes par an,

la même quantité que si on retirait de la circulation **400** millions de voitures chaque année.

L'électronucléaire a évité des émissions à hauteur de **55** gigatonnes de dioxyde de carbone depuis plus de 50 ans.

³ L'électronucléaire évite la production de près de deux gigatonnes de dioxyde de carbone chaque année.

⁴ Ensemble des données sur les réacteurs nucléaires de puissance communiquées au Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'AIEA au 1 juin 2021.

6. Source d'énergie propre, fiable, durable et moderne, l'électronucléaire contribue considérablement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre du monde entier, tout en répondant à sa demande d'énergie croissante et en soutenant le développement durable et le relèvement après la pandémie de COVID-19. En 2020, l'électronucléaire a permis de fournir environ 2 553,2 TW·h d'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, soit environ 10 % du total de la production mondiale d'électricité et près d'un tiers de la production mondiale d'électricité bas carbone.

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

Couplages au réseau en 2020

Barakah-1
 1 345 MWe

Belarussian-1
 1 110 MWe

Leningrad 2-2
 1 066 MWe

Fuqing-5
 1 000 MWe

Tianwan-5
 1 000 MWe

Belarussian-1



Type	Modèle
REP	VVER V-491
Capacité nette	Mise en chantier
1 110 MWe	8 nov. 2013
Première criticité	Premier couplage au réseau
11 oct. 2020	3 nov. 2020
Missions INIR 1+2	Mission INIR 3
2012	2020

Barakah-1



Type	Modèle
REP	APR-1400
Capacité nette	Mise en chantier
1 345 MWe	19 juil. 2012
Première criticité	Premier couplage au réseau
31 juil. 2020	19 août 2020
Mision INIR 2	Mision INIR 3
2011	2018

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

9. Les réacteurs modérés et refroidis à l'eau ordinaire ont représenté 89,5 % de la capacité nucléaire en service, les réacteurs modérés et refroidis à l'eau lourde 6 %, les réacteurs refroidis par eau ordinaire et modérés au graphite 2 %, et les réacteurs refroidis par gaz les 2 % restants. Les 0,5 % restants correspondaient à trois réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide.

10. 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. Aux États-Unis d'Amérique, les licences d'exploitation des tranches Peach Bottom-2 et -3 ont été renouvelées, ouvrant la voie à une exploitation sûre et sécurisée pour 60 à 80 autres années.

11. Les projets de rénovation et de mise à niveau substantielle se sont poursuivis, malgré les difficultés occasionnées par la pandémie de COVID-19. Par exemple, la rénovation de Darlington-2 au Canada et la modernisation des systèmes de contrôle et d'urgence de Doel-1 et Doel-2 en Belgique ont été menées à bien pendant cette période. Aux États-Unis d'Amérique, Grand Gulf-1 a de nouveau été couplé au réseau après un arrêt planifié pour renouvellement du combustible et maintenance, qui a été notamment l'occasion de procéder à la mise à niveau de matériel et à la modernisation du circuit de réglage et contrôle turbine de la centrale.

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

Expérience d'exploitation cumulée des réacteurs nucléaires dans le monde

18 772 années-réacteur
totalisant une capacité de **479,9** GWe

 **634**
réacteurs

 **35**
pays
à avoir déjà exploité
une centrale nucléaire

Tendances

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

14. L'exploitation à long terme est indispensable pour assurer le passage à des systèmes de production d'électricité à faibles émissions 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 faibles émissions de carbone sûre et sécurisée la moins coûteuse. Certains réacteurs ont néanmoins été mis à l'arrêt au cours des dix dernières années, et d'autres seront probablement fermés à court terme pour des raisons économiques, même si des exploitants voient leur licence d'exploitation prolongée. C'est plus particulièrement le cas aux États-Unis d'Amérique, où une dizaine de réacteurs ont été mis à l'arrêt pour des raisons économiques ces derniers dix ans, par manque de compétitivité face aux faibles coûts du gaz de schiste ou des énergies renouvelables subventionnées. Dans certaines parties du pays, des mécanismes de marché ont été mis en place, notamment des crédits zéro émission destinés à valoriser la contribution de l'électronucléaire à la décarbonisation du bouquet énergétique et à maintenir en service les centrales actuelles. Dans d'autres parties du monde, les décisions stratégiques qui seront prises à cet égard joueront probablement un rôle déterminant pour l'exploitation à long terme des réacteurs existants.

15. Par ailleurs, la chaîne d'approvisionnement du secteur électronucléaire reste soumise à quelques incertitudes. La cessation d'activités dans des branches considérées comme non essentielles à court terme aura des incidences encore inconnues sur la continuité à moyen et à long terme de l'approvisionnement des réacteurs nucléaires dans le monde. 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

16. La capacité nucléaire installée en cours de construction n'a pas connu d'évolution majeure au cours des dernières années, le nombre de mises en chantier ayant diminué en 2020. Dans la région Asie, l'électronucléaire a continué de croître de façon constante avec le couplage au réseau de 64 réacteurs cumulant 58,5 GWe de capacité opérationnelle depuis 2005.

17. Sur les 32 pays qui y ont recours, 19 mènent des projets consacrés au développement de leurs capacités nucléaires. C'est notamment le cas du Bélarus et des Émirats arabes unis, qui ont couplé au réseau leur premier réacteur nucléaire de puissance en 2020. Ces projets ont représenté une capacité totale de 54,4 GWe, produits par 52 nouveaux réacteurs.

Projets de réacteurs dans le cadre de programmes électronucléaires existants

54,4 GWe  **52**
produits par **52**
nouveaux réacteurs

dont les suivants :

 Zhangzhou-2 Taipingling-2
1 126 MWe **1 116 MWe**

Sanaocun-1
1 117 MWe

18. Les restrictions aux déplacements et les fermetures de frontières dues à la COVID-19 ont posé des difficultés aux entreprises accompagnant les projets de nouveaux chantiers. Il a donc été plus largement fait appel à la vérification à distance et hybride. Certains organismes de réglementation nationaux ont employé des méthodes innovantes pendant la pandémie ou ajusté la portée des inspections réglementaires en fonction de leur importance du point de vue de la sûreté.

19. Parmi les 50 États Membres qui ont déclaré souhaiter recourir à l'électronucléaire, 23 sont au stade pré-décisionnel et mènent des activités de planification énergétique. Les 27 autres s'emploient à introduire l'électronucléaire :

- dix-sept en sont à la phase décisionnelle, c'est-à-dire qu'ils envisagent de recourir à l'électronucléaire, dont certains préparent activement l'infrastructure sans avoir pris de décision (Algérie, Bolivie, Chili, El Salvador, 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'après avoir pris une décision, ils mettent sur pied l'infrastructure, ou ayant signé un contrat, ils préparent les travaux de construction, voire les ont déjà engagés (Arabie saoudite, Bangladesh, Égypte, Ghana, Kenya, Jordanie, Nigeria, Ouzbékistan, Pologne, Turquie).



20. D'après les plans nationaux actuels des 27 États Membres susmentionnés, 10 à 12 pays primo-accédants devraient recourir à l'électronucléaire d'ici à 2035, soit une augmentation d'environ 30 % du nombre d'États Membres exploitant actuellement des centrales (32). Selon les estimations, les capacités de production supplémentaires de ces pays devraient s'élever à environ 26 GWe d'ici à 2035.

d'après les plans
nationaux actuels de **27** États Membres

10 à 12 pays primo-accédants
devraient produire de
l'énergie d'origine nucléaire
d'ici à **2035**

soit une augmentation d'environ **30 %** du nombre
d'États Membres exploitant actuellement des centrales (**32**)

les capacités de production supplémentaires
apportées par ces pays primo-accédants sont **26 GWe**
estimées à environ

21. En 2020, en raison des restrictions dues à la pandémie de COVID-19, une seule mission d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) a pu être menée, au Bélarus (phase 3). Les autres missions planifiées ont été reportées à 2021 à la demande des gouvernements concernés : Kenya (suivi - phase 1), Ouganda (phase 1), Ouzbékistan (phase 2) et Sri Lanka (phase 1). Par ailleurs, 15 États Membres mettaient activement en œuvre des plans de travail intégrés (PTI). Si les examens annuels des PTI de certains États Membres ont pu être réalisés avant que les restrictions aux déplacements dues à la COVID-19 n'entrent en vigueur, ceux des autres États Membres se sont déroulés au cours de réunions en ligne.

22. Au Bangladesh, d'importants équipements destinés à la centrale nucléaire de Rooppur ont été livrés et la cuve sous pression du réacteur a été forgée et testée début 2020. Les dates de mise en service ont été fixées à 2023. En 2020, la construction de deux tranches s'est poursuivie à la centrale nucléaire d'Akkuyu (Turquie). La cuve sous pression du réacteur 1 a été acheminée depuis l'usine de fabrication et quatre générateurs de vapeur ont été livrés sur le site. La première tranche devrait entrer en service en 2023. En Égypte, une fois accordée l'autorisation concernant le site de la centrale nucléaire à quatre tranches d'El Dabaa, la préparation du site s'est poursuivie en vue des travaux de construction. La construction de la première tranche devrait débuter pendant le second semestre de 2021, sous réserve de l'approbation de l'organisme de réglementation.

23. En Arabie saoudite, le processus d'appel d'offres pour la première des deux grandes tranches de 1 000 à 1 600 MWe de la centrale nucléaire devrait commencer avant la fin de 2021, et le fournisseur des technologies de la centrale devrait être sélectionné en 2024, la mise en service de la première tranche étant prévue pour 2036.

24. La Pologne a décidé de construire des centrales nucléaires dotées de grands REP pour un total de 6,0 à 9,0 GWe de capacité installée. La construction de la première centrale nucléaire devrait commencer en 2026, pour une mise en service prévue en 2033.

25. La Jordanie mène deux stratégies en parallèle dans le cadre de son programme électronucléaire, l'une axée sur des RFMP et l'autre sur une grande centrale nucléaire (1 000 MWe sur un modèle de construction-exploitation-cession/construction-propriété-exploitation-cession), en donnant la priorité aux RFMP. La première coulée de béton devrait avoir lieu d'ici 2026, en vue d'une exploitation commerciale en 2031.

26. En Ouzbékistan, la construction de centrales nucléaires totalisant une capacité installée de 2,400 GWe devrait commencer d'ici la fin de 2022. Le Ghana prévoit de lancer la construction de sa première centrale nucléaire en 2023, pour une mise en service en 2029. Le Kenya s'est doté d'un nouvel organisme, l'Agence de l'électronucléaire et de l'énergie, et un rapport d'évaluation stratégique de l'environnement a été publié en vue de consultations publiques, l'implantation de la centrale nucléaire étant prévue d'ici 2035. En juillet 2020, les Philippines ont publié un décret portant création du Comité inter-institutions chargé du programme d'énergie nucléaire, qui devra étudier la faisabilité d'un recours à l'électronucléaire. Sri Lanka a déposé une demande officielle de mission INIR.

Tendances

27. Les projets de nouvelles mises en chantier, qu'ils soient menés dans des pays faisant déjà appel à l'électronucléaire ou dans des pays primo-accédants, sont confrontés à deux problèmes sur le plan économique : la compétitivité de l'électronucléaire face aux technologies des énergies renouvelables et l'accès aux financements pour couvrir les investissements nécessaires aux projets électronucléaires.

28. Au cours des dix dernières années, ces projets ont été relativement peu nombreux, et le secteur nucléaire n'a pas encore bénéficié de ces réductions de coûts majeures dont ont fait l'objet les technologies des énergies renouvelables, dont l'implantation a été favorisée par un soutien politique et financier considérable. La compétitivité de l'électronucléaire en a pâti, compte tenu de la normalisation des coûts. Cependant, il est de plus en plus clair que les coûts des différentes technologies devraient également englober le coût de leur intégration aux futurs systèmes électriques, notamment ceux associés au réseau, ainsi qu'aux systèmes d'appoint ou au stockage de l'énergie. À l'échelle du système, l'électronucléaire peut donc être compétitif face aux énergies renouvelables et aux solutions de stockage. De plus, le secteur nucléaire voit qu'il est possible de réduire les coûts de construction en simplifiant les modèles, en intensifiant la normalisation, en assurant une meilleure supervision de la chaîne d'approvisionnement et en tirant pleinement parti des enseignements tirés de projets inédits.

29. Le second problème est celui de l'accès aux financements. Les projets de nouvelles mises en chantier de centrales nucléaires étant par nature à forte intensité de capital, peu d'entreprises de services publics sont en mesure d'en financer sur leurs fonds propres. L'aide des pouvoirs publics peut faciliter la mobilisation de fonds de nombreuses manières, en atténuant les risques pour les concepteurs des projets, tant pendant la construction que pendant l'exploitation, pour assurer des recettes quand les conditions de marché sont incertaines, par exemple grâce à des accords d'achat d'énergie (AAE). (Dans le cadre de ces AAE, l'acheteur s'engage à acquérir une quantité d'électricité définie par contrat à un prix fixe couvrant l'ensemble des coûts du projet ainsi qu'une marge, faute de quoi il doit s'acquitter d'une amende.)

30. Plusieurs pays primo-accédants ont inclus des modèles de RFMP dans leurs évaluations des technologies, notamment l'Arabie saoudite, l'Estonie, le Ghana, la Jordanie, le Kenya et le Soudan. Ces modèles peuvent être avantageux par rapport aux grands réacteurs pour plusieurs raisons : montant d'investissement initial moins élevé, possibilité de couplage à des réseaux de faible capacité et modularité extensible. Si le développement des RFMP se confirmait au cours des quelque dix prochaines années, un nombre croissant de pays primo-accédants pourraient être incités à les prendre en considération.

A.4. Développement de la technologie électronucléaire

A.4.1 Réacteurs avancés refroidis par eau

Situation

31. Les réacteurs refroidis par eau ont toujours tenu une place importante dans le secteur nucléaire commercial, et la grande majorité des réacteurs nucléaires en construction dans le monde sont refroidis par eau ordinaire.

32. Les réacteurs avancés refroidis par eau sont aussi de plus en plus envisagés, étudiés et déployés dans des pays souhaitant développer progressivement des cycles du combustible de pointe plus efficaces, en partie ou totalement fermés. Plusieurs États Membres mènent actuellement des activités de recherche-développement (R-D) sur les réacteurs refroidis par eau supercritique (RESC). Les études

de conception du RESC canadien – réacteur à tubes de force modéré à l'eau lourde – et du réacteur chinois CSR1000 ont été achevées. En Europe, le concept de réacteur à eau ordinaire de haute performance (HPLWR) a vu le jour, et une installation d'essai de la qualification de combustible en réacteur a été planifiée, conçue et passée en revue en collaboration avec la Chine. En Fédération de Russie, des études de fond étaient en cours concernant un réacteur innovant de puissance refroidi et modéré par eau (VVER) supercritique, dont notamment la faisabilité d'un cœur à spectre rapide.

Tendances

33. 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'efforçait d'augmenter encore lors de la conception de grands réacteurs évolutifs refroidis par eau. La tendance est clairement en faveur de sites à plusieurs tranches dotés d'un seul type de réacteur ou de plusieurs différents, soulignant ainsi l'importance des économies d'échelle pour les réacteurs nucléaires commerciaux. Dans les pays primo-accédants qui envisagent de construire des centrales nucléaires, les premiers réacteurs seront probablement des réacteurs avancés refroidis par eau.

A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires et microréacteurs

Situation

34. Fin 2020, 16 États Membres au moins 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. Les activités menées dans le monde pour développer la technologie des RFMP en vue d'une implantation à court terme ont nettement progressé. Des étapes majeures ont été franchies dans le déploiement de cette technologie⁵.

35. En Fédération de Russie, l'exploitation commerciale de la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov, dotée de deux tranches KLT-40S, a débuté en mai 2020, six mois après son couplage au réseau. Plus de 70 modèles de RFMP fondés sur les principales technologies étaient en gestation aux fins de différentes applications dans le monde. En Chine, le réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM) (figure A-1), qui produira 210 MWe à partir de deux modules de réacteur couplés à un turbo-alternateur à vapeur, était soumis à des essais fonctionnels en vue de sa mise en service en 2021. En Argentine, la construction du prototype CAREM (figure A-2) était à un stade avancé. Le réacteur devrait être chargé en combustible et mis en service au quatrième trimestre de 2024 pour produire 100 mégawatts thermiques (MWth) et 30 MWe (production brute). Le CAREM est un RFMP de type REP intégré fondé sur le principe de la circulation naturelle et doté de dispositifs de sûreté passive. Il a été conçu au moyen d'une technologie nationale, et au moins 70 % de ses composants et des services s'y rattachant ont été fournis par des entreprises argentines.

⁵ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, Vienna (2020).



FIG. A-1. En Chine, le HTR-PM soumis à des essais fonctionnels du système à chaud en vue de sa mise en exploitation commerciale en 2022. [Photo : Institut de technologie de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles, Université de Tsinghua (Chine)]



FIG. A-2. Le réacteur CAREM, à un stade de construction avancé sur un site adjacent à la centrale nucléaire Atucha II/Néstor Carlos Kirchner (Argentine) devrait être mis en service d'ici à 2024 et produire 30 MWe à des fins expérimentales. (Photo : CNEA)

36. La Chine a entamé la préparation du site pour le REP intégré de 125 MWe ACP100, aussi appelé Linglong One. Après environ cinq ans de travaux, ce petit réacteur de puissance polyvalent devrait être mis en service d'ici à 2025 en vue de la production d'électricité, de chaleur industrielle et d'eau dessalée. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission de la réglementation nucléaire a approuvé la certification de la conception du RFMP de 50 MWe de NuScale Power, REP intégré à circulation naturelle doté de dispositifs de sûreté passive. L'entreprise a ensuite porté à 60 MWe la puissance du NuScale Power Module (NPM) avant d'annoncer une nouvelle augmentation pour la pousser jusqu'à 77 MWe, raison

pour laquelle elle prévoit de solliciter un agrément de la certification de la conception en 2022. Le NPM fournit de l'électricité par paliers jusqu'à atteindre une puissance brute maximale de 924 MWe dans une même centrale nucléaire. La construction du premier NPM devrait commencer dans les prochaines années en vue d'une mise en exploitation d'ici à 2030 au Laboratoire national de l'Idaho.

37. L'Arabie saoudite et la République de Corée ont terminé conjointement les études techniques d'un avant-projet de réacteur avancé modulaire intégré (SMART), qui ont débouché sur un rapport préliminaire d'analyse de la sûreté concernant un REP intégré de 110 MWe (365 MWth), dont la paternité de la conception revient aux deux pays. Une demande d'approbation de la modification de la conception du SMART a été déposée en vue de la réalisation de plans techniques détaillés pour les futurs travaux de construction. Le Japon a publié sa stratégie pour une croissance verte par la neutralité carbone à l'horizon 2050, qui contient des précisions sur l'appui actif du Gouvernement japonais à une collaboration internationale aux fins de la démonstration des technologies des petits réacteurs modulaires.

