

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire ■ 2025



Rapport du Directeur général



GC(69)/INF/9



# Conférence générale

**GC(69)/INF/9**  
29 août 2025

**Distribution générale**  
Français  
Original : anglais

## Soixante-neuvième session ordinaire

Point 16 de l'ordre du jour provisoire  
(GC(69)/1 et Add.1)

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025

*Rapport du Directeur général*

## Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus en 2024.
- Le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025 traite des domaines suivants : électronucléaire, cycle du combustible nucléaire, déclassé, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs, recherche sur la fusion et développement de technologies pour la production d'énergie future, réacteurs de recherche, accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire, données atomiques et nucléaires, application de l'intelligence artificielle au service de l'électronucléaire et du cycle du combustible nucléaire, santé humaine, alimentation et agriculture, radio-isotopes et technologies des rayonnements, hydrologie isotopique et environnement marin.
- Le projet de rapport a été soumis à la réunion du Conseil des gouverneurs de mars 2025 (document GOV/2025/4). Cette version définitive a été établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.



## Table des matières

Avant-propos du Directeur général .....	3
Résumé .....	6
Rapport principal .....	11
A. Électronucléaire .....	11
A.1. Projections relatives à l'électronucléaire .....	11
A.2. Centrales nucléaires en exploitation .....	13
A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion .....	16
A.4. Développement de la technologie électronucléaire .....	21
A.4.1. Réacteurs avancés refroidis à l'eau .....	23
A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires et microréacteurs .....	24
A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides .....	27
A.4.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire .....	29
B. Cycle du combustible nucléaire .....	30
B.1. Amont .....	30
B.2. Aval .....	34
C. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs.....	37
C.1. Déclassement .....	37
C.2. Remédiation environnementale et gestion des matières radioactives naturelles (NORM).....	38
C.3. Gestion des déchets radioactifs.....	40
D. Recherche et développement de la technologie de la fusion pour la future production d'énergie.....	44
E. Réacteurs de recherche .....	49
F. Accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire .....	53
F.1. Accélérateurs de particules .....	53
F.2. Instrumentation nucléaire.....	55
G. Données atomiques et nucléaires .....	57
H. L'intelligence artificielle au service de l'électronucléaire et du cycle du combustible nucléaire .....	59
I. Santé humaine .....	60
I.1. Des méthodes novatrices pour une radiothérapie plus efficace .....	61
J. Alimentation et agriculture.....	64
J.1. Améliorer l'élaboration des normes de sécurité sanitaire des aliments grâce au radiomarquage innovant de médicaments vétérinaires .....	64
J.2. Détection efficace de la fraude alimentaire .....	65

J.3. Détection rapide des maladies et méthodes de diagnostic dans le cadre de la lutte contre la fusariose du bananier TR4.....	67
K. Radioisotopes et technologie des rayonnements .....	70
K.1. Exploiter le potentiel des systèmes de faisceaux d'électrons pour des applications mondiales	70
K.2. Le contrôle non destructif en fabrication additive (impression tridimensionnelle).....	72
K.3. Les émetteurs d'électrons Auger, une perspective d'avenir pour la thérapie par radioligands .	74
K.4. Polymères biosourcés pour lutter contre la pollution par le plastique.....	77
L. Hydrologie isotopique .....	80
L.1. Suivi des évolutions rapides des eaux souterraines.....	80
M. Environnement marin.....	84
M.1. Évaluation de l'impact de l'acidification des océans sur les produits de la mer - une approche de portée mondiale.....	84
M.2. Amélioration des connaissances sur la pollution marine grâce à des systèmes isotopiques non traditionnels.....	88
Annexes.....	93
Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde <sup>a</sup> .....	93
Tableau E-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde.....	95
Abréviations et sigles .....	96

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025

*Rapport du Directeur général*

## **Avant-propos du Directeur général**

De par sa mission statutaire, l'Agence « s'efforce de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier », et cet objectif est plus important que jamais. En effet, l'électronucléaire et les techniques nucléaires contribuent de manière importante à traiter des problèmes comme l'éclairage et le chauffage des habitations, l'accès au dépistage du cancer et à un traitement rapide, l'existence de cultures capables de faire face à l'évolution des conditions climatiques ou l'accès à une eau propre.

L'élan politique en faveur de l'énergie nucléaire qui a été observé à la 28<sup>e</sup> session de la Conférence des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28) en 2023 s'est traduit par l'appel à accélérer l'utilisation de l'électronucléaire qui figure dans le premier bilan mondial et par l'appel de 22 (puis 25) pays à tripler les capacités de production d'énergie nucléaire d'ici à 2050, et s'est poursuivi tout au long de l'année. En mars 2024, le tout premier Sommet sur l'énergie nucléaire, organisé conjointement par le Gouvernement belge et l'AIEA à Bruxelles, a rassemblé des chefs d'État et des ministres d'une trentaine de pays, ainsi que des dirigeants du secteur et d'autres parties prenantes. En septembre, l'Agence a publié ses projections actualisées concernant la capacité nucléaire installée en 2050, la projection haute étant de 950 gigawatts (GW), soit 2,5 fois la capacité actuelle. Cet objectif est ambitieux, mais il pourrait être atteint à l'aide de cadres d'action favorables, d'un meilleur accès au financement et de la mise sur le marché de petits réacteurs modulaires (SMR), qui pourraient représenter près d'un quart des nouveaux projets de construction nécessaires pour faire de la projection haute une réalité. En outre, l'Agence a systématiquement soutenu le projet de la présidence brésilienne du G20 qui consiste à traiter la question de l'énergie nucléaire dans le cadre des discussions sur la transition énergétique et qui figure dans la Déclaration ministérielle du G20. À la 15<sup>e</sup> réunion du Groupe ministériel sur l'énergie propre, qui s'est tenue au Brésil, l'Agence a dévoilé sa publication phare, intitulée *Climate Change and Nuclear Power 2024: Financing Nuclear Energy in Low Carbon Transitions*. Enfin, à la COP29, l'Agence, ses partenaires et plusieurs États Membres ont souligné l'importance d'accélérer l'implantation de centrales nucléaires, y compris de SMR, qui constitue l'une des principales mesures d'atténuation pour que l'objectif de limitation du réchauffement climatique à 1,5 degré Celsius reste atteignable. Six autres États Membres se sont joints à l'appel visant à tripler les capacités de production d'énergie nucléaire d'ici à 2050.