38. La France a poursuivi la mise au point de NUWARD, PRM de type REP de 340 MWe à deux modules de réacteurs, afin de remplacer les centrales au charbon vieillissantes par cette technologie au cours de la prochaine décennie. Le NUWARD se caractérise par une convection forcée et des systèmes de sûreté avancés. 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 450 MWe, en vue d'un déploiement aux niveaux national et international d'ici à 2030.

39. En Fédération de Russie, la construction sur terre du RFMP RITM-200 de 50 MWe, REP intégré initialement conçu pour être installé sur les brises-glaces à propulsion nucléaire, est à l'étude.

40. La Feuille de route canadienne pour les petits réacteurs modulaires prévoyait des applications possibles pour le remplacement, en réseau et hors réseau, de centrales alimentées par des combustibles fossiles et au diesel, notamment dans les secteurs pétrolier et minier. Au moins 12 concepteurs ou fournisseurs ont pris contact avec la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) pour effectuer l'analyse fournisseur des concepts de réacteurs proposés, dont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide, des réacteurs à sels fondus, des réacteurs refroidis par gaz et des réacteurs refroidis par eau. Global First Power a déposé une demande d'autorisation de préparation du site pour une installation de PRM de 15 MWth refroidi par gaz aux Laboratoires de Chalk River. Le projet vise la production d'électricité et de chaleur industrielle. Ontario Power Generation a récemment indiqué qu'elle était en train de sélectionner un PRM qui sera déployé au site du Darlington New Nuclear Project, à Clarington (Ontario). Sous réserve de l'approbation des autorités provinciales, elle envisage de demander une autorisation de construction en 2022.

Tendances

41. Les activités liées à la mise au point d'un sous-ensemble de RFMP connus sous le nom de « microréacteurs » se sont intensifiées dans plusieurs pays, notamment au Canada, aux États-Unis d'Amérique, au Japon, en République tchèque et au Royaume-Uni. Il n'y a pas encore de consensus mondial sur la définition et la puissance des petits réacteurs modulaires, mais on considère généralement qu'ils devraient permettre de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité dans des régions reculées ou sur de petites îles et pourraient remplacer des groupes électrogènes diesel. Une procédure d'autorisation est en cours auprès de la Commission de la réglementation nucléaire pour un projet du Ministère de l'énergie des États-Unis d'Amérique, le réacteur à spectre de neutrons rapides Aurora, d'une puissance de 1,5 MWe, mis au point par la jeune entreprise Oklo aux États-Unis d'Amérique. Au Canada, la CCSN a terminé la première phase de l'analyse du modèle proposé par le fournisseur pour le microréacteur modulaire (MMR) de l'Ultra Safe Nuclear Corporation, réacteur à gaz à haute température composé d'un cœur à blocs prismatiques conçu pour produire 15 MWth ou environ 5MWe, et procède à la deuxième phase de l'analyse ; elle devrait également procéder à la première phase de l'analyse du modèle proposé par le fournisseur pour l'U-Battery d'URENCO, réacteur de puissance modulaire polyvalent à haute température conçu pour générer 4 MWe à partir de 10 MWth.

42. Les RSF suscitent un intérêt croissant dans les États Membres, et les progrès dans ce domaine se multiplient. Du fait de la grande souplesse qu'elle offre en matière de conception, leur technologie permet d'élaborer de nombreux modèles, comme des réacteurs thermiques et des réacteurs à neutrons rapides. Elle peut aboutir à la conception de RFMP comme de grandes centrales nucléaires. Certains concepteurs de RSF prévoyaient de déployer leurs modèles au cours des dix prochaines années. Le RSF compact (CMSR) développé par Seaborg Technologies au Danemark a passé l'étape de la conception de base ainsi que le premier stade du processus d'approbation réglementaire. Au Canada, les modèles de deux RSF proposés par les fournisseurs font actuellement l'objet d'une analyse préalable à l'autorisation par la CCSN. Le réacteur intégral à sels fondus de Terrestrial Energy (IMSR-400, de 195 MWe) était en seconde phase de l'analyse du modèle du fournisseur par la CCSN, et le réacteur brûleur à sels stables de Moltex Energy (SSR-W300), conçu au Canada et au Royaume-Uni, en transition entre l'étude de conception et la conception au niveau du système, était en première phase de l'analyse du modèle du fournisseur par la CCSN. Plusieurs autres modèles de RSF à différents stades de développement dans d'autres pays pourraient être déployés dans les prochaines années.

43. Plusieurs 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. La Chine avait au moins un modèle, l'ACPR50S, conçu pour fournir de l'électricité aux plateformes pétrolières et gazières en mer. Vers la fin de l'année 2020, la République de Corée a annoncé travailler à la mise au point de BANDI 60, unité flottante de production d'électricité de type REP.

44. L'objectif général du développement des RFMP est de démontrer que la construction modulaire peut permettre de réduire le montant de l'investissement initial grâce aux économies associées à la production en série et qu'il est possible de mettre en place des mécanismes de financement accessibles en simplifiant la conception et en réduisant les délais de construction. Pour favoriser la convergence des vues des États Membres au sujet de leurs besoins et de leurs particularités en matière de technologie des RFMP, l'Agence a entrepris d'établir des conditions et des critères génériques d'utilisation des modèles et de la technologie de ces réacteurs. Il s'agit là de définir un ensemble de prescriptions générales, techniques et économiques essentielles pour aider les pays primo-accédants à évaluer cette technologie et à élaborer in fine des dossiers d'appel d'offres. Si les RFMP s'implantent bien 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 associées.

45. L'Agence a redoublé d'efforts pour aider les États Membres qui se montrent intéressés par les systèmes énergétiques hybrides décarbonés intégrant diverses sources d'énergie renouvelables, des RFMP, des systèmes de stockage d'énergie et des applications non électriques. De nombreux pays considéraient que les RFMP, d'une puissance généralement inférieure à 300 MWe, pourraient devenir une source d'électricité décarbonée efficace et remplacer les centrales à combustibles fossiles vieillissantes. De plus, compte tenu du recours croissant aux sources d'énergie renouvelable intermittente sur tous les continents, les RFMP paraissent adaptés pour une exploitation à la fois en charge de base et en régime flexible, en synergie avec les énergies renouvelables, de façon à garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

Initiatives internationales relatives aux systèmes d'énergie nucléaire innovants

Créé en 2000, le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) est un mécanisme essentiel de coopération internationale au service de la viabilité de l'énergie nucléaire, des stratégies à long terme et des innovations institutionnelles et techniques.

En 2020, la Section de l'INPRO a mis à disposition une série d'outils afin d'aider les pays à développer leurs capacités d'évaluation en ligne du cycle du combustible grâce à son nouveau service intitulé « **Appui analytique pour une énergie nucléaire plus durable** » (ASENES).



Elle a aussi mis en ligne une nouvelle formation pour aider les experts du monde entier à utiliser les outils et les méthodes de modélisation de scénarios fondés sur l'énergie nucléaire, d'évaluation comparative des systèmes et de formulation de plans d'action pour une énergie nucléaire durable. En outre, elle a lancé un projet de collaboration dans le cadre duquel l'ASENES est appelé à réaliser des études de cas sur les scénarios de déploiement durable de RFMP en particulier.

A.4.3 Systèmes à neutrons rapides

Situation

46. Plusieurs pays dotés d'un programme électronucléaire avancé ont continué de développer des systèmes à neutrons rapides conformément à leurs programmes nationaux. Deux réacteurs industriels à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) ont continué d'être exploités en Fédération de Russie : le BN-600 (depuis 1980) et le BN-800 avancé (depuis 2016). Le BN-1200, en cours de conception, s'inscrira dans la lignée des RNR-Na russes conçus pour répondre aux exigences de sûreté renforcées qui ont été définies par le Forum international Génération IV pour les réacteurs innovants. L'Inde achevait la mise en service de son prototype de surgénérateur à neutrons rapides refroidi au sodium. En Chine, le réacteur rapide expérimental chinois refroidi au sodium de 20 MWe est en exploitation depuis 2010. Le RNR-Na innovant CFR-600 est en chantier depuis 2017. La construction du second réacteur à neutrons rapides CFR-600 refroidi au sodium de type piscine a commencé dans le district de Xiapu, au Fujian (Chine). Connu également sous le nom de projet de démonstration de réacteur à neutrons rapides de Xiapu, le CFR-600 fait partie du plan de la Chine pour obtenir un cycle fermé du combustible nucléaire. Bien qu'elle mette au point et exploite des RNR-Na depuis longtemps, la France a reporté ses projets de construction d'un prototype de RNR-Na innovant [le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium à vocation de démonstration industrielle (ASTRID)], préférant se consacrer à la R-D. Le Japon a favorisé la concurrence entre diverses technologies de réacteurs à neutrons rapides, notamment des RFMP, en réalisant des études de faisabilité dans le cadre de son programme intitulé Nuclear Energy x Innovation Promotion (NEXIP), première phase de son plan d'action stratégique pour le développement de réacteurs à neutrons rapides. La prochaine étape du plan d'action est de faire la démonstration de la technologie au milieu du 21^e siècle.

47. En Fédération de Russie, la procédure d'autorisation du BREST-OD-300 refroidi au plomb et du SVBR-100, PRM à neutrons rapides refroidi au plomb-bismuth, était en cours. Certains pays de l'Union européenne développaient conjointement le réacteur européen avancé de démonstration à neutrons rapides à caloporteur plomb (ALFRED), que la Roumanie a proposé de construire sur le site de Mioveni. Au Royaume-Uni, l'examen de la conception du réacteur avancé suédois refroidi au plomb (SEALER) de 55 MWe, destiné à la centrale SEALER-UK, était en cours au Ministère britannique des entreprises, de l'énergie et de la stratégie industrielle.

48. En 2020, General Atomics et Framatome ont annoncé conjointement la conduite d'une nouvelle étude de conception d'un réacteur modulaire à neutrons rapides refroidi à l'hélium de 50 MWe. L'Union européenne a poursuivi le développement d'ALLEGRO, réacteur à neutrons rapides expérimental refroidi à l'hélium. TerraPower et GE Hitachi Nuclear Energy ont annoncé la mise au point de Natrium (figure A-3), nouvelle technologie hybride avancée caractérisée par un RNR-Na de 345 MWe combiné à un système énergétique à sels fondus capable de porter la puissance totale à 500 MWe.



FIG. A-3. La technologie hybride avancée Natrium mise au point par TerraPower et GE Hitachi Nuclear Energy. (Source : TerraPower)

Tendances

49. Presque tous les nouveaux concepts à neutrons rapides et les nouveaux modèles innovants proposés étaient des RFMP. De nouveaux modèles et concepts de réacteur à neutrons rapides sont actuellement mis au point, en complément de la technologie au sodium, qui est bien développée. Par ailleurs, les réacteurs à neutrons rapides refroidis par des métaux lourds liquides, comme le plomb et l'eutectique plomb-bismuth, suscitaient un intérêt croissant. L'hélium est également un caloporteur envisagé comme alternative aux systèmes à neutrons rapides. Si ces derniers se heurtent à certaines difficultés d'ordre technologique, il est établi que leur manque de compétitivité économique reste le principal obstacle à leur déploiement. Néanmoins, la possibilité qu'ils puissent réduire significativement le volume, la toxicité et la durée de vie des déchets radioactifs et permettent de tirer davantage profit du combustible nucléaire, associé à l'apparition de nouveaux concepts, a continué de stimuler leur développement technologique.

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

Situation

50. Au total, 64 réacteurs nucléaires de puissance en service ont produit 3 396,4 gigawatt-heures (GW·h) d'équivalent électrique de la chaleur pour des applications non électriques. Cinquante-six réacteurs ont contribué au chauffage urbain et aux applications liées à la chaleur industrielle et 8 ont facilité le dessalement.

64 réacteurs nucléaires
de puissance en service

ont produit **3 396,4** GW·h



d'équivalent électrique de la chaleur
à l'appui de la cogénération nucléaire
pour des applications non électriques



56

ont contribué au chauffage urbain et
aux applications liées à la chaleur industrielle



8

ont facilité
le dessalement

Production d'hydrogène

51. Des avancées majeures ont été enregistrées dans le domaine de la production nucléaire d'hydrogène.

52. En ce qui concerne la production nucléaire d'hydrogène, plusieurs États Membres ont accordé une attention accrue à l'utilisation de l'énergie générée par les réacteurs à eau ordinaire en période creuse pour produire de l'hydrogène. Le Ministère de l'énergie américain (DOE) a chargé les compagnies d'électricité Energy Harbor, Xcel Energy et Arizona Public Service de faire la démonstration de la production d'hydrogène dans trois centrales nucléaires en 2020 et en 2021, dans le cadre de projets faisant intervenir plusieurs laboratoires nationaux. Au Royaume-Uni, EDF Energy mène à bien le projet « Hydrogen to Heysham (H2H) » visant à produire de l'hydrogène à faible émission de carbone grâce à l'électronucléaire.

53. En Chine, les travaux de R-D relatifs à la production nucléaire d'hydrogène ont progressé. L'Institut de physique appliquée de Shanghai a achevé l'essai à long terme de l'assemblage de cellules d'électrolyse à oxyde solide (SOEC) de 5 kilowatts (kW) avec une performance stable et a établi une installation de production d'hydrogène de 20 kW fondée sur la technologie de l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température. Les nouveaux travaux étaient axés sur la fabrication de SOEC et de piles ainsi que sur les projets de démonstration d'usines de 200 kW et d'un mégawatt couplées à un RSF au thorium aux fins de la production d'hydrogène à grande échelle.

54. Les Laboratoires nucléaires canadiens ont continué de développer la technologie hybride de production nucléaire d'hydrogène au moyen d'un cycle thermochimique cuivre-chlore. L'objectif est un système de démonstration intégré à l'échelle d'un laboratoire puis la construction d'un prototype d'usine. Le Japon est parvenu à produire de l'hydrogène en circuit fermé en mode automatique et continu à un débit allant jusqu'à environ 30 litres par heure durant des périodes allant jusqu'à 150 heures, par dissociation thermochimique de l'eau au sulfure d'iode, processus qui permettra à l'avenir de produire de l'hydrogène à une chaleur supérieure à 900 degrés Celsius, obtenue dans des réacteurs à haute température refroidis par gaz. La collecte de données importantes a permis d'en apprendre davantage sur la performance et la fiabilité des matériaux et des composants et d'améliorer les techniques de contrôle des fluides et de la réaction nécessaires à une exploitation à long terme.

 les réacteurs nucléaires de puissance peuvent être couplés à des **H₂** usines de production d'hydrogène pour constituer un système de cogénération produisant efficacement de l'électricité et de l'hydrogène.

Si la production actuelle d'hydrogène se faisait à l'aide d'énergie nucléaire, on éliminerait **environ 500 MILLIONS** de tonnes d'émissions de CO₂ par an.

55. En ce qui concerne la contribution des centrales nucléaires au chauffage urbain, la Fédération de Russie a fait un grand pas en avant en lançant la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov. Cette centrale est capable de fournir de l'électricité aux plateformes pétrolières russes le long des côtes arctiques et d'approvisionner en énergie une centrale de dessalement destinée à produire de l'eau douce et de la chaleur pour le chauffage urbain, selon la demande. Elle remplacera progressivement la centrale nucléaire de Bilibino (figure A-4), dont l'exploitation a été prolongée de cinq ans. La centrale nucléaire de Bilibino, l'une des plus anciennes installations de cogénération nucléaire au monde, fournit de l'électricité et de la chaleur pour la ville de Bilibino. D'autres pays tels que la Chine et la République de Corée ont annoncé qu'ils prévoyaient de mettre au point leurs propres centrales nucléaires flottantes.

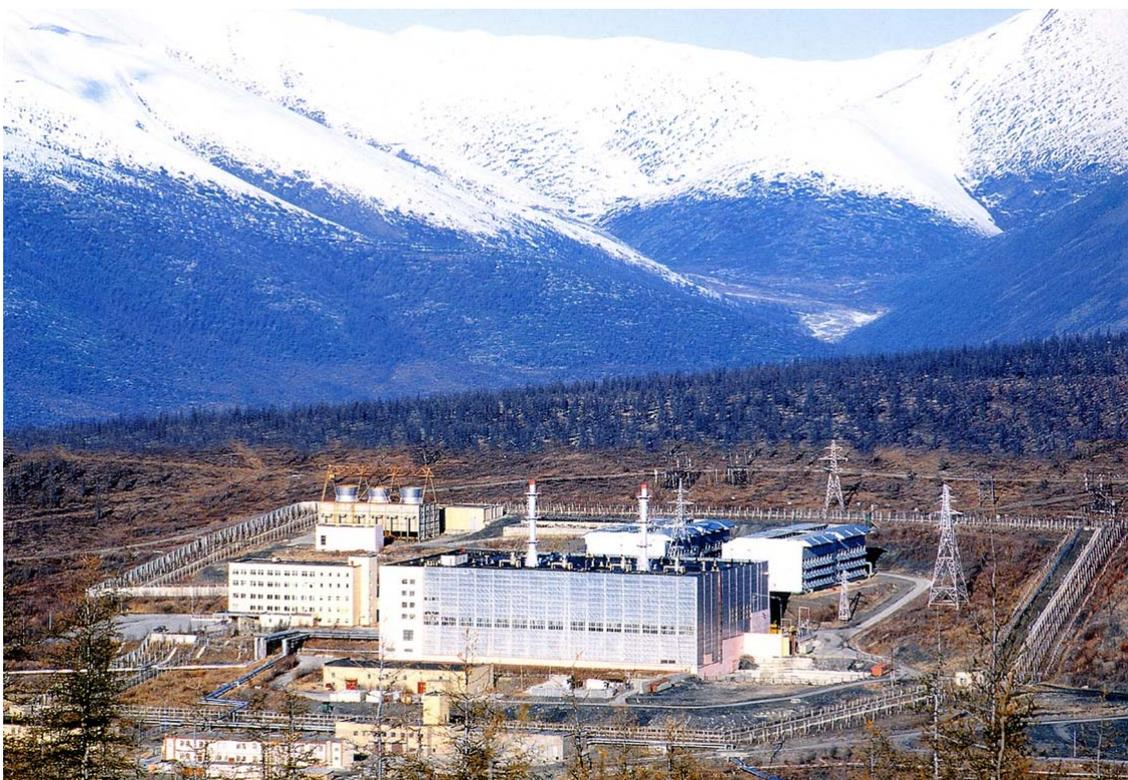


FIG. A-4. La centrale nucléaire de Bilibino (Fédération de Russie) qui produit aussi bien de la chaleur que de l'électricité. (Photo : Rosenergoatom)

Tendances

56. L'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins non électriques a le vent en poupe partout dans le monde. En plus de contribuer à la décarbonisation des secteurs d'utilisation finale, comme le transport, l'industrie et le logement, la cogénération nucléaire apparaît de plus en plus comme un argument économique contre la mise hors service précoce de centrales nucléaires non rentables, en particulier à l'heure où les systèmes énergétiques à énergie renouvelable intermittente occupent une place croissante dans les réseaux électriques. La production nucléaire d'hydrogène au moyen de réacteurs refroidis par eau devrait continuer de susciter un intérêt jusqu'à la phase de commercialisation, en particulier si les projets de démonstration portent leurs fruits.