Le financement de la mise en œuvre de la technologie nucléaire sera essentiel pour permettre à l'électronucléaire de contribuer pleinement à la décarbonation de nos systèmes énergétiques. Or, l'analyse effectuée par l'Agence montre incontestablement que, si les gouvernements doivent continuer à jouer un rôle important, le secteur privé et les banques multilatérales de développement seront également des acteurs indispensables sur cette question. Au mois de septembre, en marge de la Semaine du climat à New York, 14 grandes banques commerciales et institutions financières se sont engagées à contribuer au financement du triplement des capacités de production d'énergie nucléaire d'ici à 2050, confirmant ainsi que l'électronucléaire peut aujourd'hui faire l'objet d'investissements financiers. Enfin, l'Agence a engagé des discussions de haut niveau sur le financement des activités nucléaires avec des banques multilatérales de développement, notamment avec la Banque mondiale et la Banque européenne pour la reconstruction et le développement.

Les technologies nucléaires apportent des solutions aux grands défis mondiaux. En cancérothérapie, l'Agence pilote des initiatives comme la commission du Lancet Oncology sur la radiothérapie et la théranostique, afin d'évaluer les besoins et d'informer les décideurs.

Dans le domaine de la sécurité alimentaire, nous proposons des techniques faciles à mettre en œuvre, qui permettent de détecter et de tracer les contaminants dans la filière agroalimentaire, de vérifier l'authenticité des aliments et de diagnostiquer les maladies des cultures ou du bétail, ce qui permet aux États Membres de préserver durablement leurs moyens de subsistance. Les travaux de l'Agence contribuent à trouver des solutions respectueuses de l'environnement à l'aide des rayonnements ionisants pour produire des bioplastiques et des matériaux écologiques ou effectuer des contrôles non destructifs, lesquels sont aussi de plus en plus utiles en fabrication additive. Nous soutenons les actions destinées à surveiller les eaux souterraines et à prévenir la pollution, ce qui est essentiel lorsque des populations sont déplacées.

La protection du milieu marin est également un thème prioritaire, nos laboratoires de Monaco permettant aux États Membres de préserver les écosystèmes marins. De même, les laboratoires de Seibersdorf et de Vienne favorisent les transferts de connaissances entre différents secteurs.

Nos initiatives phares, à savoir Atoms4Food, Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique (NUTEC Plastics), Rayons d'espoir et Action intégrée contre les zoonoses (ZODIAC), montrent comment la science et la technologie nucléaires améliorent l'état de santé des personnes et de la planète.

La science, la technologie et les applications nucléaires sont depuis des dizaines d'années des outils importants qui contribuent à répondre aux besoins de développement des pays. Il est clair que leur potentiel n'a pas encore été pleinement exploité, et elles peuvent être mises à contribution dans d'autres domaines. En mettant en avant certains des principaux faits nouveaux relatifs à la technologie nucléaire survenus en 2024, le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025* permettra aux États Membres de prendre des décisions éclairées pour relever les défis présents et à venir.



*FIG. FW.1. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, prenant la parole à la COP29 à Bakou (Azerbaïdjan). (Photo : AIEA)*

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025

*Rapport du Directeur général*

## Résumé

1. Pour la quatrième année consécutive, l'Agence a revu à la hausse ses projections annuelles sur la capacité électronucléaire installée pour les décennies à venir, constatant que cette technologie gagnait en popularité – comme en témoignent son inclusion dans le bilan mondial de la COP28, la déclaration de 31 pays en faveur d'un triplement de la capacité nucléaire mondiale d'ici 2050 et l'organisation du tout premier Sommet sur l'énergie nucléaire à Bruxelles, en mars 2024. Dans ses nouvelles prévisions sur la capacité nucléaire mondiale servant à la production d'électricité, l'Agence a rehaussé sa projection haute pour 2050, la portant à 950 gigawatts électriques (GWe), soit 2,5 fois la capacité installée actuelle, les SMR assurant environ un quart de cette production. Dans la projection basse, la capacité nucléaire installée passerait à 514 GWe en 2050, ce qui représente tout de même une augmentation de 40 % par rapport à la capacité installée actuelle.

2. Fin décembre 2024, la capacité électronucléaire mondiale des 417 réacteurs en exploitation dans 31 États Membres s'établissait à 377 GWe. S'y ajoutaient 19,7 GWe provenant de 23 réacteurs autorisés à être exploités qui sont restés à l'arrêt pendant l'année. Cinq réacteurs à eau pressurisée (REP) et un réacteur à eau lourde pressurisée (RELPE), d'une capacité totale de 6,8 GWe, ont été raccordés au réseau dans cinq États Membres. Fin décembre 2024, 62 réacteurs d'une capacité totale de 64,5 GWe étaient en construction dans 15 pays. Environ 66 % de la capacité totale installée provient de réacteurs qui sont en exploitation depuis plus de 30 ans (296 réacteurs produisant 263,3 GWe), et 166 de ces réacteurs sont même en exploitation depuis plus de 40 ans – ces derniers représentant environ 34 % de la capacité totale installée, soit 135,5 GWe. Le vieillissement du parc rend d'autant plus nécessaire la construction de nouveaux réacteurs ou l'augmentation de la capacité des réacteurs existants pour compenser les mises hors service prévues et continuer de contribuer aux objectifs de durabilité, de sécurité énergétique mondiale et de lutte contre les changements climatiques.

3. À l'heure actuelle, 37 pays sont à différents stades du lancement ou de la mise en œuvre de leur programme électronucléaire. Ils procèdent à des études de préfaisabilité, mettent au point l'infrastructure ou construisent déjà leur première centrale nucléaire. Parmi eux, 23 pays en sont à la phase décisionnelle et 14 pays en phase postdécisionnelle. En outre, une vingtaine de pays s'intéressent à l'électronucléaire et envisagent de l'inclure dans leur futur bouquet énergétique.

4. Les réacteurs refroidis à l'eau restent la technologie nucléaire la plus courante à l'échelle mondiale. Les tendances actuelles consistent à améliorer les caractéristiques de sûreté de ces réacteurs, notamment grâce à des systèmes de refroidissement plus passifs et à une optimisation des combustibles. La construction de SMR continue d'être envisagée pour toute une gamme d'applications dans le monde

entier. Actuellement, l'objectif est surtout d'améliorer leur rentabilité, leurs caractéristiques de sûreté et leur adaptabilité. Les SMR suscitent également un intérêt croissant pour les applications maritimes, notamment pour les unités flottantes transportables de production d'électricité et pour les réacteurs exploités à des fins de propulsion nucléaire navale civile.

5. L'énergie nucléaire est utilisée depuis de nombreuses années pour des applications non électriques, et celles-ci continuent à évoluer. À l'heure actuelle, quelque 70 réacteurs sont utilisés pour des applications non électriques, telles que le chauffage industriel, le chauffage urbain et le dessalement. Plusieurs modèles de SMR (dont un déjà en service) peuvent être utilisés pour des applications non électriques.

6. En ce qui concerne le développement de la technologie des réacteurs à neutrons rapides, l'objectif actuel est d'améliorer les mesures de sûreté au moyen de systèmes passifs de mise à l'arrêt et d'étudier de nouveaux types de caloporteurs, surtout pour les modèles de réacteurs innovants. L'accent est également mis sur l'amélioration de leur rentabilité, notamment par la réduction des coûts de construction et une meilleure intégration des réacteurs à neutrons rapides dans le cycle fermé du combustible.

7. Les techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle (IA) sont de plus en plus utilisées dans l'industrie nucléaire pour améliorer la qualité et les performances. Ces applications sont susceptibles d'améliorer la sûreté, ainsi que l'efficacité et la rentabilité des opérations tout en facilitant la mise au point de technologies nucléaires avancées. L'introduction de systèmes fondés sur l'IA survient dans le contexte d'autres tendances, comme le recours accru à la numérisation et l'adoption de systèmes robotisés et de drones dans les centrales nucléaires. Toutefois, une méthode appropriée est nécessaire pour démontrer que le recours à l'IA ne compromet pas la sûreté globale de la centrale nucléaire. L'IA est également mise à contribution pour optimiser des modèles de cœurs de réacteurs et perfectionner les méthodes de chargement en combustible. Il convient également de noter que l'énergie nucléaire est de plus en plus utilisée pour alimenter les centres de données dont l'IA a besoin pour ses calculs, en raison de l'explosion de la demande énergétique dans ces secteurs.

8. Aux quatre coins de la planète, les pouvoirs publics reconnaissent de plus en plus le potentiel de l'énergie de fusion et augmentent leurs investissements dans la recherche-développement (R-D) pour stimuler le progrès scientifique et technique. Les pays sont en train de se doter de stratégies nationales, assorties de financements substantiels, pour soutenir les initiatives tant publiques que privées, l'élaboration des premiers cadres réglementaires et la mobilisation accrue des chaînes d'approvisionnement. Le secteur de l'énergie de fusion attire désormais plus de 8 milliards de dollars des États-Unis d'investissements (contre 6,21 milliards en 2023). Les organismes de réglementation et les législateurs se penchent de plus en plus sur les difficultés et les perspectives intrinsèques à l'énergie de fusion.