57. Cependant, les problèmes infrastructurels liés à l'entreposage et au transport de l'hydrogène devront d'abord être réglés. Les enseignements tirés des projets menés actuellement dans différents pays devraient permettre d'intensifier plus rapidement la production nucléaire d'hydrogène par électrolyse traditionnelle. La mise au point de procédés très efficaces de production nucléaire d'hydrogène devrait également se poursuivre. L'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins non électriques dans une centrale autonome ou une centrale de cogénération, ou dans le cadre de systèmes énergétiques intégrés faisant appel à des sources renouvelables aux fins d'applications diverses, sera probablement une tendance à suivre au cours des années à venir. Ces applications comprennent la production d'eau douce, celle d'hydrogène comme combustible et vecteur d'énergie, le chauffage et le refroidissement urbains pour les immeubles résidentiels et commerciaux ainsi que la prestation de services dans de nombreux autres secteurs comme la sidérurgie, la pétrochimie et la production de combustibles synthétiques.

58. L'Agence a mis au point le Programme d'évaluation économique de l'hydrogène et le calculateur d'hydrogène, ainsi qu'une boîte à outils sur la production nucléaire d'hydrogène, afin d'aider les États Membres à en évaluer les aspects techniques et économiques en la comparant à d'autres modes de production.

A.4.5. Recherche sur la fusion nucléaire et développement de technologies pour la production d'énergie future

Situation

59. Les spécialistes de la fusion ont célébré le début de l'assemblage et de l'intégration de la machine ITER (figures A-5 et A-6), après plus de dix années d'un processus de construction complexe comprenant la préparation du site ainsi que la conception et la fabrication des systèmes et composants essentiels. Fin 2020, environ 70 % des travaux nécessaires à la production du premier plasma, prévue en décembre 2025, étaient achevés. Une fois en service, ITER constituera la base scientifique et technologique principale pour le développement et la conception de réacteurs à fusion nucléaire capables de produire de l'énergie.



FIG. A-5. La base du cryostat de 1 250 tonnes, premier grand composant à avoir été installé au fond du puits d'assemblage du tokamak de 30 mètres de haut. (Photo : Organisation ITER)



FIG. A-6. Une fois la base du cryostat installée, le cylindre inférieur du cryostat de 375 tonnes a été descendu dans le puits et soudé à la base. (Photo : Organisation ITER)

60. Le Tore européen commun (JET), tokamak ayant un pouvoir calorifique supérieur et une paroi semblable à celle d'ITER, a été préparé pour la première campagne expérimentale sur le tritium, qui a pour objet la conduite d'essais et la préparation des prochaines expériences qui seront menées avec un mélange de deutérium (D) et de tritium (T), à parts égales. La campagne expérimentale JET DT, dont le lancement est prévu en été 2021, devrait apporter des données uniques dans les domaines de la physique et de la technologie à la base de l'exploitation d'ITER. Un de ses objectifs majeurs en termes de performance est de générer 15 MWe d'énergie thermique pendant environ 5 secondes en régime stationnaire pour permettre d'étudier les principaux éléments relatifs à la physique de la production d'énergie par fusion.

61. En ce qui concerne la fusion par confinement inertiel avec des lasers de haute puissance, l'Installation nationale d'ignition (États-Unis d'Amérique) a continué d'améliorer les résultats expérimentaux en augmentant le rendement du transfert d'énergie du laser à la capsule de combustible, en identifiant plusieurs sources de perte d'énergie et en mettant au point des techniques d'atténuation pour améliorer la performance des expériences. L'augmentation du rendement du transfert aidera à améliorer les perspectives de production énergétique.

Tendances

62. L'investissement dans les travaux publics et privés de recherche et de développement technologique sur la fusion a continué de croître. Plus de 90 dispositifs de fusion financés par des fonds publics sont en service, en chantier ou en cours de planification (figure A-7). En outre, plus de 20 entreprises privées spécialisées dans la fusion mènent des activités de recherche-développement sur divers dispositifs de plus petite taille et approches basées sur différents combustibles, sur des configurations de confinement parallèles et sur de nouvelles technologies telles que les aimants supraconducteurs à haute température.

63. Le DOE, la Commission de la réglementation nucléaire américaine et l'Association des industries de la fusion ont organisé un forum public virtuel sur le cadre réglementaire de la fusion. L'objectif était d'amorcer un dialogue susceptible d'aboutir à la mise en place d'un cadre réglementaire qui couvrirait les futurs plans de développement et d'implantation de systèmes de réacteur à fusion, avec le concours du secteur public ou du secteur privé et l'appui des organismes de réglementation des États-Unis et d'autres pays.



FIG. A-7. Plus de 100 dispositifs de fusion (publics et privés) sont en exploitation, en chantier ou en planification. (Source : [Fusion Device Information System](#))

64. Des expériences portant spécifiquement sur le comportement des matériaux exposés au plasma, ainsi qu'à la corrosion, sont effectuées dans le cadre des nouveaux projets relatifs aux matériaux et à la technologie, par exemple du « Materials Plasma Exposure eXperiment », au Laboratoire national d'Oak Ridge (États-Unis d'Amérique), et du programme EUROfusion « MAT » mené en Europe. En outre, en l'absence d'installation d'irradiation réservée à la recherche sur les matériaux de fusion, les principaux résultats sont obtenus grâce à des campagnes d'irradiation menées dans des réacteurs de recherche, notamment grâce à l'utilisation du réacteur isotopique à haut flux du Laboratoire national d'Oak Ridge, fruit d'une collaboration entre l'Union européenne, le Japon et les États-Unis d'Amérique.

65. Le service du DOE chargé de l'énergie de fusion a alloué 18 millions de dollars afin de financer les activités et les services d'appui aux utilisateurs des installations dotées de lasers de haute intensité aux États-Unis et au Canada dans le cadre de l'initiative « LaserNetUS » ; lancée en 2018, celle-ci vise à améliorer l'accès des scientifiques d'universités et de laboratoires nationaux aux installations susmentionnées. Au Japon, le Comité sur la stratégie de fusion par laser, composé d'environ 40 membres de 20 instituts, envisage de développer un système de laser à haut taux de répétition pour mener des analyses des plasmas de fusion en s'appuyant sur des données et de tester la technologie des sources de neutrons de fusion par laser avec un réacteur de fusion sous-critique. Au Canada, General Fusion met au point une technologie de fusion à cible magnétisée depuis une dizaine d'années et a annoncé publiquement qu'elle comptait construire une installation de démonstration. L'entreprise a pris contact avec la CCSN afin de procéder à des activités préalables à l'autorisation et de prendre connaissance de la procédure d'autorisation. La CCSN procède également à des discussions préalables à l'autorisation avec des jeunes entreprises qui souhaitent mener des activités de recherche-développement sur la fusion dans le cadre du développement technologique.

B. Cycle du combustible nucléaire

B.1. Partie initiale

Situation

66. Du fait de la pandémie mondiale de COVID-19, plusieurs grands producteurs d'uranium ont suspendu leurs activités ou fortement réduit leur production. Plus de 90 % de la production mondiale d'uranium sont concentrés en Australie, au Canada, en Fédération de Russie, au Kazakhstan, en Namibie (figure B-1), au Niger et en Ouzbékistan. Avec la diminution mondiale de la production d'uranium, le sous-approvisionnement – déficit comblé par les approvisionnements secondaires – a entraîné une augmentation de 41 % du prix au comptant au premier trimestre de 2020. Toutefois, le prix atteint était encore inférieur à celui qui est nécessaire pour redémarrer les mines inutilisées ou exploiter de nouvelles mines d'uranium. Le prix au comptant de l'uranium a diminué d'environ 15 % au troisième trimestre de 2020, avec la reprise de l'exploitation de la mine d'uranium canadienne de Cigar Lake (le plus grand producteur d'uranium au monde) en septembre, après une interruption de cinq mois due à la pandémie mondiale.



*FIG. B-1. Vue aérienne de la mine d'uranium à ciel ouvert d'Husab (Namibie).
(Photo : Swakop Uranium)*

67. Les combustibles résistant aux accidents ou les combustibles de technologie avancée à l'étude en Europe, aux États-Unis d'Amérique, dans la Fédération de Russie et au Japon nécessitent parfois des niveaux d'enrichissement en uranium 235 plus élevés pour compenser une moindre transparence aux neutrons de leurs matériaux de gainage. C'est pourquoi des combustibles à base d'uranium faiblement enrichi de forte densité (HALEU), enrichis à plus de 5 % mais à moins de 20 %, sont en cours d'expérimentation.

68. Des assemblages combustibles résistant aux accidents fabriqués par Global Nuclear Fuel ont été chargés pour la première fois dans un réacteur des États-Unis. Des assemblages d'essai principal composés d'une gaine au zirconium « ARMOR » et de crayons combustibles résistant aux accidents « IronClad » ont été installés dans la centrale nucléaire Clinton d'Exelon aux États-Unis d'Amérique.

69. Les premiers assemblages de combustible nucléaire de fabrication russe composés de barres expérimentales de combustible résistant aux accidents destinés aux réacteurs commerciaux ont été fabriqués et ont réussi les essais de réception à l'Entreprise de concentrés chimiques de Novosibirsk, usine de fabrication de la Société de combustible TVEL, filiale du fabricant de combustible « Rosatom ». Les barres de combustible ont été chargées dans l'une des tranches VVER-1000 de la centrale nucléaire de Rostov, en Fédération de Russie.

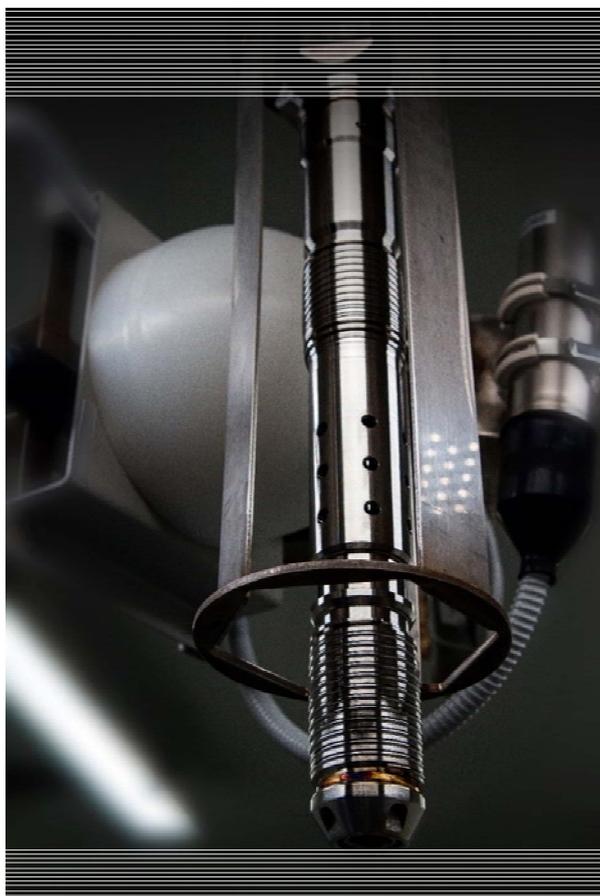
70. Des assemblages d'essai principal composés de combustible résistant aux accidents installés au début de 2018 dans la tranche 1 de la centrale nucléaire Edwin I. Hatch de Southern Nuclear ont achevé un cycle de 24 mois, et un échantillon de barres d'essai principal va maintenant être soumis à des essais. L'inspection initiale des barres est déjà achevée. Les propriétés des matériaux et de la gaine des barres vont être évalués plus avant au Laboratoire national d'Oak Ridge du Ministère de l'énergie (DOE).

71. Des assemblages d'essai principal composés de combustible résistant aux accidents EnCore ont été installés dans la tranche 4 de la centrale nucléaire de Doel d'ENGIE Electrabel en Belgique, second réacteur commercial au monde et premier en Europe dans lequel sont chargés de tels assemblages.

72. TerraPower a annoncé prévoir de s'associer avec Centrus Energy, fournisseur de combustible nucléaire et prestataire de services, pour mettre sur pied des capacités nationales de production d'HALEU à l'échelle commerciale. Cela sera nécessaire pour alimenter de nombreux modèles de

réacteurs de prochaine génération, y compris le système de stockage d'énergie Natrium récemment annoncé, conçu par TerraPower et GE Hitachi Nuclear Energy.

73. Le Combinat minier et chimique de Zheleznogorsk (Fédération de Russie) a achevé la fabrication des éléments de la première recharge complète de combustible à mélange d'oxydes (MOX) uranium-plutonium (figure B-2) destinée à la tranche 4 de la centrale nucléaire de Beloyarsk. Les 169 assemblages combustibles ont été réceptionnés par Rosenergoatom, l'exploitant, et son représentant agréé, ZAES.



*FIG. B-2. Assemblage combustible MOX pour le réacteur à neutrons rapides BN-800.
(Photo : Combinat minier et chimique, Fédération de Russie)*

74. Les Laboratoires nucléaires canadiens ont conclu quatre accords de collaboration avec des entreprises de développement technologique dans le cadre de leur Initiative canadienne de recherche nucléaire. Le premier accord, passé avec USNC-Power, filiale de l'USNC, porte sur des recherches à l'appui du MMR de l'USNC, notamment aux fins de la fabrication de son combustible entièrement micro-encapsulé en céramique. Le second, passé avec Moltex Energy, porte sur des travaux visant à soutenir certains aspects du programme de mise au point du combustible nucléaire de Moltex Energy pour son réacteur à sels stables, PRM de 300 MWe. Le troisième, passé avec Kairos Power (États-Unis d'Amérique), porte sur la recherche et la mise au point de technologies permettant de mieux séparer, analyser et stocker le tritium généré par le projet de PRM de Kairos Power. Le quatrième, passé avec Terrestrial Energy, vise à mettre au point et à l'essai des techniques permettant de suivre le comportement du combustible liquide qui sera utilisé dans le réacteur intégral à sels fondus de Terrestrial Energy.

75. Holtec International a choisi Framatome pour fournir le combustible nucléaire de son réacteur SMR-160. Les sociétés ont conclu un accord qui permettra d'exécuter toutes les études techniques nécessaires à l'installation dans ce réacteur de l'assemblage combustible GAIA 17x17 de Framatome, disponible dans le commerce et qui a fait ses preuves.

76. Le combustible TRISO de X-Energy, TRISO-X, a commencé à être irradié au réacteur de recherche du Laboratoire nucléaire de l'Institut de technologie du Massachusetts. Les données issues

des essais d'irradiation serviront à étayer le processus de demande d'autorisation du Xe-100 de X-Energy et d'autres réacteurs utilisant du combustible TRISO.

77. L'USNC a implanté une nouvelle installation à Salt Lake City dans l'Utah (États-Unis d'Amérique) pour faciliter la mise au point de son combustible entièrement micro-encapsulé en céramique, constitué de particules de combustible TRISO à l'oxycarbure d'uranium de nouvelle génération, qui remplace la matrice en graphite vieille de 50 ans du combustible TRISO traditionnel par du carbure de silicium. Les matériaux qui y seront mis au point seront utilisés dans le MMR de l'USNC et dans d'autres réacteurs nucléaires, notamment des réacteurs refroidis par gaz, des réacteurs à eau ordinaire, des réacteurs CANDU et des réacteurs refroidis à sels fondus.

78. Un contrat prévoyant un deuxième itinéraire de transport à destination et en provenance de la banque d'UFE de l'AIEA a été signé avec la Société pour l'industrie de l'énergie nucléaire de Chine (CNEIC) au sujet du transport d'uranium faiblement enrichi (UFE) et/ou d'équipements nécessaires au fonctionnement de la banque. Celle-ci, située au Kazakhstan, est en service depuis octobre 2019. Les autres mécanismes d'assurance de l'approvisionnement en place sont décrits dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* [document GC(56)/INF/3].

Tendances

79. Dans l'ensemble, en 2020, l'offre d'uranium issu de sources primaires a diminué, la production devant s'établir autour de 46 500 tonnes. Cela représente environ 69 % de la demande mondiale d'uranium, ce qui met davantage sous tension les ressources secondaires pour répondre à la demande d'uranium en tant que combustible nucléaire.

80. Pour assurer aux centrales actuelles et futures un approvisionnement durable en combustible nucléaire, il faudra exploiter davantage de mines d'uranium. D'après les données historiques, très peu de gisements d'uranium découverts devraient parvenir aux stades de l'exploitation et de la production en raison de contraintes économiques, techniques, environnementales ou sociales. Il faut donc innover pour inciter à la production dans des gisements marginaux. En 2020, l'évaluation en cours de techniques de récupération in situ dans un gisement à haute teneur associé aux discordances témoigne de cette volonté d'innover de l'industrie d'extraction de l'uranium.

81. 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 d'uranium de type gréseux. Depuis dix ans, la Chine mène des recherches sur cette technologie pour améliorer la lixiviation et la remédiation dans ces types de gisements.

82. L'utilisation de combustible à taux de combustion élevé dans le parc actuel des centrales nucléaires est considérée comme une option pour améliorer la durabilité du cycle du combustible, puisque la consommation annuelle d'uranium naturel est réduite du fait de l'augmentation du taux de combustion de décharge.

B.2. Partie terminale

Situation

83. Selon le retour d'information du Réseau sur l'expérience d'exploitation des centrales nucléaires concernant la COVID-19, le fonctionnement des installations d'entreposage du combustible usé n'a pas été beaucoup affecté par la pandémie, si ce n'est lors de retraits de combustible qui, dans certains cas, ont entraîné des retards. Le combustible nucléaire usé entreposé s'accumule dans le monde au rythme d'environ 7 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, alors que les stocks entreposés avoisinent les 300 000 t ML.

84. Du combustible MOX usé a été retiré de la centrale nucléaire d'Ikata, première opération du genre au Japon, et un mois plus tard de la centrale nucléaire de Takahama. Les barres contenant ce combustible seront temporairement entreposées dans un bassin de refroidissement. Le Gouvernement japonais effectue de la recherche-développement sur le retraitement de ce combustible dans le cadre de sa politique énergétique.

85. Pour les pays dotés de programmes nucléaires établis de longue date qui suivent des stratégies de cycle ouvert, autant la diminution de la capacité d'entreposage sur site du combustible nucléaire usé que l'augmentation de la durée d'entreposage (plus de 100 ans) constituent les principales difficultés à surmonter.

86. L'augmentation de la capacité d'entreposage à sec sur le site de la centrale nucléaire de Wolsong en République de Corée a été approuvée en janvier 2020. Il s'agit là d'une décision importante, car la capacité d'entreposage existante arrivait presque à saturation.

87. La Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a publié un projet d'évaluation de l'impact environnemental de l'installation d'entreposage provisoire centralisée qui est prévue au Nouveau-Mexique (États-Unis d'Amérique).

88. Après la livraison du dernier château d'entreposage de combustible nucléaire usé avec un an d'avance sur le calendrier, la centrale nucléaire d'Ignalina, en Lituanie, qui a été mise à l'arrêt, a atteint sa pleine capacité de gérer et d'entreposer en toute sûreté, sur son site, tout le combustible nucléaire usé de ses deux réacteurs RBMK-1500.