9. Selon la publication intitulée *Uranium 2024: Resources, Production and Demand* (Livre rouge 2024), publiée conjointement par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN) et l'AIEA, la production des mines d'uranium dans le monde a atteint 54 345 tonnes d'uranium (tU) en 2023 (soit 9 % de plus que l'année précédente). D'après les prévisions, la demande mondiale d'uranium pourrait être comprise entre 99 485 tU (hypothèse basse) et 142 695 tU (hypothèse haute) par an en 2050. Les sites d'extraction prévus ou potentiels de 19 pays pourraient contribuer à obtenir une capacité nominale de production mondiale de 80 494 tU par an au total. Pour garantir l'approvisionnement en uranium, il faudra donc probablement remettre en service les mines inactives et mettre en service les sites d'extraction prévus ou potentiels, car les conditions de marché devront rester durablement favorables pour que de nouveaux gisements soient mis au jour. De fait, en janvier 2024, le prix au comptant de l'uranium a atteint son plus haut niveau en 17 ans, soit 106 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (275 \$ É.-U./kg d'uranium), et, depuis la mi-2024, il oscille entre 80 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (208 \$ É.-U./kg d'uranium) et 85 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (221 \$ É.-U./kg

d'uranium). Cette hausse très importante par rapport aux prix du marché relativement stables enregistrés sur la période 2016-2021, qui se situaient approximativement entre 20 et 30 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (soit 52 à 78 \$ É.-U./kg d'uranium), pourrait stimuler les investissements dans l'exploration.

10. Au cours des dix prochaines années, le secteur de la production de combustible nucléaire devra répondre à une demande croissante en raison de la hausse sensible du nombre de programmes de construction prévus, aussi bien dans les pays déjà dotés de réacteurs que dans les pays primo-accédants. La mise au point de nouveaux types de combustibles, notamment pour les SMR et d'autres réacteurs avancés, stimulera les investissements dans le secteur. De nombreuses solutions actuellement à l'étude pour les combustibles de technologie avancée/combustibles résistants aux accidents et les combustibles innovants nécessiteront de l'uranium enrichi à plus de 5 %, ce qui signifie qu'il faudra utiliser de l'UFE+ et de l'HALEU.

11. Les stocks de combustible nucléaire usé s'accumulent dans le monde au rythme d'environ 7 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, leur volume total dépassant les 300 000 t ML. Pour les pays qui sont dotés de programmes nucléaires depuis longtemps et qui suivent des stratégies de cycle ouvert, les principales difficultés à surmonter restent la nécessité d'augmenter les capacités d'entreposage du combustible usé et l'allongement de la durée d'entreposage avant stockage définitif. Pour les pays qui suivent des stratégies de cycle fermé, les principales difficultés à surmonter sont les capacités de retraitement restreintes et la mise en œuvre du recyclage multiple à l'échelle industrielle dans les réacteurs à eau ordinaire (REO).

12. Le nombre de centrales nucléaires et de réacteurs de recherche en cours de démantèlement continue d'augmenter, la tendance étant au démantèlement rapide peu après la mise à l'arrêt définitive. En novembre 2024, 211 réacteurs de puissance répartis dans 21 États Membres avaient été mis à l'arrêt définitif à des fins de déclassement, 23 tranches étant entièrement déclassées. En matière de déclassement des centrales nucléaires, on observe depuis peu une montée en puissance de consortiums spécialisés qui mettent en commun les compétences de plusieurs entreprises pour mettre en œuvre des projets de déclassement complet.

13. Parmi les nouvelles tendances en matière de remédiation environnementale des sites radiocontaminés, on peut citer la priorité accordée aux pratiques durables, telles que l'application des principes de l'économie circulaire pour réduire le volume de déchets générés par la remédiation et utiliser au mieux les ressources. Des outils comme la télédétection, l'apprentissage automatique ou la robotique jouent un rôle important, car ils permettent une caractérisation des sites et des déchets plus précise, une meilleure surveillance et une gestion plus sûre des déchets.

14. La gestion des déchets radioactifs a sensiblement progressé tout au long de l'année 2024 dans le monde entier, des avancées notables ayant été enregistrées en ce qui concerne les programmes de stockage définitif et l'application des techniques de gestion des déchets avant stockage définitif. Ces activités témoignent d'un engagement en faveur de solutions de gestion à long terme des déchets qui donnent la priorité à la sûreté et à la protection de l'environnement.

15. À la fin de 2024, 234 réacteurs de recherche, si l'on y inclut ceux mis temporairement à l'arrêt, étaient en service dans 54 pays. On comptait également 11 nouveaux réacteurs de recherche en construction dans 10 pays, et 13 États Membres avaient arrêté des plans de construction. L'intérêt croissant que suscite le nucléaire au niveau mondial a entraîné une augmentation de la demande d'accès aux réacteurs de recherche à des fins d'essais de matériaux et de composants, de recherche-développement et de formation théorique et pratique dans le domaine nucléaire. La demande relative aux applications des réacteurs de recherche a également augmenté dans le monde entier. Les accélérateurs de faisceaux d'ions continuent à jouer un rôle essentiel dans la recherche-développement consacrée au traitement du cancer, au durcissement des appareils électroniques, à la dosimétrie dans des champs de rayonnement mixtes, à la protection destinée à atténuer la radioexposition, à l'amélioration

des connaissances des effets biologiques du rayonnement cosmique et à l'exploration spatiale. En outre, les progrès récents de la technologie des détecteurs de neutrons et de rayons gamma ont permis de mettre au point des systèmes compacts, écoénergétiques et à double fonction, qui aident à dresser une carte de l'hydrogène et à réaliser l'analyse des éléments de corps célestes, tels que la Lune et Mars.

16. Le cancer reste l'une des principales causes de mortalité dans le monde : en 2022, 9,74 millions de personnes en sont mortes et 19,98 millions de nouveaux cas ont été déclarés. Près de la moitié des patients qui en sont atteints ont besoin d'une radiothérapie à un moment ou à un autre, mais l'accès à ce traitement vital est limité. Pour remédier à cette situation, l'Agence a dirigé une commission du Lancet Oncology sur la radiothérapie et la théranostique afin d'examiner la disponibilité des services de radiothérapie.