Tendances

89. L'Agence coordonne des travaux de recherche destinés à acquérir une meilleure connaissance du comportement actuel du combustible nucléaire usé dans divers systèmes d'entreposage ainsi que des mécanismes de vieillissement et de dégradation de ces derniers. Ces travaux permettront de veiller à ce que ce combustible continue d'être entreposé dans des conditions de sûreté et transporté vers une installation de stockage définitif ou de retraitement.

90. Les gains d'efficacité dans la gestion des réacteurs nucléaires ont permis, au fil du temps, de décharger de ces derniers une moindre quantité de combustible nucléaire usé. Ceci n'est possible que grâce à des taux d'enrichissement initiaux et des taux de combustion plus élevés, entraînant une chaleur résiduelle plus importante et des risques accrus de fragilisation des gaines, ce qui peut avoir une incidence sur les étapes de la gestion du combustible nucléaire usé.

91. Les nouveaux modèles de combustible qui seront introduits dans un avenir proche avec des taux d'enrichissement plus élevés allant jusqu'à 8 % et des matériaux de gainage à revêtement pourraient occasionner des problèmes dans les systèmes d'entreposage existants, car il faut connaître leur comportement à long terme pour analyser correctement la sûreté à toutes les étapes de la gestion du combustible nucléaire usé, dont l'entreposage, le transport et le stockage définitif.

92. Certains pays considèrent le combustible usé comme une source d'énergie précieuse, et la mise au point de technologies de recyclage progresse. Des procédés avancés de recyclage multiple du plutonium (CORAIL et MIX en France, ainsi que REMIX en Fédération de Russie) dans des réacteurs à eau ordinaire, en cours de démonstration, doivent faciliter l'adoption de stratégies de recyclage multiple du plutonium dans les réacteurs à neutrons rapides. Ces combustibles recyclés devraient permettre d'exploiter plus efficacement les ressources naturelles, de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets nucléaires produits et de diminuer les risques de prolifération.

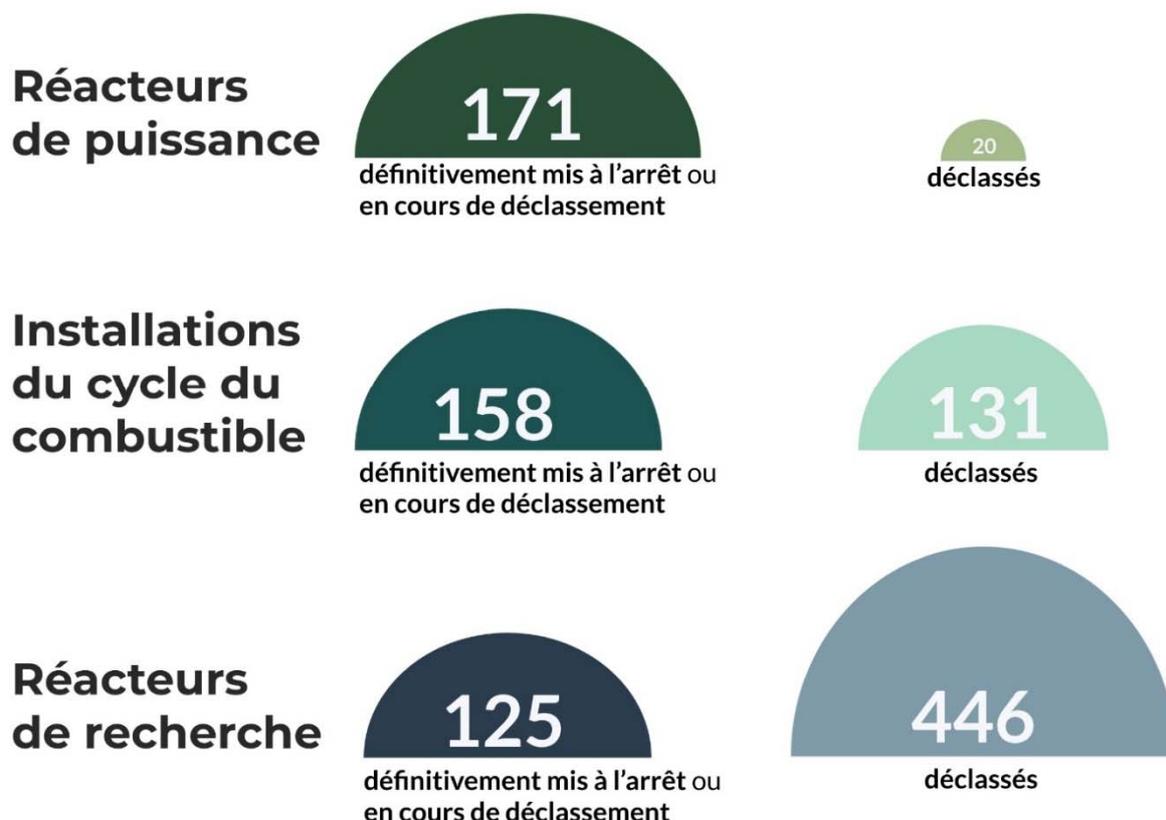
C. Déclassement, remédiation de l'environnement et gestion des déchets radioactifs

C.1. Déclassement

Situation

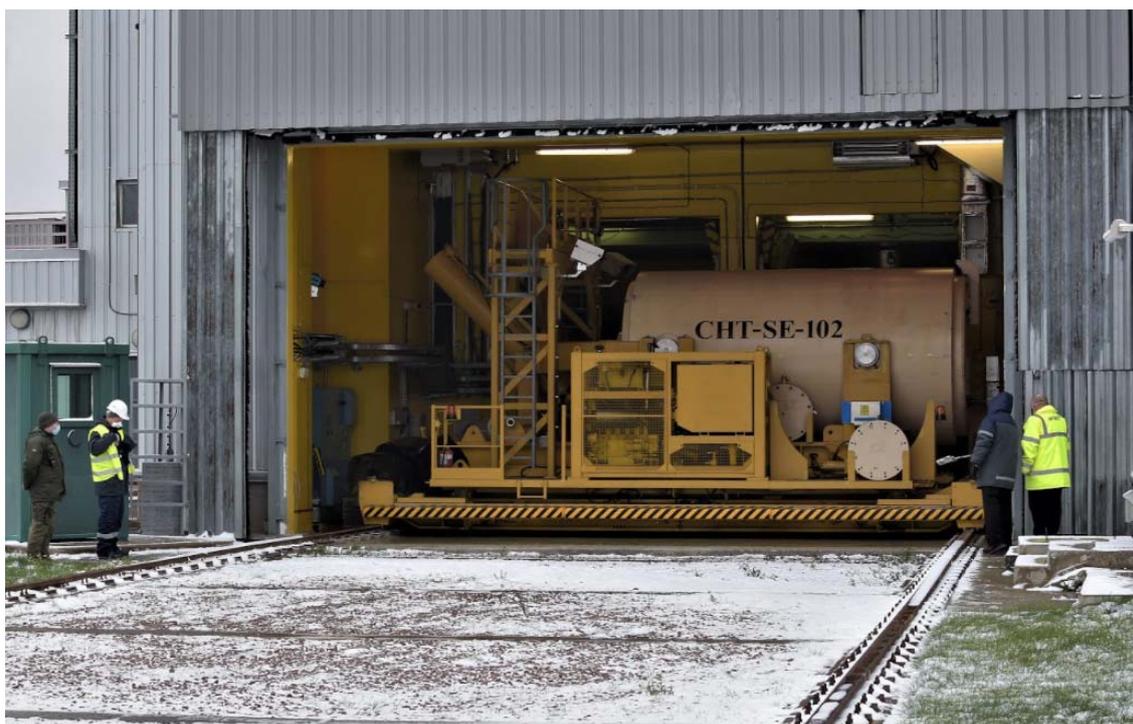
93. Six réacteurs nucléaires de puissance ont été définitivement mis à l'arrêt en 2020 : les tranches 1 et 2 de Fessenheim en France, Leningrad-2 en Fédération de Russie, Ringhals 1 (REB de 881 MWe) en Suède, ainsi que Duane Arnold-1 et Indian Point 2 aux États-Unis d'Amérique. C'est moins qu'en 2019, année durant laquelle 13 réacteurs avaient été mis hors service. À la fin de 2020, au total, ce sont 171 réacteurs qui avaient été mis à l'arrêt ou qui étaient en train d'être déclassés, dont 20 pour lesquels les opérations de déclassement avaient été achevées. En outre, 158 installations du cycle du combustible nucléaire et 125 réacteurs de recherche avaient été définitivement mis à l'arrêt ou étaient

en cours de déclasserement dans le monde. Environ 131 installations du cycle du combustible et 446 réacteurs de recherche avaient été déclassés.



94. Les programmes de déclasserement de centrales nucléaires en cours les plus importants se sont déroulés en Allemagne, aux États-Unis d'Amérique et au Japon. En Allemagne, 26 centrales nucléaires étaient en cours de déclasserement, et les six dernières centrales en exploitation doivent être définitivement mises à l'arrêt d'ici à la fin de 2022. Les opérations de déclasserement de la tranche B de la centrale de Gundremmingen et de la tranche 2 de Philippsburg ont commencé après réception des autorisations nécessaires en 2019. Le grand séisme de l'est du Japon survenu en 2011 a obligé ce pays à mettre définitivement à l'arrêt une grande partie de son parc nucléaire. En 2020, au total, 24 des 60 centrales nucléaires commerciales japonaises étaient soit définitivement mises à l'arrêt, soit déjà en cours de déclasserement. Les États-Unis d'Amérique, où plusieurs réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt au cours des dix dernières années du fait de leur non-rentabilité, menaient 18 programmes de déclasserement : sept installations suivaient une stratégie de démantèlement immédiat, sept autres étaient mises en attente sûre et les quatre dernières étaient en voie d'être immédiatement démantelées après avoir été mises en attente sûre. Les trois centrales dont le déclasserement devait s'achever en 2020 étaient les suivantes : La Crosse (Wisconsin), Humboldt Bay (Californie) et Zion (Illinois).

95. Les projets de déclasserement à Tchernobyl et Fukushima ont bien progressé. En septembre 2020, des essais à chaud ont commencé dans la nouvelle installation d'entreposage provisoire du combustible nucléaire usé (figure C-1) adjacente à la centrale de Tchernobyl, tandis que l'installation de mesure de rejets admissibles des déchets, dont le débit peut atteindre dix tonnes par jour, est entrée en service.



*FIG. C-1. Premier conteneur blindé à double paroi rempli de 93 assemblages de combustible usé quittant l'installation de traitement du combustible usé pour un entreposage de cent ans.
(Photo : centrale de Tchernobyl, entreprise spécialisée d'État)*

96. Le Japon a fait savoir que l'eau à teneur réduite en strontium, précédemment entreposée dans des citernes en attente de traitement par le Système avancé de traitement des liquides (ALPS), avait été intégralement traitée en août 2020 et que les citernes seraient réutilisées pour entreposer l'eau traitée par l'ALPS. Le Gouvernement japonais envisage toujours plusieurs options pour s'occuper de l'eau traitée par l'ALPS, notamment son rejet sous forme de vapeur ou dans la mer, mais n'a pas encore pris de décision finale.

97. En France, les opérations de déclassement ont progressé sur le site de La Hague (figure C-2), où l'usine de retraitement UP2-400 d'Orano était en cours de démantèlement. Les équipes qui en sont chargées ont commencé à récupérer 600 tonnes de déchets de graphite et de magnésium hérités du passé qui étaient entreposés dans des silos en béton, guidées par un système de tri faisant appel à une technologie basée sur l'intelligence artificielle, tandis que les activités de démantèlement se poursuivaient dans l'usine principale. Le démantèlement de la boîte à gants sèche de l'atelier de traitement final du plutonium est terminé ; d'autres opérations ont commencé en vue du démantèlement d'un deuxième dissolvant dans l'ancien bâtiment de dissolution et d'extraction ainsi que des cellules chaudes d'un ancien atelier de fabrication de sources au césium. Les cellules chimiques de cet atelier ont été démantelées au cours des trois années précédentes à l'aide d'équipement télécommandé.



FIG. C-2. Vue aérienne du site d'Orano à La Hague, en Normandie (France). (Photo : Orano)

98. Électricité de France a commencé la construction d'une installation de démonstration en vue du déclassement de réacteurs au graphite, qui devrait être en service d'ici à 2022 de sorte à faciliter les essais des technologies de démantèlement des réacteurs modérés au graphite. En Fédération de Russie, Rosatom a prévu de suivre, à titre exceptionnel, une stratégie de mise sous massif de protection pour le déclassement de ses premiers réacteurs uranium-graphite et construit actuellement pour la tester un centre de démonstration, dont la mise en service devrait intervenir en 2021.

99. Sogin, l'entreprise publique italienne responsable du déclassement, a entamé des activités préliminaires en vue du déclassement du réacteur de recherche ISPRA-1 au site du Centre commun de recherche de la Commission européenne.

Tendances

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

101. Des groupements spécialisés dans le déclassement et la gestion des déchets veulent de plus en plus essayer d'exécuter des projets de déclassement de bout en bout. Par exemple, aux États-Unis d'Amérique, il est arrivé récemment que la responsabilité de l'obtention de l'autorisation et la totalité des fonds prévus pour le démantèlement soient transférés de la compagnie d'électricité au groupement chargé du déclassement qui, pour sa part, assume l'entière responsabilité des opérations.

102. On constate aussi une tendance à un recours accru à la numérisation, la robotique et l'automatisation, notamment pour la planification et la simulation, la gestion de la configuration des centrales et la gestion des connaissances, ainsi que pour accompagner les opérations de récupération, de caractérisation et de démantèlement des déchets.

103. Bien souvent, l'indisponibilité d'une solution de stockage définitif du combustible nucléaire usé ou l'inexistence d'un dépôt de déchets radioactifs freinent la progression du démantèlement. Il est donc devenu courant de construire des installations d'entreposage de combustible usé et de déchets radioactifs sur les sites des installations à déclasser ou dans les alentours pour en permettre le déclassement même

en l'absence d'installations de stockage définitif de ces matériaux. Par exemple, la société BGZ d'entreposage provisoire en Allemagne assume l'entière responsabilité de l'entreposage à long terme du combustible usé et des déchets radioactifs, afin que les installations puissent être démantelées dès que possible.

C.2. Remédiation de l'environnement

Situation

104. Bien que limitées en 2020 en raison de la pandémie de COVID-19, les activités de remédiation se sont poursuivies sur les sites qui présentaient des risques importants pour les populations ou l'environnement ou qui pouvaient être réutilisés à des fins économiques.

105. Des travaux de remédiation ont commencé sur le site de Shekaftar (Kirghizistan), l'objectif étant de fermer six puits et de déplacer cinq piles de stériles vers une décharge existante plus éloignée. Environ 700 000 mètres cubes de déchets provenant des opérations d'extraction seront retirés des alentours du village et stabilisés sur un nouvel emplacement pour assurer la protection de la population et de l'environnement. Ces travaux, financés grâce au Compte pour la remédiation environnementale en Asie centrale à la Banque européenne pour la reconstruction et le développement, s'inscrivent dans le cadre du Plan directeur stratégique pour la remédiation environnementale des anciens sites de production d'uranium en Asie centrale. Depuis 2020, les projets de remédiation au Kirghizistan (site de Min-Kush) et au Tadjikistan (Yellow Hill et tas de résidus 1 à 4 à Istiqlol) menés dans le cadre du programme intergouvernemental de la Communauté d'États indépendants se poursuivent comme prévu.

106. Aux États-Unis d'Amérique, l'enlèvement des dernières dalles des bâtiments sur le site de l'ancienne usine de diffusion gazeuse d'Oak Ridge (figure C-3) est terminé, ce qui a permis d'entamer la procédure d'approbation réglementaire qui permettra de remettre le site à la disposition des collectivités locales à des fins de développement économique. Ces travaux aboutiront à la libération de plus de 500 hectares de terres qui seront réutilisés dans le cadre du parc historique national du projet Manhattan.



FIG. C-3. Travaux de remédiation en cours sur le site de l'ancienne usine de diffusion gazeuse d'Oak Ridge, dans le Tennessee (États-Unis d'Amérique). (Photo : DOE)

Tendances

107. L'accent mis sur les techniques de caractérisation et de contrôle radiologique a continué de faciliter l'application progressive d'une approche de gestion et de contrôle à long terme à même d'optimiser de nombreux sites.

108. La grande tendance observée en 2020 est l'application accrue du concept de l'économie circulaire à la gestion des résidus de matières radioactives naturelles. À cet égard, une attention particulière est portée à l'utilisation de ressources secondaires et réutilisables, l'objectif étant de préserver les ressources primaires. L'autorisation récente, par l'Agence américaine de protection de l'environnement, de l'utilisation de phosphogypse dans des projets publics de construction de routes illustre plus particulièrement cette tendance. L'application à plus grande échelle d'approches similaires nécessitera la conclusion de partenariats constructifs susceptibles de déboucher sur des solutions innovantes couvrant également les aspects sociaux et réglementaires.

109. Dans le cadre du projet de mise au point d'un système de spectrométrie gamma monté sur drone pour l'étude et le contrôle radiologique des anciennes mines d'uranium (DUB-GEM) s'est déroulé le premier vol d'essai. Financé par le Ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche, ce projet de recherche vise à faciliter la caractérisation des anciens sites de production d'uranium en Asie centrale. Des spectromètres gamma relativement compacts montés sur des drones de petite taille sont en général surtout utilisés pour étudier des zones très contaminées, mais des recherches sont menées actuellement pour recourir aussi à cette configuration pour l'examen de faibles niveaux de contamination radioactive. Les nouveaux systèmes testeront l'utilisation de détecteurs plus volumineux, de drones d'un poids au décollage de 25 kg au maximum et de nouveaux matériaux de cristal scintillateur, comme le bromure de césium. Une fois mise au point, cette technologie accélérera l'analyse de la contamination radioactive dans des régions montagneuses difficiles à atteindre ou à traverser ou sur de vastes étendues, très chronophage.

110. L'expérience acquise par l'industrie nucléaire en matière de gestion des matières contaminées guide l'action menée dans d'autres secteurs à l'égard des matières radioactives naturelles. Le déclassement des plateformes pétrolières et gazières, par exemple, est un fait nouveau majeur dans le cadre des activités industrielles relatives à ces matières. Il y a environ 1 885 plateformes de production en activité sur le plateau continental externe des États-Unis d'Amérique, dont plus de 60 % ont au moins 25 ans, et l'on estime que près de 600 installations offshore devront être déclassées dans le monde entre 2016 et 2021.

C.3. Gestion des déchets radioactifs

Situation

111. Des progrès majeurs ont continué d'être réalisés en ce qui concerne la mise au point des installations de stockage définitif en formations géologiques profondes qui doivent recueillir les déchets de haute activité et le combustible usé déclaré comme déchet. On a notamment une meilleure perception des ressources nécessaires, par exemple pour la conception et la mise en œuvre des méthodes de choix du site fondées sur des avancées scientifiques et techniques, la collaboration avec les parties prenantes et l'apport en continu de ces ressources, qui sont planifiées en amont.