17. L'Agence mène également des recherches sur la radiothérapie fractionnée dans l'espace, technique innovante qui consiste à traiter les tumeurs volumineuses et radiorésistantes en administrant des doses de rayonnement non uniformes dans les volumes tumoraux. Il est ainsi possible d'augmenter la dose en toute sûreté afin de mieux contrôler la tumeur et d'améliorer la qualité de vie des patients en soulageant la douleur.

18. Pour protéger les consommateurs des produits agrochimiques potentiellement dangereux, tels que les médicaments vétérinaires et les pesticides, et favoriser un commerce mondial équitable, la présence de normes harmonisées comme les limites maximales de résidus du Codex Alimentarius est indispensable. L'élaboration de telles normes repose sur des données concernant l'absorption, la répartition, la métabolisation et l'excrétion de ces substances chimiques chez les animaux destinés à l'alimentation. Ces informations permettent de déterminer le délai d'attente après lequel les produits alimentaires peuvent être consommés sans danger après la dernière administration des médicaments.

19. Les cyclotrons peuvent non seulement être utilisés pour produire des radio-isotopes à usage diagnostique et thérapeutique, mais aussi pour soutenir les recherches qui visent à améliorer les systèmes nationaux de sécurité sanitaire des aliments.

20. L'Agence a mis au point la première d'une série de méthodes innovantes, dans laquelle un analyseur élémentaire par spectrométrie de masse isotopique est utilisé. Cette méthode permet de vérifier plus rapidement et plus facilement l'authenticité des aliments, chose particulièrement importante pour les aliments identifiés selon leur origine géographique qui font souvent l'objet de contrefaçon alimentaire.

21. La détection précoce des agents pathogènes des plantes est essentielle pour freiner la propagation des maladies et réduire les dommages causés aux cultures. Une prévention et des contrôles efficaces passent forcément par des diagnostics précoces pour empêcher que les maladies se propagent encore davantage et en atténuer l'impact. L'Agence, par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, a expérimenté pour la première fois des tests de diagnostic avancés par clivage en trans d'un ADN rapporteur à l'aide d'une endonucléase Cas. Ces tests très sensibles conviennent aux méthodes de diagnostic délocalisées, favorisant une intervention rapide aux principaux points d'entrée tout en permettant une gestion durable et rentable. Cette technologie est rapide, fiable et économe en ressources : pas d'installation de laboratoire complexe, une préparation minimale des échantillons et une formation succincte des opérateurs.

22. Les rayonnements ionisants peuvent modifier les propriétés physiques, chimiques et biologiques des matériaux, ce qui en fait des outils essentiels dans les secteurs industriel et médical et dans les recherches scientifiques. Les installations d'irradiation des États Membres contribuent largement à soutenir des initiatives de l'Agence comme NUTEC Plastics ou Atoms4Food. L'Agence comble les lacunes dans les connaissances et la réglementation relatives à la technologie des faisceaux d'électrons

en menant une stratégie visant à permettre aux États Membres de se procurer des équipements rentables et accessibles.

23. Le contrôle non destructif (CND) est essentiel pour inspecter et évaluer des pièces obtenues par fabrication additive sans les endommager. Contrairement au contrôle destructif, qui exige de couper ou de casser les pièces pour en analyser les propriétés, les techniques de CND comme la tomographie à rayons X, la gamma tomographie, les essais aux ultrasons ou les méthodes au laser, permettent de détecter des défauts comme les vides, les fissures ou les manques de fusion.

24. La thérapie par radioligands est une méthode de traitement du cancer très efficace, surtout lorsque que le cancer est avancé ou métastatique et que les thérapies classiques sont moins efficaces. La collaboration actuelle entre les chercheurs spécialisés dans la production de radionucléides, la radiochimie, le radiomarquage et la mise au point de chélateurs, ainsi que l'évaluation préclinique et clinique, est déterminante pour la mise au point des radiopharmaceutiques cliniquement pertinents en radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger. L'Agence contribue de manière essentielle à faciliter ces démarches en offrant un cadre pour les réunions techniques et les projets de recherche coordonnée qui visent à faire advenir la prochaine génération de radiothérapies par radioligands.

25. Les matériaux issus de sources biologiques renouvelables, c'est-à-dire de la biomasse, éveillent un vif intérêt en raison des préoccupations croissantes que suscitent l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et l'impact des plastiques d'origine pétrolière sur l'environnement. Les consommateurs étant de plus en plus soucieux de l'environnement, la demande de produits durables augmente. L'utilisation des rayonnements ionisants pour fabriquer des bioplastiques se développe, le nombre des produits de grande valeur qui contiennent des matériaux biosourcés augmente et le renforcement des cadres réglementaires et des normes de sûreté prend une importance accrue.

26. Dans un contexte de pénurie d'eau et de pollution de systèmes à recharge rapide, une gestion efficace des eaux souterraines exige des approches novatrices pour pouvoir surveiller les transferts rapides entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. Les connaissances correspondantes sont indispensables pour pouvoir évaluer la sécurité des sources d'eau, surtout en situation d'urgence, par exemple pour des camps de réfugiés.