112. Les Émirats arabes unis ont créé un fonds d'affectation spéciale pour être en mesure d'assumer leurs responsabilités à venir en matière de gestion des déchets ; c'est le premier pays à mettre en place de telles modalités de financement avant le couplage au réseau de sa première centrale nucléaire.

113. Le Gouvernement australien a annoncé la création de l'Agence australienne pour la gestion des déchets radioactifs (ARWA), franchissant ainsi une nouvelle étape majeure dans le développement des capacités nationales en la matière. L'ARWA collaborera avec des parties prenantes comme le secteur industriel, les collectivités locales et des entités publiques pour gérer au mieux les déchets radioactifs. Le Comité du Sénat australien chargé de la législation économique a recommandé l'adoption du projet d'amendement de la loi nationale de 2020 sur la gestion des déchets radioactifs (spécification des sites, financement communautaire et autres mesures) au Parlement australien. Napandee, en Australie méridionale, y est désigné pour implanter une installation de gestion des déchets de faible ou moyenne activité.

114. En Belgique, l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies a effectué une consultation du public concernant un projet de plan national de stockage définitif de déchets radioactifs de haute activité ou à longue période et c'est le stockage géologique qui a été recommandé.

115. En Finlande, l'Autorité de sûreté radiologique et nucléaire a informé les autorités des pays ayant fourni de l'uranium aux centrales nucléaires finlandaises que ce pays entendait commencer les opérations de stockage définitif du combustible nucléaire usé vers le milieu des années 2020. Étant donné que les inspections de routine des matières nucléaires ne peuvent être effectuées une fois celles-ci stockées, il faut en préciser les procédures avant le début de ces opérations. Il est prévu que le stockage définitif à l'installation de stockage définitif d'Onkalo (Finlande), construite à plus de 400 mètres de profondeur, commence en 2024 (figure C-4). La France et la Suède ont entamé la procédure d'autorisation de leurs stockages définitifs en formations géologiques profondes en des sites précis. Plusieurs autres pays avancent progressivement dans leurs projets de stockage définitif en formations géologiques profondes, notamment les États-Unis d'Amérique, le Japon, le Royaume-Uni et la Suisse.



FIG. C-4. Le stockage définitif à l'installation de stockage définitif d'Onkalo (Finlande) devrait commencer en 2024. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, a visité Onkalo en novembre 2020. (Photo : TVO/Tapani Karjanlahti)

116. Au Royaume-Uni, l'Autorité du déclassement nucléaire (NDA) a publié un projet de stratégie de gestion des déchets radioactifs, de déclassement et de remédiation environnementale des anciens sites. Toutes les parties prenantes ont été invitées à participer pendant 12 semaines aux consultations publiques, à poser des questions sur le projet et à faire part de leurs commentaires et de leurs réactions. La NDA a aussi annoncé la création d'un groupe de travail à Copeland, dans le comté de Cumbria, qui sera chargé d'examiner avec les collectivités locales les avancées et les perspectives relatives à une installation de stockage géologique, première étape d'un processus pluriannuel de choix du site fondé sur le consentement. Par ailleurs, la construction d'une installation extensible de traitement des déchets de faible activité et de ceux à la limite de la catégorie des déchets de moyenne activité a commencé sur le site de Winfrith de Tradebe Inutec.

117. En Suisse, la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) a recommandé la construction d'une usine d'encapsulation du combustible usé soit sur le site du futur dépôt national, soit sur celui du Dépôt intermédiaire central pour déchets radioactifs de Würenlingen (ZWILAG) (figure C-5).



FIG. C-5. La salle d'entreposage des châteaux au ZWILAG (Suisse) qui accueille les déchets de haute activité vitrifiés des usines de retraitement, ainsi que des éléments combustibles usés provenant des centrales nucléaires suisses. (Photo : ZWILAG)

118. Aux États-Unis d'Amérique, le DOE a approuvé la mise en service d'une installation de transformation des déchets salins sur le site de Savannah River qui traitera les déchets liquides de haute activité entreposés en citerne.

119. L'Allemagne a engagé le processus de choix du site d'une installation de stockage définitif des déchets de haute activité en publiant une liste des emplacements qui pourraient convenir. Cette liste et la procédure de présélection, mise au point par la société fédérale chargée du stockage des déchets radioactifs, ont permis d'identifier 90 zones (54 % du territoire national) qui pourraient être géologiquement appropriées, selon les critères de sélection de sites et l'approche scientifique stipulés dans une loi nationale adoptée en 2017.

120. L'Organisation japonaise de gestion des déchets nucléaires a entamé une revue de la littérature dans deux municipalités du Hokkaido, la ville de Suttu et le village de Kamoenai, pour déterminer s'ils auraient un site pouvant convenir à un dépôt géologique profond, première étape du choix du site pour une telle installation. La ville de Suttu a décidé de demander la revue de la littérature et le village de Kamoenai a accepté la proposition de revue du gouvernement national.

121. La Société canadienne de gestion des déchets nucléaires s'est assurée l'accès à un peu plus de 600 hectares de terres pour mener des études dans la municipalité de South Bruce (Ontario), l'une des deux localités qu'elle avait sélectionnées pour y accueillir éventuellement un dépôt géologique profond du combustible nucléaire usé généré dans le pays. Le gouvernement fédéral a également lancé un processus participatif pour moderniser la politique canadienne concernant les déchets radioactifs.

Tendances

122. La coopération internationale en matière de recherche, développement et démonstration (RDD) a été de plus en plus axée sur les sujets touchant à la gestion des déchets radioactifs. Les progrès accomplis dans un grand nombre de pays de l'Union européenne ont été stimulés par l'obligation à laquelle ces derniers sont tenus de se conformer à la Directive-cadre sur les déchets.

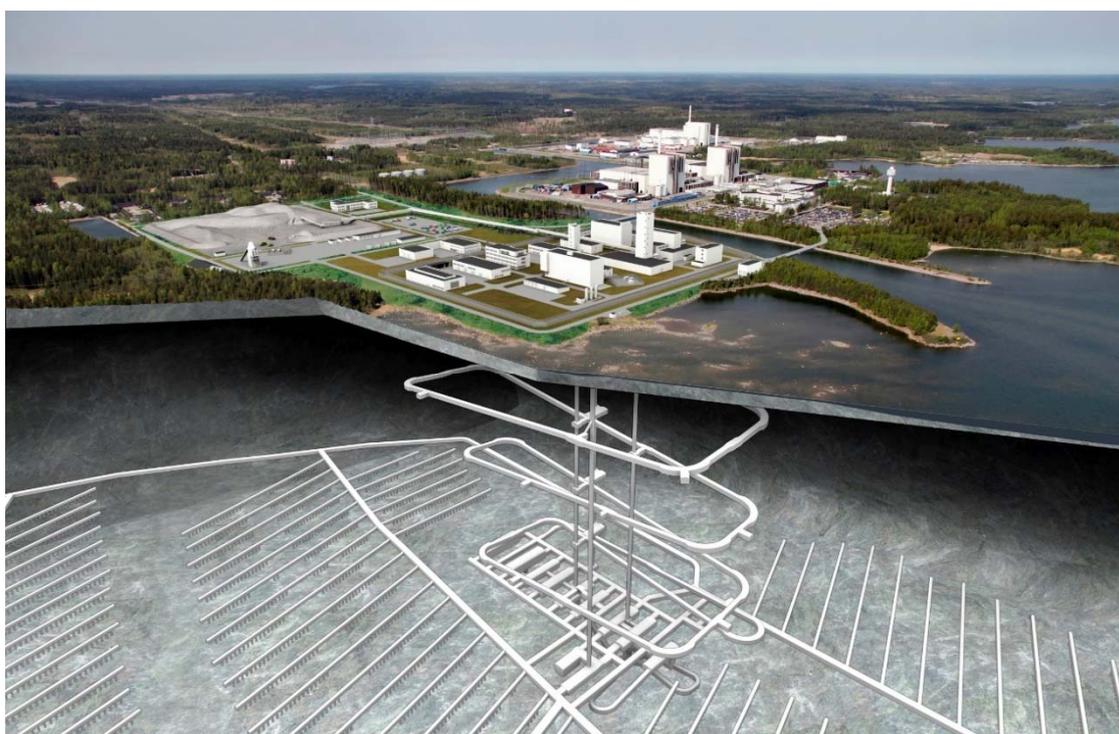
123. La Plate-forme technologique sur le stockage géologique des déchets nucléaires, consortium auto-financé d'organismes de gestion des déchets radioactifs qui coopèrent sur des questions de RDD présentant un intérêt commun, a publié son programme de recherche stratégique actualisé. L'accent y est mis sur l'efficacité et l'industrialisation de la mise en place des futurs dépôts géologiques profonds et sur l'élaboration de nouveaux modèles convenant à de plus petits stocks.

124. La feuille de route exhaustive du Programme conjoint européen de recherche sur la gestion des déchets radioactifs (EURAD) a été présentée aux utilisateurs finals intéressés. Elle définit une approche structurée pour la réalisation des objectifs de la gestion des déchets radioactifs, couvrant notamment l'analyse des écarts et les nouveaux besoins en matière de RDD, les études stratégiques axées sur la gestion des petits stocks et la gestion des connaissances, et met en relief l'importance de la formation et du transfert des connaissances.

125. L'Union européenne a lancé le projet PREDIS (Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif), qui porte avant tout sur les travaux de RDD à mener sur le traitement et le conditionnement avant stockage définitif des flux de déchets radioactifs autres que le combustible nucléaire et les déchets de haute activité.

126. Le groupe de travail de l'ERDO (Organisation européenne pour la mise en place de dépôts) a lancé un projet de coopération faisant intervenir la Croatie, le Danemark, la Norvège, les Pays-Bas et la Slovénie pour coordonner les travaux d'évaluation de la viabilité du stockage en puits des stocks de déchets de haute activité.

127. Le nombre croissant d'expériences réussies constitue une tendance favorable pour la gestion des déchets. En Suède, le conseil municipal d'Östhammar a voté en faveur du dépôt de combustible nucléaire usé prévu à Forsmark (figure C-6), qui devrait être construit par la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB). La décision finale d'autoriser ou non le projet appartient au Gouvernement suédois.



*FIG. C-6. Représentation artistique de l'installation souterraine de stockage définitif de Forsmark.
(Source : SKB)*

128. En France, une autorisation de mise en service a été délivrée à l'installation de conditionnement et d'entreposage de déchets activés ICEDA, ce qui permet à Électricité de France de conditionner et d'entreposer des déchets radioactifs en prévision de leur stockage définitif selon une des nombreuses options disponibles dans le pays.

129. À la fin de 2020, environ 42 États Membres avaient désigné un coordonnateur national du Système d'information sur le combustible usé et les déchets radioactifs, et 83 États Membres étaient Parties contractantes à la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs.

D. Réacteurs de recherche et accélérateurs de particules

D.1. Réacteurs de recherche

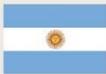
Situation

130. Durant la pandémie de COVID-19, il a été déclaré que les réacteurs de recherche produisant des radio-isotopes médicaux pour la communauté mondiale fournissaient des services essentiels pour réduire au minimum l'effet des restrictions dues à la pandémie. Tous les organismes qui exploitent des réacteurs ont mis en place des mesures préventives destinées à garantir la sûreté des installations et du personnel pendant la pandémie. Certains établissements de recherche et universités qui exploitent des réacteurs de recherche pour l'enseignement, la formation et la recherche ont provisoirement mis à l'arrêt leurs installations, les maintenant dans un état sûr. Les restrictions liées à la COVID-19 ont compliqué le transport des radio-isotopes, comme il est ressorti d'une enquête menée par l'Agence auprès des principaux fournisseurs de radio-isotopes médicaux produits en réacteur, qui visait à évaluer les conséquences de la pandémie sur la continuité de la chaîne d'approvisionnement. Le Secrétariat a organisé à l'intention des États Membres une réunion d'information technique informelle sur la production de radio-isotopes en réacteur de recherche, ainsi que sur l'utilisation des cyclotrons médicaux, le transport et la production de radiopharmaceutiques, et la demande de ces produits pendant la pandémie de COVID-19.

131. Onze nouveaux réacteurs de recherche sont en construction dans huit pays : Arabie saoudite, Argentine, Brésil, Fédération de Russie, France, Inde, République de Corée et Ukraine (un système hybride). Plusieurs États Membres avaient des plans de construction formellement établis : le Bangladesh, le Bélarus, la Belgique, la Bolivie, la Chine, les États-Unis d'Amérique, le Nigeria, les Pays-Bas, le Tadjikistan (achèvement du réacteur Argus-FTI), la Thaïlande, le Viet Nam et la Zambie. D'autres, comme l'Afrique du Sud, l'Azerbaïdjan, l'Éthiopie, le Ghana, le Kenya, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Niger, les Philippines, la République-Unie de Tanzanie, le Sénégal, le Soudan et la Tunisie, envisagent de construire de nouvelles installations.

Nouveaux projets de réacteurs de recherche

11 nouveaux réacteurs de recherche
sont en construction dans **8** pays

	Argentine		République de Corée
	Brésil		Fédération de Russie
	France		Arabie saoudite
	Inde		Ukraine

plans de construction formellement établis

	Bangladesh		Nigeria
	Bélarus		Tadjikistan
	Belgique		Thaïlande
	Bolivie		États-Unis
	Chine		Viet Nam
	Pays-Bas		Zambie

construction envisagée

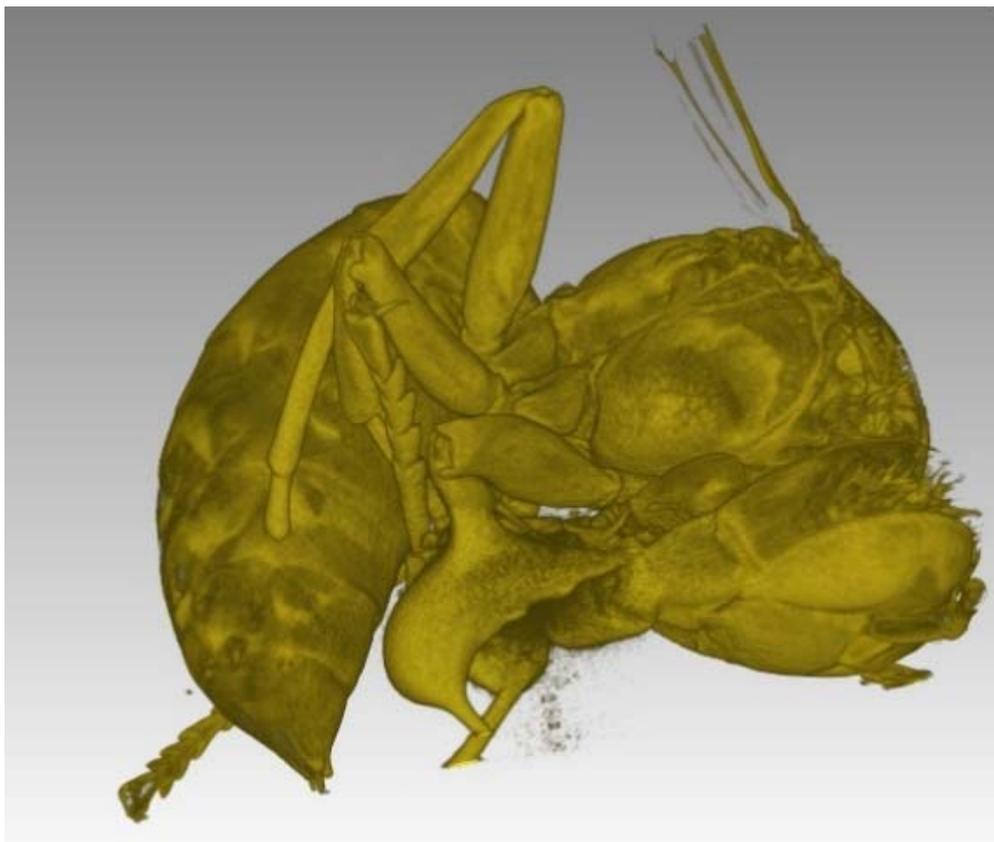
	Azerbaïdjan		Niger
	Éthiopie		Philippines
	Ghana		Sénégal
	Kenya		Afrique du Sud
	Malaisie		Soudan
	Mongolie		Tunisie
	Myanmar		Tanzanie

132. Les réacteurs de recherche restaient indispensables pour fournir des radio-isotopes aux secteurs médical et industriel, des faisceaux de neutrons destinés à la recherche sur les matériaux et aux essais non destructifs, des services d'analyse et d'irradiation aux secteurs public et privé, ainsi que des services aux fins des études menées sur le patrimoine culturel et l'environnement. Ils apportent une contribution stratégique à la formation théorique et pratique (figure D-1). Leurs applications les plus courantes sont présentées dans le tableau D-1 en annexe.



FIG. D-1. Les réacteurs de recherche ont des usages divers allant de la formation théorique et pratique à des applications dans l'industrie, la médecine et d'autres domaines. (Photo : AIEA)

133. L'imagerie neutronique numérique repose normalement sur l'emploi de sources de neutrons de haute intensité, mais il est désormais possible d'utiliser des sources de neutrons d'intensité plus faible pour l'imagerie neutronique standard (radiographie et tomographie, par exemple), avec des flux internes au cœur de l'ordre de $10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Ceci est dû aux récents progrès des caméras astronomiques, qui ont permis de mettre au point des systèmes peu onéreux d'imagerie neutronique numérique relativement simples. La qualité d'image est compétitive pour les applications standard et suffisante pour environ 80 % de toutes les applications d'imagerie (figure D-2). Cette avancée devrait donner lieu à un développement de l'imagerie nucléaire basée sur l'utilisation de sources de neutrons d'intensité plus faible, qu'il s'agisse de réacteurs de recherche ou d'accélérateurs. En 2020, l'Agence a lancé une formation en ligne sur l'imagerie neutronique dont cette évolution est l'un des thèmes.



*FIG. D-2. Image 3D haute résolution d'un frelon obtenue par tomodensitométrie.
(Photo : Burkhard Schillinger, Technische Universität München, Allemagne)*

134. À ce jour, 107 réacteurs de recherche et quatre installations de production d'isotopes médicaux qui fonctionnaient à l'uranium hautement enrichi (UHE) ont été transformés pour pouvoir utiliser de l'UFE, ou leur mise à l'arrêt a été confirmée. En 2020, le Kazakhstan a éliminé ce qui lui restait d'UHE non irradié en le diluant par mélange jusqu'à atteindre un niveau d'enrichissement inférieur à 20 % et a poursuivi les préparatifs en vue du retrait et de l'évacuation du combustible à l'UHE irradié. Au total, les programmes menés dans le monde ont permis le retrait et l'évacuation confirmée d'environ 6 815 kg d'UHE provenant de Chine, des États-Unis, de Russie et d'ailleurs.