27. Les préoccupations que suscitent les effets de l'acidification des océans sur les produits de la mer qui ont une importance socio-économique ne cessent de croître partout dans le monde. En outre, la question de l'acidification des océans est devenue partie intégrante du Programme de développement durable à l'horizon 2030 de l'ONU. L'Agence s'emploie à mieux comprendre d'une part les processus environnementaux qui interviennent dans le milieu marin et, d'autre part, la pollution marine à l'aide d'isotopes non traditionnels (zinc, chrome, nickel et cuivre, par exemple). Ces isotopes sont aujourd'hui de plus en plus utilisés dans les activités de recherche marine, en particulier dans des domaines comme l'évaluation du risque, la surveillance de la pollution et l'identification des sources. Ils aident les scientifiques à mieux comprendre les flux des contaminants dans les écosystèmes.

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2025

## Rapport principal

### A. Électronucléaire

#### A.1. Projections relatives à l'électronucléaire

##### Situation

1. La 28<sup>e</sup> session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28), organisée à Dubaï (Émirats arabes unis) en 2023, avait été historique à bien des égards : les participants étaient convenus tous ensemble de sortir des combustibles fossiles, de tripler la capacité des énergies renouvelables et de doubler l'efficacité énergétique d'ici 2030, ainsi que d'accélérer le déploiement de toutes les autres technologies bas carbone – y compris l'électronucléaire, qui avait été cité explicitement dans le premier bilan mondial, alors qu'il n'avait encore jamais été mentionné dans un texte négocié de la COP. La 29<sup>e</sup> session (COP29), tenue à Bakou (Azerbaïdjan) en novembre 2024, a continué sur cette lancée. Le rôle indispensable de l'énergie nucléaire dans la lutte contre les changements climatiques et la transition vers une énergie propre y a été invariablement mis en avant, grâce au travail efficace que l'Agence a accompli avec la présidence de la COP29 et les partenaires internationaux. Ainsi, plus de 40 événements ont été organisés en lien avec le nucléaire sur de nombreux stands, dont celui de l'initiative Atoms4Climate, pour veiller à ce que l'électronucléaire et les technologies nucléaires restent au premier plan du dialogue mondial sur les transitions vers une énergie propre.



*FIG. A.1. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, à la COP29 à Bakou (Azerbaïdjan), le 12 novembre 2024. (Source : AIEA)*

2. Pour la quatrième année consécutive, l'Agence a revu à la hausse ses projections annuelles sur la capacité électronucléaire installée pour les décennies à venir, constatant que cette technologie gagnait en popularité – comme en témoignent son inclusion dans le bilan mondial de la COP28, la déclaration de 31 pays en faveur d'un triplement de la capacité nucléaire mondiale d'ici 2050 et l'organisation du tout premier Sommet sur l'énergie nucléaire à Bruxelles, en mars 2024. Dans ses nouvelles prévisions

sur la capacité nucléaire mondiale servant à la production d'électricité, l'Agence a rehaussé sa projection haute pour 2050, la portant à 950 gigawatts (GWe), soit 2,5 fois de plus que la capacité installée actuelle. Pour que cette projection se réalise, il faudrait exploiter à long terme une grande partie du parc existant et construire au cours des trente prochaines

## Projections de l'AIEA relatives à la capacité nucléaire mondiale servant à la production d'électricité :

**950 GWe** Projection haute

**514 GWe** Projection basse

années de nouveaux réacteurs capables d'offrir une capacité supplémentaire d'environ 640 GW – dont près d'un quart pourrait provenir des petits réacteurs modulaires (SMR). Pour ce faire, il faudra que l'industrie soit capable de respecter les délais de livraison et les budgets, qu'elle ait accès à des financements et que les politiques et mesures d'incitation lui assurent des conditions de concurrence équitables face à toutes les autres technologies bas carbone. En outre, la démonstration des SMR devra s'accélérer. Dans la projection basse, la capacité nucléaire installée passerait à 514 GW d'ici 2050 et les SMR représenteraient 6 % de l'ensemble de la capacité supplémentaire.



FIG. A.2. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, au Sommet sur l'énergie nucléaire : « Développer l'énergie de demain », Bruxelles, le 21 mars 2024. (Source : AIEA)

### Tendances

3. La demande d'énergie propre ne cesse d'augmenter, et ce notamment en raison de l'accélération du déploiement des applications de l'intelligence artificielle (IA), qui nécessitent des centres de données énergivores. Cette situation ne fait que renforcer l'intérêt considérable et croissant que suscitent déjà les technologies de réacteurs avancés et innovants, y compris les SMR, en tant que sources d'électricité propre et fiable. Les caractéristiques uniques des SMR font qu'ils peuvent non seulement être utilisés pour la cogénération et des applications industrielles, mais également pour remplacer des centrales à charbon de taille similaire ou encore dans le secteur des transports. Tous ces facteurs renforcent l'attrait des SMR, qui devraient produire jusqu'à 150 GW des 950 GW attendus des nouvelles constructions, selon la projection haute de l'AIEA.

4. Le secteur nucléaire aura, comme auparavant, à surmonter plusieurs obstacles, tels que l'accès à des financements, la réduction des coûts, le renforcement des capacités et l'amélioration de l'harmonisation et de la normalisation dans les domaines réglementaire et industriel, pour améliorer sa compétitivité et accélérer le déploiement de nouvelles capacités de production électronucléaire. C'est précisément pour aider les États Membres face à ces obstacles qu'a été créée l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI) en 2022. Conçue pour faciliter le déploiement à l'échelle mondiale de réacteurs avancés sûrs et sécurisés – en premier lieu des SMR – cette initiative a produit les résultats escomptés et entre maintenant dans sa deuxième phase, qui s'étendra de 2025 à 2026.