135. Les initiatives internationales visant à convertir les fabricants d'isotopes médicaux à l'utilisation de cibles à l'UFE plutôt qu'à l'UHE se sont poursuivies. En Belgique, l'Institut national des radioéléments a commencé à produire à des fins commerciales du molybdène 99 à partir d'UFE, rejoignant ainsi les autres producteurs mondiaux de premier plan de ce radio-isotope très demandé en médecine. Il prévoit d'en accroître encore la production sans UHE et d'achever sa totale reconversion d'ici 2022.

Tendances

136. L'intérêt pour les réacteurs de recherche a continué de croître dans le monde. De nombreux pays tirent profit des possibilités d'accès au parc de ces réacteurs, offertes notamment grâce aux sessions régionales d'écoles que l'Agence organise pour la création de capacités dans ce domaine et au programme des centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR). En 2020, l'Institut de recherche nucléaire de Pitesti (Roumanie) a été désigné pour la première fois comme un tel centre, tandis que la désignation du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives était renouvelée pour une nouvelle période de cinq ans. Les outils de formation en ligne et de création de capacités, tels que le réacteur-laboratoire par Internet de l'Agence, ont été davantage utilisés, faisant l'objet d'un intérêt et d'un soutien accrus de la part du Secrétariat et des États Membres.

137. Plus de 60 % des réacteurs de recherche exploités dans le monde le sont depuis plus de 40 ans. Si leur cycle de vie peut atteindre 60 ans ou plus, il est primordial de mettre rapidement en place des programmes adéquats de gestion du vieillissement, de rénovation et de modernisation. Le financement de ces installations a tendance à tarir et la planification de la relève s'avère limitée ; c'est pourquoi des systèmes de gestion rationnels et des programmes d'exploitation et de maintenance et de gestion de la durée de vie sont indispensables pour que les réacteurs de recherche puissent remplir leur mission de manière économique.

D.2. Accélérateurs de particules et instrumentation

Situation

138. Au cours des dix dernières années, de nombreux États Membres se sont davantage intéressés à la mise au point de sources compactes de neutrons alimentées par accélérateur (CANS) comme moyen de parer au vieillissement du parc de réacteurs de recherche de faible ou de moyenne puissance, aussi plus de 50 projets de ce type sont-ils en cours dans une vingtaine de pays dans le monde. Les CANS englobent de nombreuses catégories d'accélérateurs générant des flux de neutrons de l'ordre de 10^{11} - 10^{13} s⁻¹ cm⁻² pour diverses applications. En 2020, le Centre Jülich, en Allemagne, membre de l'Association Helmholtz, a mené à bien l'étude de conception d'un appareil de type CANS basé sur un accélérateur linéaire (linac) de protons à haute intensité, qui doit servir d'installation nationale de diffusion neutronique. Une telle source compacte de neutrons, relativement peu onéreuse et ne nécessitant qu'une infrastructure légère, pourrait être utilisée en conjonction avec différents instruments à des fins d'analyse et se prêterait à une utilisation par les universités et le secteur privé, ce qui améliorerait la disponibilité et l'applicabilité des techniques faisant appel aux faisceaux de neutrons.

139. La figure D-3 représente un autre exemple de nouveau linac supraconducteur à haute intensité, doté d'aires expérimentales. Cette installation, baptisée SPIRAL2, est actuellement en cours de mise en service au centre de recherche GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) en France. Elle sera employée pour l'étude de noyaux lourds à courte période et pour des applications dans les domaines de la fission, de la fusion et de la science des matériaux nécessitant l'utilisation de faisceaux de particules chargées et de neutrons. Les faisceaux d'ions légers du linac (notamment des faisceaux de particules alpha, de lithium 6 ou de lithium 7 bombardés sur des cibles de plomb et de bismuth) seront également mis à profit pour la recherche de méthodes permettant de produire plus efficacement certains radio-isotopes destinés à la cancérothérapie.

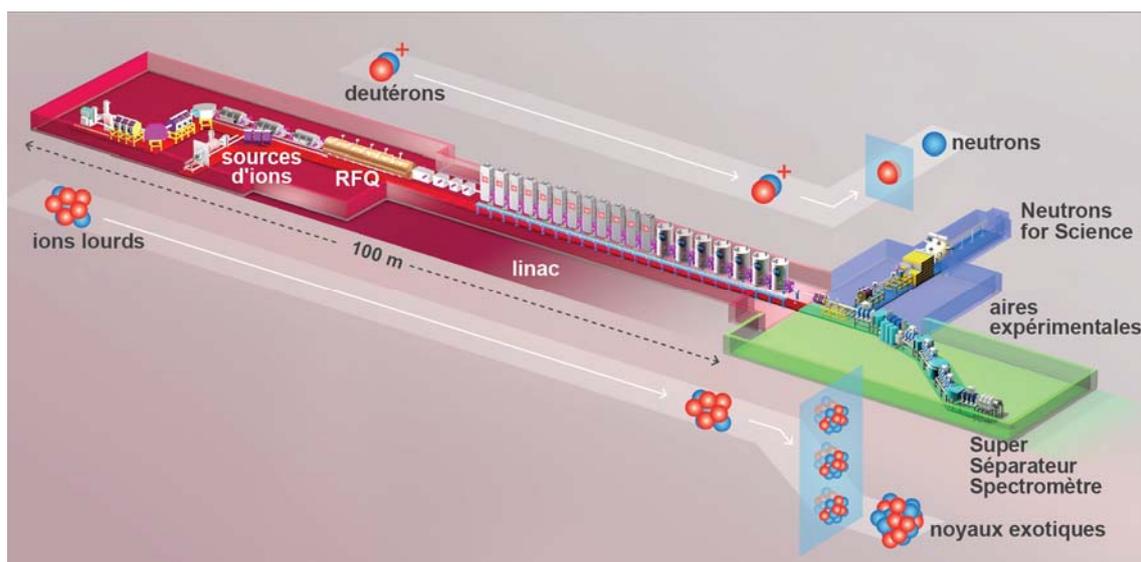


FIG. D-3. L'installation SPIRAL2 et son linac supraconducteur à haute intensité (200 kW). La ligne de faisceaux Neutrons for Science générera des faisceaux de neutrons d'intensités inégales jusqu'ici dans la gamme d'énergie comprise entre 1 et 40 MeV, soit jusqu'à deux ordres de grandeur de plus que les installations analogues. (Image : Alahari Navin, GANIL, France)

140. La figure D-4 représente un autre projet fondé sur un accélérateur linéaire de protons/deutérons supraconducteur de forte puissance (200 kW). Cet accélérateur entre en phase 2, c'est-à-dire que son énergie va passer de 5 à 40 MeV et que l'intensité de sa source de neutrons pourrait atteindre jusqu'à 10^{15} n/s dans diverses applications, notamment pour la recherche fondamentale à l'aide de neutrons.



FIG. D-4. L'accélérateur linéaire de protons/deutérons supraconducteur de forte puissance (200 kW) (à gauche), associé à la technologie innovante de production de neutrons à l'aide d'une cible de lithium liquide (à droite). (Image : Dan Berkowitz, Soreq Nuclear Research Center, Israël)

141. En Finlande, le Centre hospitalier universitaire d'Helsinki arrive au terme de la phase de mise en service, dans ses murs, d'une source de neutrons alimentée par un accélérateur de protons compact (accélérateur électrostatique de 2,6 MV conçu pour fonctionner à 30 mA), l'objectif principal étant d'entreprendre des essais thérapeutiques par capture de neutrons par le bore et, à terme, de s'en servir pour le traitement des patients. Les neutrons sont produits sur une cible de lithium rotative.

142. Les détecteurs de rayonnements destinés à des véhicules aériens sans pilote (UAV) ont fait l'objet d'avancées notables. Les systèmes de spectrométrie gamma utilisant des scintillateurs tels que le bromure de lanthane (III) (LaBr_3) ou le bromure de cérium (III) (CeBr_3) gagnent du terrain sur les simples compteurs Geiger-Müller. La mise sur le marché de détecteurs à scintillation faisant appel à des photomultiplicateurs en silicium et intégrant un générateur de polarisation à compensation de température ainsi qu'un préamplificateur est l'une des récentes avancées enregistrées dans le domaine de la cartographie radiologique pour la détection de rayonnements à l'aide d'UAV. Cette innovation permet un traitement numérique rapide du signal du détecteur et un traitement en temps réel de l'ensemble des données mesurées avec un géoréférencement GNSS (Système mondial de navigation par satellite) précis, pour une cartographie haute résolution (figure D-5) des intensités de rayonnement et l'identification des isotopes.

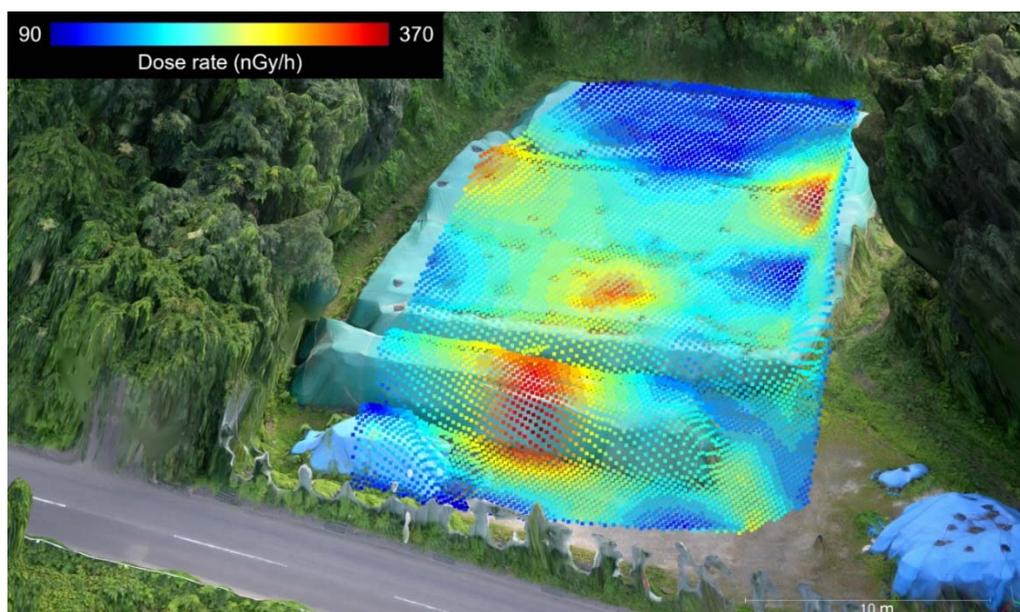


FIG. D-5. Carte radiologique haute résolution (en rouge, les débits de doses élevés) associée à une photogrammétrie aérienne 3D. Cette carte a été réalisée à l'aide d'un seul UAV ayant effectué deux vols consécutifs. (Image : AIEA)

Tendances

143. On assiste à une accélération des progrès des systèmes de contrôle radiologique par UAV/drones qui s'explique principalement par le développement de la technologie des UAV et la miniaturisation des détecteurs de rayonnements, ainsi que par leur utilisation en combinaison avec les systèmes GNSS et des algorithmes rapides de traitement des données. Les besoins en flexibilité et en opérabilité des systèmes de contrôle mobiles allant croissant, la priorité va aux solutions reposant sur des UAV pour la cartographie radiologique de zones dangereuses ou inaccessibles aux personnes, la recherche de sources de rayonnements et la mise en œuvre rapide des interventions d'urgence à la suite d'incidents ou d'accidents radiologiques. Gagnant en robustesse, les UAV résistent de mieux en mieux aux températures et aux taux d'humidité de l'environnement dans lequel ils évoluent, et ils sont mieux protégés contre l'eau et la poussière. Par ailleurs, ils gagnent en autonomie grâce à des fonctions améliorées pour les vols prolongés, des capteurs environnementaux, des fonctionnalités de cartographie avancées ainsi que des algorithmes de traitement des données rendus plus performants par l'intelligence artificielle.

144. Les méthodes mettant à profit l'apprentissage automatique pourraient faire considérablement progresser la science et les applications nucléaires dans plusieurs domaines, tels que la stadification du cancer en médecine nucléaire et son traitement par radiothérapie ; elles pourraient aussi donner lieu à une accélération des progrès de la recherche sur la fusion nucléaire et favoriser la protection de l'environnement, en particulier des ressources mondiales en eau, contre la surexploitation et la contamination. De nombreux exemples très récents attestent les avantages déterminants du renseignement forensique, qui a apporté des solutions technologiques pour la lutte contre la criminalité dans différents pays. L'analyse des preuves basées sur les éléments traces est une composante essentielle des enquêtes en criminalistique. Les algorithmes d'apprentissage automatique sont de plus en plus souvent mis à profit dans ce domaine pour résoudre des problèmes encore irrésolus. Permettant également de reconnaître des schémas récurrents ou de classer divers échantillons, les méthodes d'apprentissage automatique sont appréciées pour la résolution de ces problèmes.

145. Par exemple, dans le cadre de l'analyse criminalistique du verre, des échantillons sont généralement comparés sur la base de leur composition élémentaire. Si les fragments de verre brisé sont suffisamment grands, les spécialistes de la criminalistique peuvent en déterminer la forme initiale et l'origine, ce qui est impossible par des moyens traditionnels lorsque les fragments sont petits. En pareil cas, il est possible d'établir des correspondances entre un suspect et le lieu d'un délit en faisant appel à des techniques nucléaires telles que l'analyse par émission X induite par des particules (PIXE) et

l'analyse par activation neutronique, associées à des outils d'apprentissage automatique et à des bases de données (inventaires) sur la fabrication de verre (figure D-6).

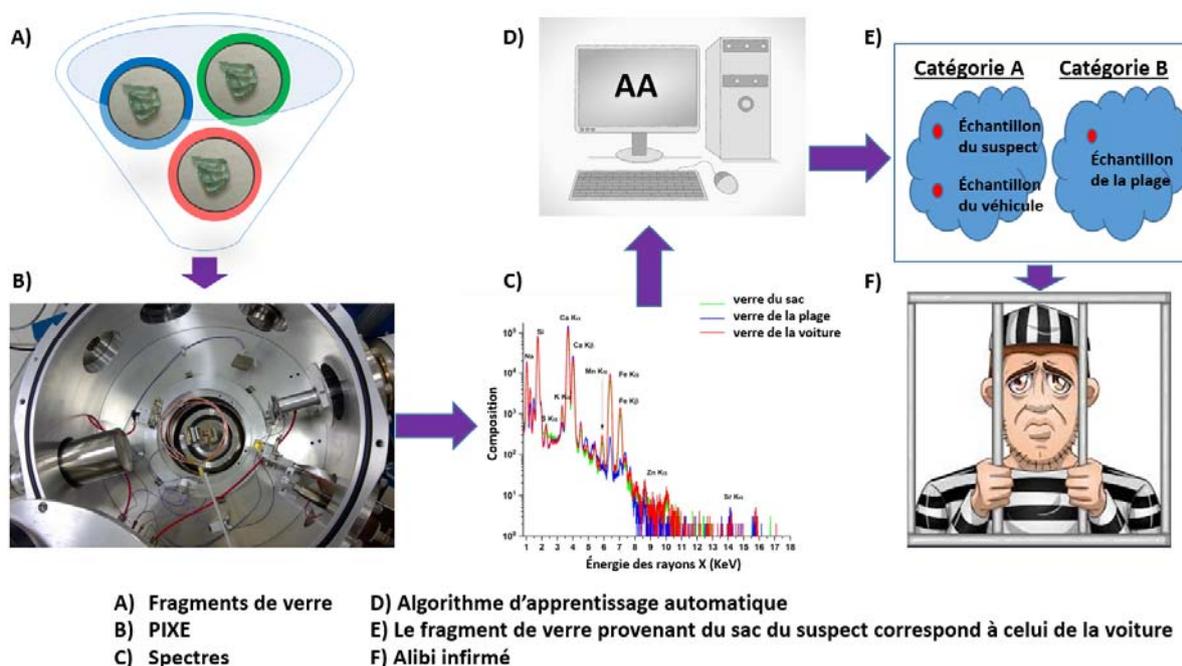


FIG. D-6. Mode opératoire fondé sur l'apprentissage automatique. Pour commencer, après prélèvement d'échantillons sur le lieu du délit (A), leurs éléments sont analysés par PIXE (B). Les mesures obtenues sont analysées et (C) traitées à l'aide de modèles d'apprentissage automatique (D) qui classent les échantillons dans différentes catégories (E). Forts de ces informations, les enquêteurs peuvent confirmer ou infirmer un alibi. Le classement effectué à l'étape (E) a démontré que, pour ce cas d'accident avec délit de fuite, le fragment trouvé sur le suspect et celui prélevé sur le véhicule à l'origine de l'accident appartenaient à la même catégorie, contrairement au fragment prélevé sur la plage, ce qui donnait à entendre qu'il existait un lien entre le suspect et ledit véhicule. (Image : Institut des nanotechnologies et des matériaux avancés, Université Bar-Ilan, Israël)

E. Alimentation et agriculture

E.1. Marquage isotopique et techniques nucléaires innovantes pour la mesure des résidus dans l'alimentation – Répondre aux besoins en matière de santé publique et de commerce

Situation

146. Au cours du processus de production alimentaire dans le monde entier, des produits chimiques tels que les médicaments vétérinaires et les pesticides sont utilisés. Cependant, la présence de résidus de produits chimiques dans les aliments suscite des préoccupations en matière de santé publique et de commerce. Elle doit donc être réglementée à l'aide de normes, les « limites maximales de résidus » (LMR), qui fixent les concentrations les plus élevées autorisées dans ou sur les denrées alimentaires et ont des incidences sur le commerce. Les LMR établies par la Commission du Codex Alimentarius sont citées en référence dans l'Accord sur l'application des mesures sanitaires et phytosanitaires de l'Organisation mondiale du commerce. Des LMR harmonisées bénéficient aux gouvernements, aux agriculteurs, aux commerçants et aux entreprises, mais leur absence désorganise fortement les échanges commerciaux⁶. Aucune LMR n'est actuellement appliquée à plusieurs composés chimiques utilisés dans la production alimentaire.

⁶ Coalition for an Enhanced Codex, consultable (en anglais) à l'adresse suivante : <https://agrifood.net/iafn-codex-coalition>.

147. Pour déterminer les LMR applicables aux médicaments vétérinaires et combler ainsi les lacunes dans les normes alimentaires, il faut disposer d'informations sur le métabolisme animal (déplétion des résidus) tirées d'études menées à l'aide de substances radiomarquées. Les techniques nucléaires notamment peuvent permettre la traçabilité et les mesures précises nécessaires aux études sur le métabolisme.

148. On administre les médicaments ou les composés chimiques associés, marqués à l'aide d'isotopes tels que le carbone 14, le soufre 35, le phosphore 32 et l'hydrogène 3, à certains animaux destinés à l'alimentation afin d'en suivre la diffusion et la décomposition en résidus et en métabolites essentiels, en particulier dans les tissus comestibles (p. ex. les muscles, le foie, les reins et la graisse). Les études de marquage isotopique, considérées comme « la » référence en matière d'études sur le métabolisme, qui sont menées dans l'industrie pharmaceutique humaine et animale et en agrochimie, produisent des données qui facilitent l'évaluation de la sûreté et, partant, aident à protéger les consommateurs. À l'heure actuelle, les niveaux de radioactivité sont déterminés par combustion et solubilisation des tissus animaux, et il faut recourir à des techniques de mesure précises et fiables pour confirmer le type et la concentration des résidus.