5. En parallèle, certains pays qui avaient décidé de sortir prématurément du nucléaire font machine arrière et optent à l'inverse pour une exploitation à long terme, parfois sous l'impulsion de certains grands acteurs industriels, comme les centres de données. L'année 2024 a également été marquée par les initiatives de redémarrage, aux États-Unis d'Amérique, du réacteur de la centrale de Palisades et du réacteur n° 1 de la centrale de Three Mile Island, qui avaient tous deux été fermés pour des raisons économiques.

## A.2. Centrales nucléaires en exploitation

### Situation

6. Fin décembre 2024, la capacité électronucléaire mondiale des 417 réacteurs en exploitation dans 31 États Membres s'établissait à 377 GWe. S'y ajoutaient 19,7 GWe provenant de 23 réacteurs autorisés à être exploités qui sont restés à l'arrêt pendant l'année, dont quatre réacteurs en Inde d'une capacité nette totale de 639 MWe et 19 réacteurs au Japon d'une capacité nette totale de 20 633 MWe.

7. Au total, selon les données disponibles, 2 617,5 TWh ont été produits en 2024, ce qui représente une augmentation de 2,6 % par rapport à 2023. Les trois principaux producteurs sont les États-Unis d'Amérique (30 % de la production totale d'électricité d'origine nucléaire déclarée – 781,9 TWh), qui disposent du plus grand parc nucléaire au monde, suivis de la Chine (16 % – 417,5 TWh), puis de la France (14 % – 364,4 TWh), pays qui possède la plus grande part d'énergie nucléaire dans son bouquet énergétique (67,3 %).

8. En 2024, quatre réacteurs à eau pressurisée (REP) et un réacteur à eau lourde pressurisée (REL P), d'une capacité totale de 5,7 GWe, ont été raccordés au réseau dans cinq États Membres. Les Émirats arabes unis ont terminé la construction de la centrale

nucléaire de Barakah et la tranche 4 (1 310 MWe) a été connectée au réseau le 23 mars 2024, avant de débiter son exploitation commerciale le 5 septembre 2024. En Chine, Fangchenggang-4, le réacteur HPR1000 de 1 000 MWe, a été couplé au réseau le 9 avril 2024, et son exploitation commerciale a commencé le 25 mai 2024. En Inde, la tranche 4 de la centrale de Kakrapar, contenant un réacteur à eau lourde pressurisée de 630 MWe, dont la technologie a été développée sur le territoire national à partir de réacteurs CANDU, a été raccordée au réseau le 20 février 2024, et son exploitation commerciale a



Fin décembre 2024,  
la capacité électronucléaire  
mondiale était de

**377 GWe**

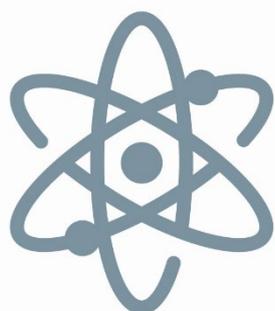
fournis par

**417** réacteurs en exploitation

dans **31** États Membres

démarré le 31 mars 2024. Aux États-Unis d'Amérique, le réacteur Vogtle-4 AP1000 de 1 117 MWe a été couplé au réseau le 6 mars 2024, et son exploitation commerciale a débuté le 29 avril 2024. En France, l'EPR de Flamanville (1 630 MWe) a été raccordé au réseau le 21 décembre 2024.

9. Fin décembre 2024, 62 réacteurs d'une capacité totale de 64,5 GWe étaient en construction dans 15 pays. La part de la Chine dans cette croissance mondiale de l'électronucléaire (46 %) mérite d'être soulignée. Au cours de l'année, neuf REP, dont la capacité totale devrait s'élever à 10,2 GWe,



Fin décembre 2024,

**62 réacteurs**

étaient en construction

dans **15 pays**

pour une capacité totale de

**64,5 GWe**

ont commencé à être construits en Chine, en Égypte, en Fédération de Russie et au Pakistan. La Chine a également débuté la construction de six nouvelles tranches d'une capacité totale de 6,8 GWe : quatre réacteurs HPR1000 – Ningde-5 (1 200 MWe), Shidaowan-1 (1 134 MWe), et les tranches 3 et 4 du site de Zhangzhou (1 129 MWe chacune) – et deux réacteurs CAP1000 – Lianjiang-2 (1 224 MWe) et Xudabu-2 (1 000 MWe). En Égypte, la construction du réacteur VVER-1200

d'El Dabaa-4, d'une capacité de 1 100 MWe, a débuté le 23 janvier 2024. Le 30 décembre, le Pakistan a commencé à construire le réacteur Chasnupp-5 de 1 117 MWe, un réacteur Hualong 1 mis au point en partenariat avec la Compagnie nucléaire nationale chinoise (China National Nuclear Corporation). De son côté, la Fédération de Russie a entamé les travaux de la tranche II - 3 (un VVER de 115 MWe) de la centrale de Leningrad le 14 mars 2024 et vise une mise en service d'ici fin janvier 2031.