Tendances

149. La quantité de produits chimiques employés dans la production alimentaire évolue dans le monde. Chaque année, des médicaments et des produits chimiques sont mis au point pour faire face à de nouveaux défis. La demande de réglementation de ces produits a donc cru et, à ce titre, les études de marquage isotopique sont techniquement irremplaçables. Les composés radiomarqués jouent un rôle primordial, car ils permettent de tracer et d'étudier tous les résidus chimiques dans les différents tissus.

150. Les outils et les techniques telles que la résonance magnétique nucléaire à l'hydrogène 3 et au carbone 13, la mesure par compteur à scintillateur liquide, le titrage de radiorécepteurs et le radio-immunos dosage sont nécessaires à l'analyse et à la caractérisation des composés radiomarqués dans les tissus animaux lors des études sur le métabolisme. La production de données exactes nécessite également des techniques et méthodes nucléaires d'analyse, telles que des techniques compétitives de dosage radio-récepteur, appuyées par une spectrométrie de masse de haute résolution. Enfin, de nouvelles techniques d'autoradiographie viennent s'ajouter aux outils de recherche disponibles, facilitant la quantification et la visualisation de la radioactivité dans les tissus intacts et les organes.

151. Des informations récentes portent à penser que l'administration de médicaments aux animaux destinés à l'alimentation peut laisser des résidus qui, étant difficiles à extraire des tissus, ne sont donc pas détectés lors de l'analyse en laboratoire des aliments destinés à la consommation humaine. Ces résidus peuvent représenter un risque toxicologique pour les consommateurs. Il est donc nécessaire de mettre au point des méthodes d'analyse innovantes pour révéler ces dangers « cachés ».

152. S'agissant de la sécurité sanitaire des aliments, il convient aussi de noter que certaines régions commencent à avoir besoin de données scientifiques pour accompagner l'établissement de normes et de LMR applicables aux denrées alimentaires qui ont de l'importance au niveau local ou régional, comme les abats. Ce type de denrées alimentaires fera l'objet de nouvelles études sur le métabolisme animal par marquage isotopique. À l'heure actuelle, ces études ne ciblent qu'un seul médicament ou composé chimique à la fois, alors que des cocktails de médicaments sont utilisés dans la production alimentaire. L'information ainsi obtenue étant donc incomplète, des études seront désormais menées avec des mélanges de produits chimiques.

153. Les études de marquage isotopique peuvent également contribuer à répondre à la demande d'harmonisation, par les responsables de la gestion du risque, des normes et des LMR relatives aux composés chimiques utilisés dans la production animale et végétale, qui commence à s'exprimer à l'échelle mondiale. De fait, la pratique actuelle consistant à fixer des normes séparément pour les produits animaux et les produits végétaux ne permet pas de visualiser clairement le niveau de risque représenté par les aliments consommés.

154. Les pays en développement se montrent de plus en plus intéressés à l'idée de participer aux études de marquage isotopique menées sur les animaux et de produire des données scientifiques pour la

définition de normes, compte tenu des incidences que les lacunes dans les LMR ont sur leurs économies et sur les besoins de leurs consommateurs. À cet égard, l'Agence a lancé récemment un projet de recherche coordonnée (PRC) sur la déplétion des résidus de médicaments vétérinaires et des substances associées utilisés dans la production animale, qui suscite l'intérêt de plusieurs États Membres. Les travaux, qui porteront notamment sur les espèces animales telles que les bovins, les équidés, les poissons, les ovins et les caprins (figure E-1), pourront éventuellement être étendus à certaines cultures, en particulier celles concernées par la contamination des aliments du bétail. Ce PRC devrait aider les pays en développement à moins dépendre des installations et établissements étrangers pour la conduite des études de marquage isotopique devant aboutir à la production de données relatives à l'évaluation du risque et à l'établissement de LMR destinées à faciliter le commerce et à protéger les consommateurs.



FIG. E-1. Quelques animaux sélectionnés pour les études de marquage isotopique axées sur la déplétion, au Soudan. (Photo : AIEA)

F. Santé humaine

F.1. Avancées en microdosimétrie et en nanodosimétrie

Situation

155. La microdosimétrie, sous-domaine de la physique des rayonnements, traite de l'étude systématique de la distribution spatiale de l'énergie absorbée dans des structures microscopiques au sein de la matière irradiée. Bien qu'elle ait vu le jour il y a plus de 60 ans, elle continue de susciter l'intérêt de nombreux scientifiques en médecine radiologique, en radioprotection, en radiobiologie et dans d'autres domaines tels que la recherche spatiale.

156. En médecine radiologique, la microdosimétrie est particulièrement intéressante pour la thérapie par faisceaux d'ions, technique de pointe qui consiste à utiliser des faisceaux de protons et d'ions carbone, au lieu des photons traditionnels, pour détruire plusieurs tumeurs tout en réduisant le plus possible les effets dommageables sur les tissus sains. Dans cette application, la mesure de la dose absorbée habituellement effectuée ne permet pas d'expliquer les effets de l'irradiation, car l'efficacité radiobiologique varie le long du parcours d'un faisceau d'ions utilisé dans le corps humain à des fins cliniques.

157. Par conséquent, en radioprotection et dans plusieurs applications de médecine radiologique, des facteurs de pondération macroscopique sont appliqués à la dose absorbée pour qu'il soit tenu compte de l'efficacité biologique de la qualité de rayonnement concernée (nombre relatif de particules en fonction du type et de l'énergie aux emplacements étudiés dans la matière cible). C'est le cas notamment pour les faisceaux de protons et d'ions, les neutrons et les rayons X d'un kilovolt employés en curiethérapie. La microdosimétrie et la nanodosimétrie (aussi appelée microdosimétrie structurale) permettent de mesurer les quantités de rayonnements tout en tenant compte de l'influence de la nature de leurs interactions et donc des propriétés des différentes qualités de rayonnements dont dépend leur efficacité biologique.

158. La microdosimétrie est un vaste domaine interdisciplinaire qui couvre à la fois la simulation et la modélisation, l'élaboration de détecteurs et d'instruments spécialisés, les applications cliniques et d'autres applications.

159. Il n'existe pas un seul microdosimètre capable de caractériser convenablement tous les différents rayonnements ionisants, et les études menées récemment dans le monde s'articulent autour de détecteurs conçus pour des applications particulières. Pour les courants de faisceaux d'ions intenses utilisés à des fins thérapeutiques, l'objectif est de réduire la taille du détecteur à moins d'un millimètre tandis que, pour la radioprotection et les applications spatiales, des microdosimètres à champ large sont mis au point.

Tendances

160. Plusieurs problèmes doivent encore être réglés avant que la dosimétrie ne puisse devenir la norme pour l'estimation des effets biologiques dans différentes applications des technologies des rayonnements. Il est notamment fondamental de normaliser les données microdosimétriques, ce qui nécessite d'étudier le budget d'incertitudes.

161. La première étape consiste à élaborer des méthodes et des mécanismes communs pour présenter les données microdosimétriques. Il faut encore intensifier les efforts pour comparer les microdosimètres qui sont de formes et de matières différentes, avec un volume sensible différent, pour obtenir des résultats univoques quel que soit le détecteur. En outre, il faudrait étudier les données dosimétriques afin de prédire l'évolution des paramètres retenus pour une utilisation donnée des détecteurs : le transfert linéique d'énergie pour la thérapie par faisceaux d'ions (figure F-1), l'efficacité biologique relative en radiobiologie et le facteur de qualité en radioprotection.



FIG. F-1. La microdosimétrie peut notamment apporter une contribution précieuse pour la planification et la mise en œuvre de la thérapie par faisceaux d'ion. Dans cette salle d'irradiation, au centre de thérapie par faisceaux d'ion MedAustron, à Wiener Neustadt (Autriche), des faisceaux de protons et d'ions carbone sont utilisés pour le traitement de tumeurs. Le bras robotisé fixé au plafond soutient la table d'examen tandis que l'anneau d'imagerie à rayons X sert à aligner le patient. (Source : MedAustron, Autriche. Auteur : Kästenbauer/Ettl.)

162. L'Agence peut jouer un rôle stratégique dans ce domaine en mettant à disposition les compétences multidisciplinaires et l'environnement requis. La réunion technique sur les nouvelles tendances et les avancées en microdosimétrie et les applications connexes, qu'elle a organisée en octobre 2020, a permis de définir les lignes directrices de recherches à venir, et surtout les principaux thèmes, par exemple les faisceaux d'ions, les questions de radioprotection, la modélisation biologique et la nanodosimétrie. Ces grands axes définiront le cadre d'action des travaux de recherche-développement que l'Agence mènera dans ces domaines au cours des prochains cycles de programmation.

G. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements

G.1. Le rôle des radiopharmaceutiques dans la détection, le diagnostic et la prise en charge des maladies infectieuses

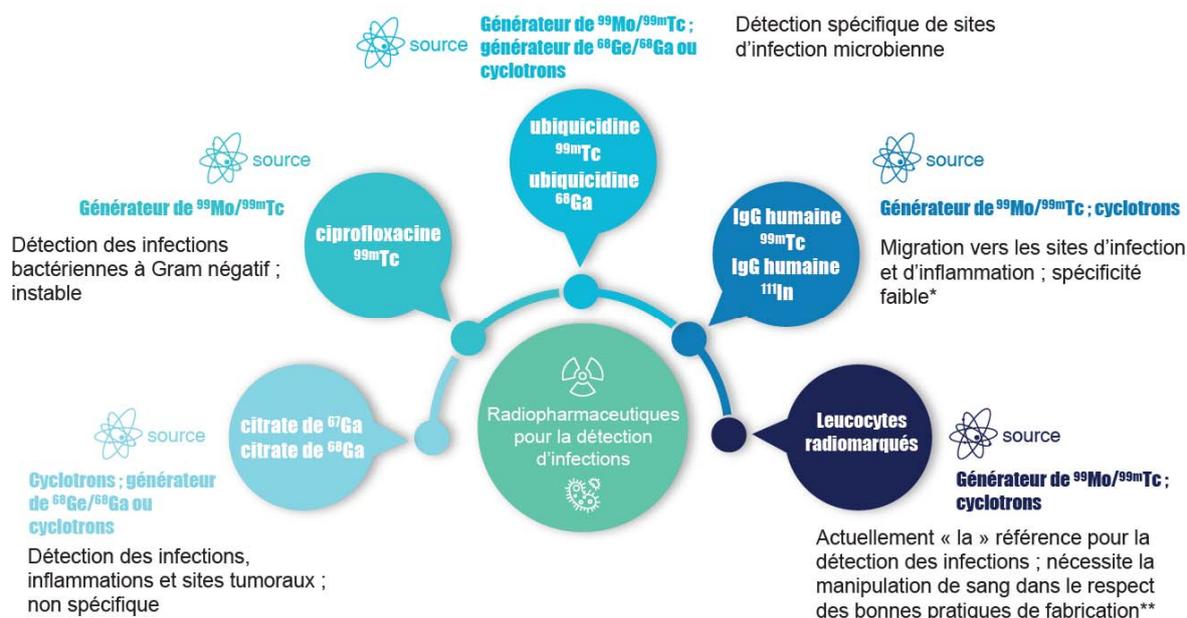
Situation

163. Les maladies infectieuses représentent une menace pour la population humaine, comme le montre la pandémie actuelle de COVID-19. Si les scientifiques, dans toutes les disciplines, cherchent avant tout à mieux comprendre ces maladies à l'aide de technologies avancées, le développement des radiopharmaceutiques en est à un stade où la visualisation non invasive des processus cellulaires et biochimiques devient possible, ce qui ouvre la voie à l'utilisation des radiopharmaceutiques pour le diagnostic et le traitement potentiel des maladies infectieuses humaines.

164. La détection précoce et le traitement rapide des maladies infectieuses jouent un rôle majeur dans le contrôle et la réduction de la morbidité et de la mortalité. La réponse immunitaire à l'infection est un phénomène complexe et, idéalement, un radiopharmaceutique devrait pouvoir distinguer les organismes vivants infectieux des agents non pathogènes et des autres sources d'infection et d'inflammation dans

le corps humain. Il devrait ne faire apparaître la quantité accumulée et sa rétention que dans les tissus atteints pour assurer la fiabilité du diagnostic ou de l'évaluation de la réponse au traitement.

165. Plusieurs radiopharmaceutiques jouent un rôle majeur dans la détection non invasive des infections en milieu clinique mais aucun ne permet d'en déterminer clairement la cause précise, ni de distinguer les différents types d'infections.



* Mise au point de trousse de radiopharmaceutiques au ^{99m}Tc pour l'imagerie d'infections (IAEA-TECDOC-1414)

** Radiolabelled Autologous Cells: Methods and Standardization for Clinical Use (IAEA Human Health Series No. 5)

Tendances

166. Face à la complexité croissante des infections, notamment des viroses mortelles apparues ces dernières décennies comme celle due au virus de l'immunodéficience humaine (VIH), le syndrome respiratoire aigu sévère, la grippe aviaire, la fièvre Ebola et la COVID-19, plusieurs molécules prometteuses permettant de détecter et de diagnostiquer une infection particulière dans les corps ou des échantillons humains sont en cours d'identification.

167. Depuis plus de 20 ans, l'AIEA, en partenariat avec la FAO, forme des experts du monde entier et les équipes pour utiliser des technologies immunologiques [p. ex. radio-immunodosage (RIA), dosage immuno-enzymatique (ELISA)] et moléculaires [réaction de polymérisation en chaîne (PCR)] nucléaires et dérivées du nucléaire. Ces technologies sensibles et précises et leurs applications sont de plus en plus utilisées pour la détection, la caractérisation, la surveillance et le contrôle rapides des zoonoses et maladies animales transfrontières. Récemment, elles ont été employées pour diagnostiquer des maladies infectieuses à potentiel pandémique, telles que la peste porcine africaine, la fièvre aphteuse, la fièvre Ebola, la maladie à virus Zika, la grippe aviaire, le MERS, le SRAS et récemment la COVID-19. Les laboratoires de l'Agence à Seibersdorf ont fourni des avis et services d'experts, des instructions permanentes d'opération (IPO), des formations à l'utilisation des équipements de protection individuels (EPI), des formations de renforcement des capacités techniques et des formations aux procédures de test avec les colis de l'Agence destinés à la lutte contre la COVID-19 (matériel, réactifs et consommables) à plus de 120 États Membres.

168. Les anticorps monoclonaux (AcM), qui peuvent être produits à grande échelle dans des laboratoires spécialisés, ont évolué depuis leur découverte en 1973 et peuvent maintenant être intégrés dans de nouveaux traitements faisant appel à la biologie macromoléculaire. Ceux qui sont utilisés dans

le cadre du traitement des tumeurs peuvent être couplés à des antigènes tumoraux afin de transporter des radionucléides vers un site tumoral donné. Cette nouvelle technique a conduit à l'utilisation de MAb radiomarqués contenant des radio-isotopes émetteurs de photons qui, après injection dans le corps humain, peuvent être utilisés pour le diagnostic du cancer. Elle est connue sous le nom de radio-immunoscintigraphie (RIS).

169. Par la suite, les scientifiques ont mis au point des AcM radiomarqués contenant des radio-isotopes émetteurs bêta à même d'identifier et de cibler les cellules tumorales, pour bombarder celles-ci avec des particules bêta de haute énergie afin de les détruire, technique appelée « radio-immunothérapie » (RIT).

170. Après la découverte que des molécules étrangères à la surface des microbes pouvaient déclencher la production d'AcM spécifiques contre des micro-organismes particuliers dans un hôte, la RIS et la RIT peuvent être utilisées pour la détection de diverses maladies infectieuses, notamment fongiques, virales ou bactériennes, et potentiellement pour leur traitement. Les bases de données d'essais cliniques comportent au moins 88 études d'utilisation d'AcM sur des personnes atteintes de COVID-19. Des études préliminaires portent également sur l'utilisation de RIS pour diagnostiquer la COVID-19 sur la base d'antigènes viraux spécifiques de surface. Un exemple en est l'utilisation de l'anticorps recombinant « Anti-SARS-CoV-2 Spike Glycoprotein S1 » (CR3022), développé à l'échelle commerciale initialement pour des tests ex vivo tels que le dosage immuno-enzymatique et maintenant considéré comme un agent thérapeutique possible aux fins du diagnostic et du traitement de la COVID-19. Son marquage réussi à l'iode 131 pour des études d'agglutination et un test de validation font que son application est proposée pour une version thérapeutique radiomarquée du CR3022.

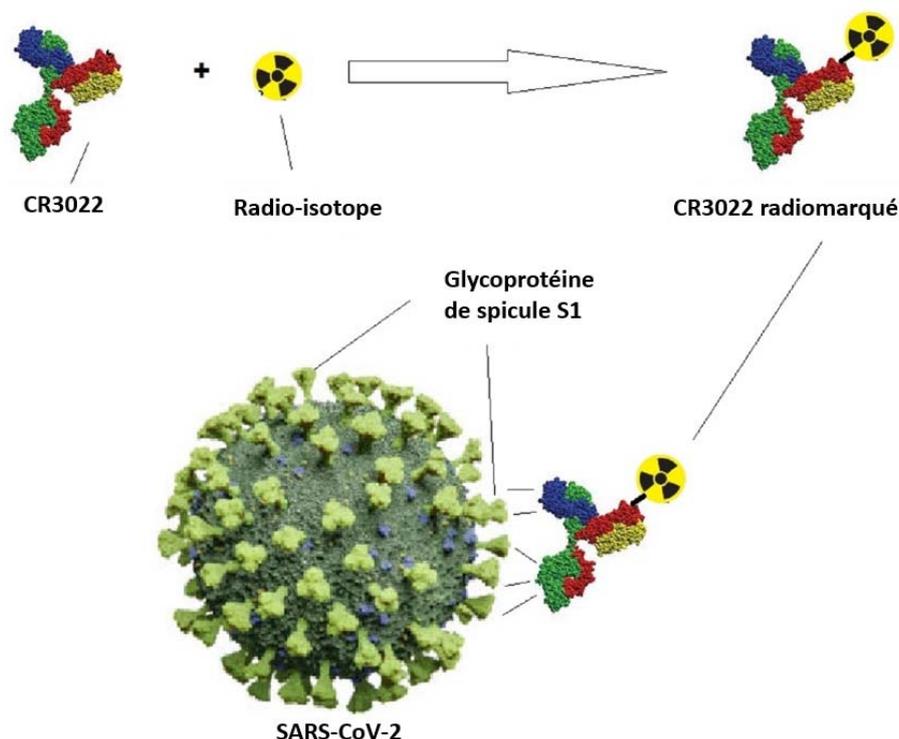


FIG. G-1. Schéma de l'évolution potentielle de l'anticorps monoclonal théranostique radiomarqué CR3022 pour le diagnostic du syndrome respiratoire aigu sévère à coronavirus 2 (SARS-COV-2).
(Source : AIEA)

171. Cependant, de nombreuses questions restent sans réponse. On ignore encore, par exemple, l'effet que les mutations du génome du virus auraient sur l'efficacité de la méthode.

172. Selon une étude, le radiopharmaceutique à visée thérapeutique Bi-213 anti-HIV-1 gp41 a réussi à éliminer les cellules mononucléées du sang périphérique et les monocytes infectés au VIH sans endommager la barrière hémato-encéphalique chez l'homme, ce qui pose les fondements d'un éventuel traitement des infections au VIH.

173. Les progrès encourageants accomplis récemment montrent que les nouveaux radiopharmaceutiques mis au point grâce à des AcM spécifiques à un micro-organisme offrent la possibilité de diagnostiquer et de traiter les maladies infectieuses et il est à la fois utile et opportun que tous les États Membres s'intéressent à leur utilisation.

H. Environnement

H.1. Techniques nucléaires et dérivées au service d'une meilleure connaissance du carbone bleu dans le monde et de la lutte contre les effets du changement climatique

Situation

174. L'augmentation spectaculaire des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), depuis la fin du XIX^e siècle a accéléré le réchauffement climatique, les principaux responsables en étant les émissions de CO₂ dues à la combustion de combustibles fossiles, à la production de ciment et aux bouleversements apportés par l'activité humaine ou l'exploitation des sols. L'océan joue un rôle majeur dans la régulation du système climatique mondial en capturant et en stockant le CO₂ à l'écart de l'atmosphère, c'est-à-dire en agissant comme un puits d'absorption nette du CO₂ d'origine anthropique et en réduisant très sensiblement le rythme du réchauffement climatique.

175. Deux des principaux mécanismes par lesquels l'océan capture le CO₂ de l'atmosphère sont la pompe de solubilité (absorption du CO₂ par échange gazeux et transfert de l'eau de surface enrichie en CO₂ vers les profondeurs de l'océan) et la pompe biologique (exportation verticale du carbone organique sous forme de particules produit par photosynthèse des eaux de surface vers les profondeurs de l'océan).

Tendances

176. Le carbone organique capturé et stocké par les océans est connu sous le nom de carbone bleu. Les écosystèmes côtiers végétalisés, tels que les prairies sous-marines, les marais littoraux et les forêts de mangroves, en accumulent et en emprisonnent de larges quantités dans leurs sédiments. Bien que ces écosystèmes occupent dans le monde une superficie totale bien inférieure à celle des écosystèmes forestiers terrestres, leur potentiel de piégeage du carbone organique à l'échelle mondiale est non négligeable ; dès lors, ils devraient être largement pris en considération dans les stratégies mondiales d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature (figure H-1). Ces mêmes relevés de sédiments dont l'âge a été déterminé à l'aide de radio-isotopes à courte période peuvent aussi être extraits pour déterminer la pollution due au plastique (figure H-2). Les Laboratoires de l'environnement de l'AIEA élaborent des modèles géochronologiques à partir des carottes sédimentaires prélevées dans les mangroves côtières en utilisant par exemple le ²¹⁰Pb, le ⁷Be, le ²³⁴Th et le ¹³⁷Cs excédentaires comme radiotraceurs à courte période.

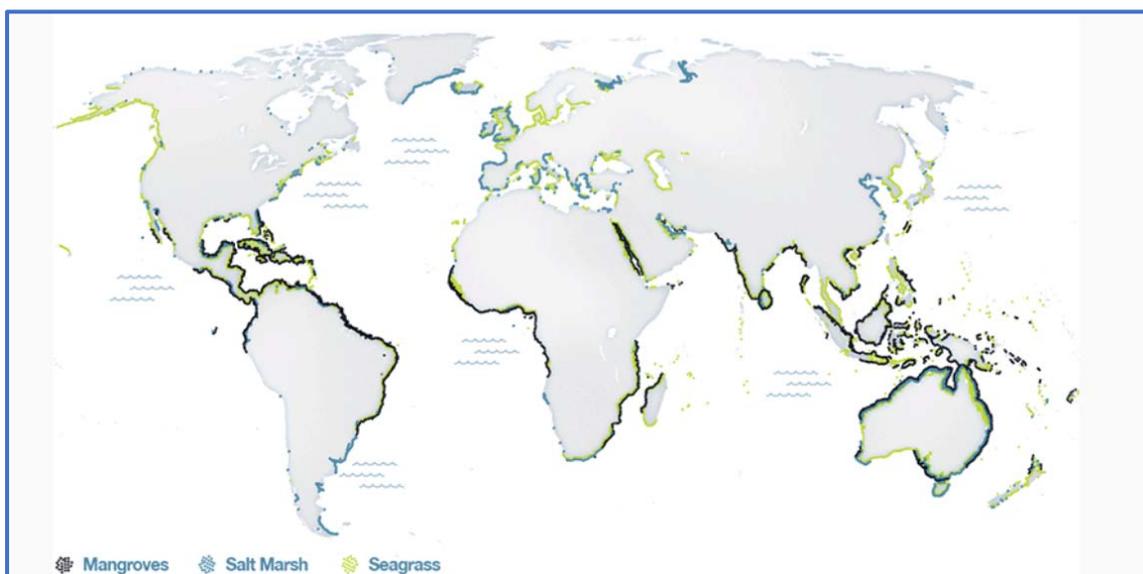


FIG. H-1. Répartition mondiale des écosystèmes côtiers de carbone bleu
(Adapté de <https://thebluecarboninitiative.org>)

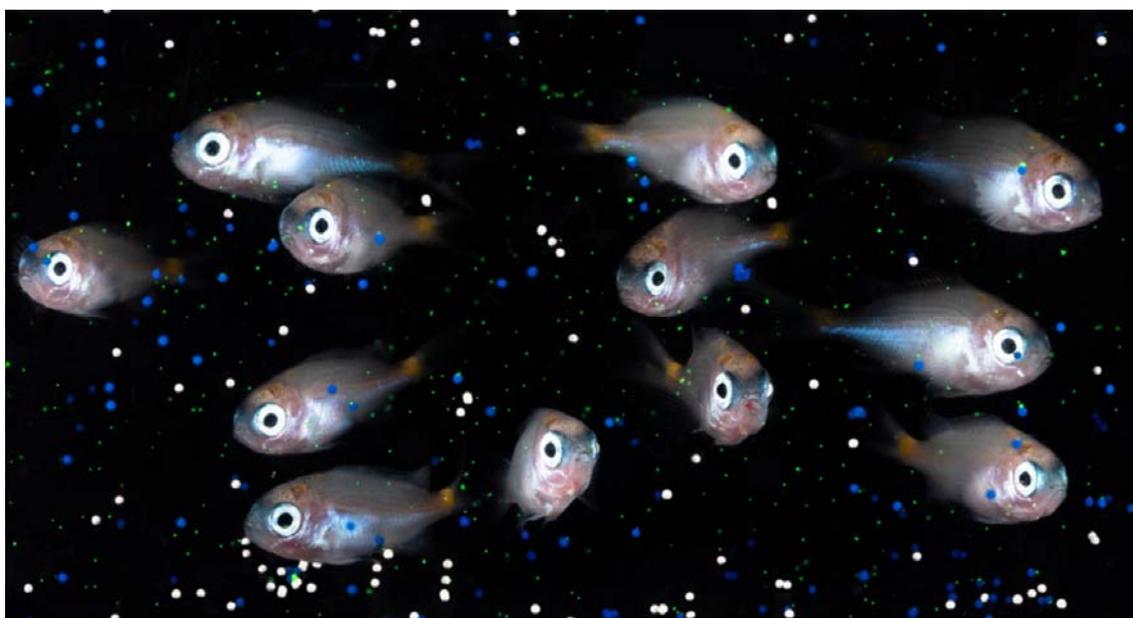


FIG. H-2. Poissons exposés à des microplastiques dans le cadre d'une recherche-développement
aux Laboratoires de l'environnement de l'AIEA à Monaco. (Photo : AIEA)

177. Par ailleurs, l'ampleur actuelle des pertes de carbone sédimentaire résultant de la dégradation généralisée des habitats impose de mener des actions coordonnées visant à les remettre en état et à en créer de nouveaux, et de mettre en œuvre des solutions créatives d'éco-ingénierie.

178. L'incorporation des écosystèmes côtiers de carbone bleu dans les stratégies d'atténuation en cours grâce au piégeage du carbone et à aux compensations des gaz à effet de serre requiert de procéder à la quantification des taux exacts d'accumulation du carbone organique piégé, actuellement limitée et largement incertaine. S'il est possible de déterminer le piégeage du carbone organique à l'échelle du millénaire au moyen du carbone 14, les estimations à l'échelle de la décennie/du centenaire peuvent être réalisées à l'aide des radionucléides présents dans l'environnement, comme les isotopes du plomb 210, du césium 137 et du plutonium. On obtient ainsi un cadre temporel compatible avec les mesures de gestion prises dans le cadre des objectifs de développement durable des Nations Unies et de la Décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable, ce qui permet de déterminer le piégeage du carbone organique et ses fluctuations dans le temps sous l'effet des dégradations d'origine naturelle et humaine.

179. Grâce aux radionucléides, il est également possible de déterminer univoquement si des perturbations naturelles ou anthropiques peuvent avoir occasionné des pertes de carbone, par exemple via des processus de remise en suspension des sédiments et d'érosion. L'utilisation de radionucléides à période relativement courte, tels que le thorium 228, le thorium 234 et le béryllium 7, pour retracer la dynamique de sédimentation à des échelles de temps de quelques semaines, quelques mois voire quelques années, serait compatible avec l'établissement de cadres d'action en faveur du carbone bleu qui faciliteraient la quantification et le financement des réductions des émissions de carbone.

180. Si un certain nombre d'études ont été menées sur le carbone bleu dans les zones côtières végétalisées au cours des dix dernières années (figure H-3), de nombreuses questions restent sans réponse. Elles portent sur des points comme l'évaluation des points chauds dans le monde qui sont largement sous-étudiés (par exemple, les herbes marines et les mangroves au Brésil et en Asie) ; la manière dont le changement climatique et d'autres perturbations auront des effets sur le carbone bleu des systèmes de végétation côtiers ; le rôle des macroalgues ; et les meilleures mesures de gestion à appliquer pour préserver et améliorer le piégeage du carbone dans les habitats de carbone bleu. Les techniques nucléaires et dérivées jouent un rôle déterminant pour l'évaluation des carbonates et des macroalgues dans le cycle du carbone bleu, la détermination de la provenance du carbone, la compréhension des facteurs qui ont des incidences sur le piégeage dans les habitats de carbone bleu et les budgets correspondants à prévoir, ainsi que dans les mesures de gestion qui favorisent les stratégies concernant le carbone bleu.



*FIG. H-3. Prélèvement de carottes sédimentaires au large de Zanzibar (République-Unie de Tanzanie) aux fins de l'évaluation des stocks et des taux d'enfouissement de carbone organique qui permet de mesurer le potentiel de piégeage du carbone.
(Photo : Gloria Salgado, Université Edith Cowan, Perth, Australie)*

181. L'Agence se propose d'étudier plusieurs aspects de la science du carbone bleu et de transférer les technologies nucléaires appropriées au cours des dix prochaines années. Par l'intermédiaire de ses Laboratoires de l'environnement, elle participe actuellement à des projets sur le carbone bleu en Australie, au Brésil, au Danemark, aux États-Unis d'Amérique, en France, en Inde, au Myanmar, en Nouvelle-Zélande et en République-Unie de Tanzanie. Elle est également engagée dans un projet innovant coordonné par Océans 2050 qui vise à évaluer la capacité de piégeage du carbone des cultures d'algues marines dans le monde. Elle met au point des projets de coopération technique nationaux et régionaux qui permettront d'évaluer l'importance du piégeage du carbone dans les systèmes aquatiques aux fins de la définition de stratégies d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature, de la préservation de l'environnement et de la prospérité socio-économique.

Annexe

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2020)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2020		Expérience d'exploitation totale en 2020	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			11,6	5,9	72	3
ALLEMAGNE	6	8 113			60,9	11,3	852	7
ARGENTINE	3	1 641	1	25	10,0	7,5	91	2
ARMÉNIE	1	415			2,6	34,5	46	8
BANGLADESH			2	2 160				
BÉLARUS	1	1 110	1	1 110	0,3	1,0	0	2
BELGIQUE	7	5 942			32,8	39,1	310	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 340	13,2	2,1	59	3
BULGARIE	2	2 006			15,9	40,8	169	3
CANADA	19	13 624			92,2	14,6	788	6
CHINE	50	47 528	13	12 565	344,7	4,9	418	8
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	24	23 150	4	5 360	152,6	29,6	596	2
ÉMIRATS ARABES UNIS	1	1 345	3	4 035	1,6	1,1	0	5
ESPAGNE	7	7 121			55,8	22,2	350	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	94	96 553	2	2 234	789,9	19,7	4 600	10
FÉDÉRATION DE RUSSIE	38	28 578	3	3 459	201,8	20,6	1 372	5
FINLANDE	4	2 794	1	1 600	22,4	33,9	167	4
FRANCE	56	61 370	1	1 630	338,7	70,6	2 337	0
HONGRIE	4	1 902			15,2	48,0	142	2
INDE	22	6 255	7	4 824	40,4	3,3	548	11
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915	1	974	5,8	1,7	9	4
JAPON	33	31 679	2	2 653	43,1	5,1	1 932	6
KAZAKHSTAN							25	10
MEXIQUE	2	1 552			10,9	4,9	57	11
PAKISTAN	5	1 318	2	2 028	9,6	7,1	87	5
PAYS-BAS	1	482			3,9	3,3	76	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 934			28,4	37,3	176	10
ROUMANIE	2	1 300			10,6	19,9	37	11
ROYAUME-UNI	15	8 923	2	3 260	45,7	14,5	1 634	7
SLOVAQUIE	4	1 837	2	880	14,4	53,1	176	7
SLOVÉNIE	1	688			6,0	37,8	39	3
SUÈDE	6	6 882			47,4	29,8	474	0
SUISSE	4	2 960			23,0	32,9	228	11
TURQUIE			2	2 228	S/O	S/O		
UKRAINE	15	13 107	2	2 070	71,5	51,2	533	6
Total^{b,c}	442	392 612	52	54 435	2 553,2		18 772	10

a. Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'Agence (www.iaea.org/pris) au 1^{er} juin 2021.

b. Le total inclut les chiffres suivants pour Taïwan (Chine) : 4 tranches (3 844 MWe) en service.

c. L'expérience d'exploitation totale tient compte de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) ainsi que de centrales en service et à l'arrêt à Taïwan (Chine) (232 ans et 8 mois).

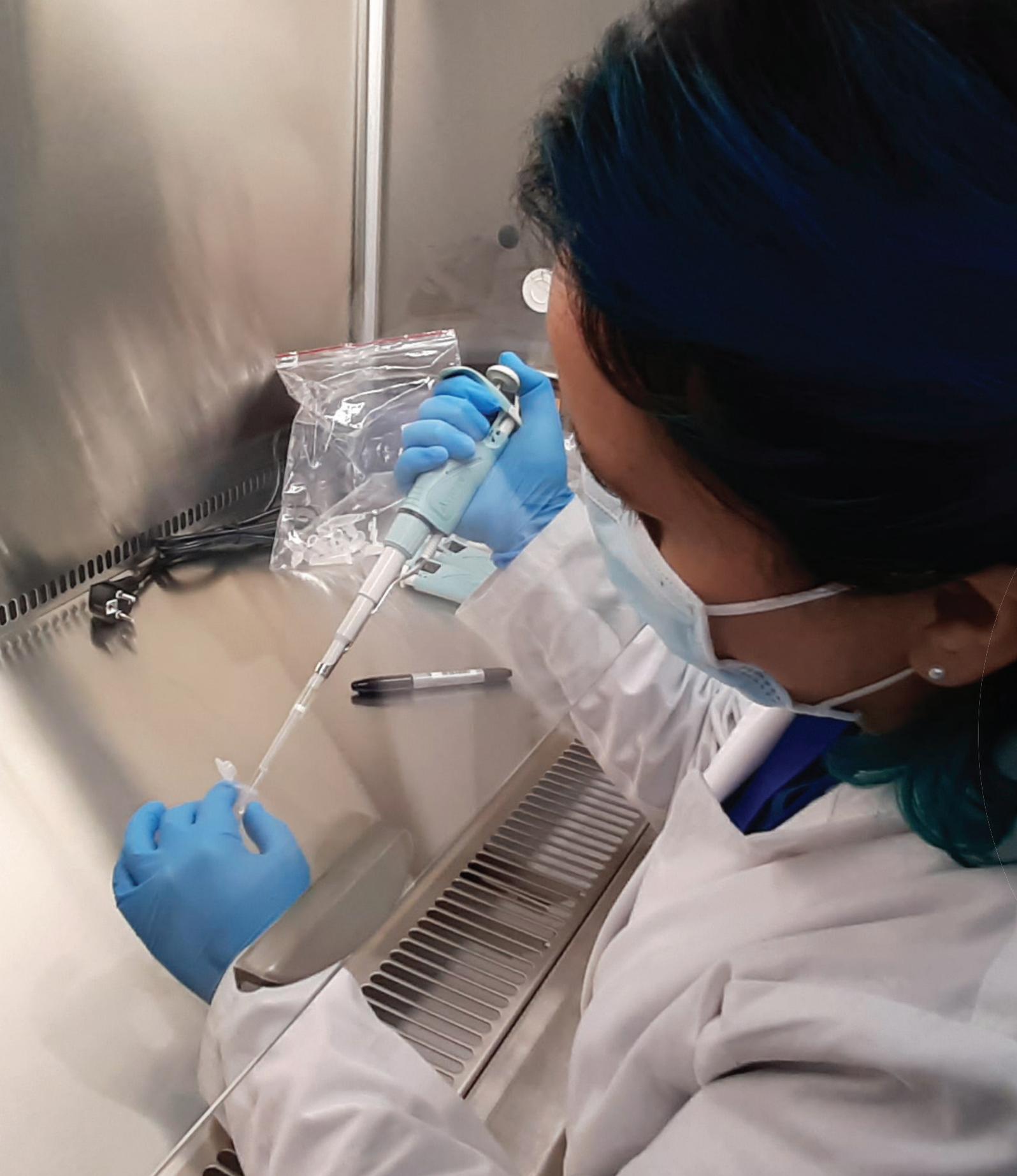
Tableau D-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde

Type d'application ^a	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Formation théorique/pratique	161	50
Analyse par activation neutronique	116	49
Production de radio-isotopes	82	41
Neutronographie	70	37
Irradiation de matériaux/du combustible	67	26
Diffusion neutronique	44	28
Géochronologie	23	20
Transmutation (dopage de silicium)	22	15
Transmutation (gemmes)	19	12
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	15	12
Mesure de données nucléaires	14	7
Autres ^c	117	34

^a La publication de l'Agence intitulée *Applications of Research Reactors* (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, Vienna, 2014) décrit ces applications de manière plus détaillée.

^b Sur les 236 réacteurs de recherche considérés (221 en service, 15 en arrêt provisoire, en novembre 2020).

^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.



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