10. Environ 66 % de la capacité nucléaire opérationnelle mondiale (263,3 GWe répartis entre 296 réacteurs) proviennent de réacteurs qui sont en exploitation depuis plus de 30 ans, et 166 de ces réacteurs sont même en exploitation depuis plus de 40 ans – ces derniers représentant environ 34 % de la capacité totale installée, soit 135,5 GWe. Le vieillissement du parc rend d'autant plus nécessaire la construction de nouveaux réacteurs ou l'augmentation de la capacité des réacteurs existants pour compenser les mises hors service prévues et continuer de contribuer aux objectifs de durabilité, de sécurité énergétique mondiale et de lutte contre les changements climatiques. Les gouvernements, les entreprises de services publics et d'autres parties prenantes investissent dans des programmes d'exploitation à long terme et de gestion du vieillissement d'un nombre croissant de réacteurs pour assurer une exploitation durable et une transition progressive vers de nouvelles capacités.

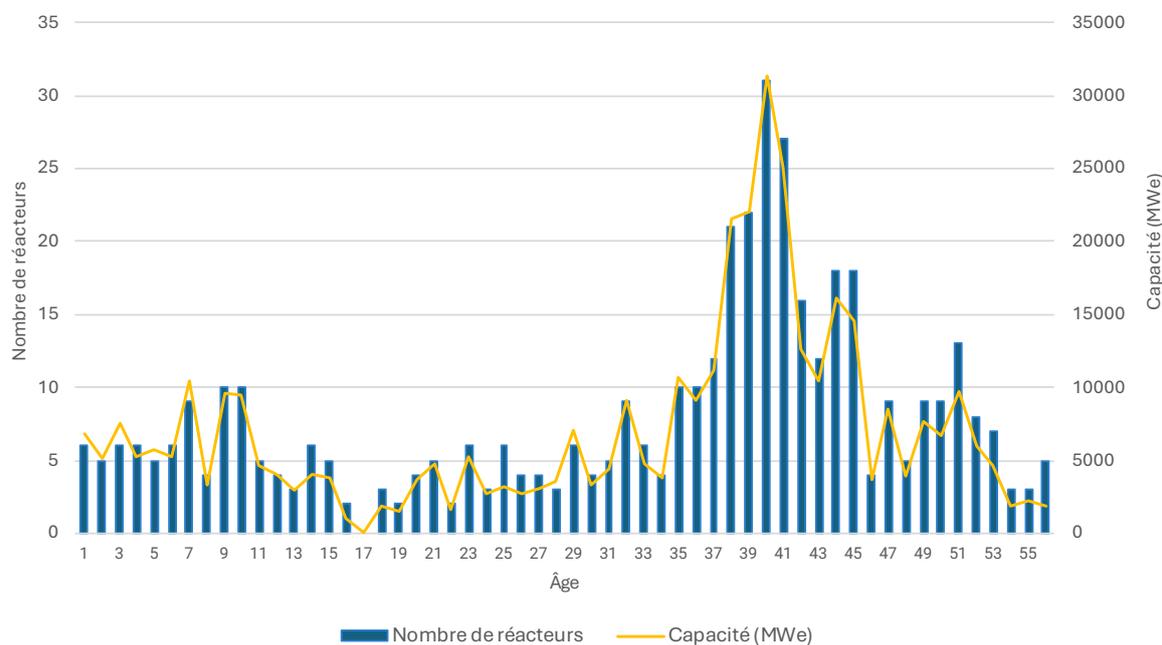


FIG. A.3. Répartition de la capacité opérationnelle nette, par âge. (Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA – PRIS)

11. Même si le parc vieillit, les réacteurs nucléaires de puissance en service demeurent généralement très fiables et performants. Le facteur de charge, ou facteur de capacité, est la production d'énergie réelle d'un réacteur divisée par la production d'énergie qu'il atteindrait s'il fonctionnait à sa puissance de référence tout au long de l'année. Un facteur de charge élevé est le signe d'une bonne performance d'exploitation. En 2023, le facteur de charge médian était de 87,74 % à l'échelle mondiale. Les réacteurs à eau bouillante (REB) et les réacteurs à eau pressurisée restent les plus performants depuis 2013. Ils affichent des facteurs de charge médians de 89,3 % et de 82,7 %, respectivement.

12. En 2024, 4 réacteurs (2,9 GWe) ont été définitivement retirés du réseau. En Fédération de Russie, Kursk-2 (925 MWe), un réacteur à eau ordinaire modéré au graphite (REOMG), a été définitivement mis à l'arrêt le 31 janvier 2024, après 45 années d'exploitation. À Taïwan (Chine), le REP Maanshan-1 (936 MWe) a été, quant à lui, retiré du service le 28 juillet 2024, après 40 ans d'exploitation. Au Canada, les tranches 1 et 4 de la centrale de Pickering, deux réacteurs à eau lourde sous pression (RELP), ont été définitivement mises à l'arrêt le 1<sup>er</sup> octobre et le 31 décembre respectivement.

### Tendances

13. À la fin de l'année 2024, les 70 années d'expérience d'exploitation accumulées à l'échelle mondiale par 653 réacteurs d'une capacité totale de 504,7 GWe, répartis dans 35 pays, représentaient plus de 20 166 années-réacteurs. La capacité électronucléaire est restée stable ces dix dernières années, allant de 353,9 GWe en 2014 à 377 GWe en 2024. Environ 72,5 GWe ont été raccordés au réseau depuis le début de l'année 2014. Si la capacité électronucléaire mondiale est restée stable au cours des dix dernières années, la production d'électricité d'origine nucléaire a généralement augmenté – une hausse notable de 5,3 % ayant été enregistrée au cours des deux dernières années, puisque la production est passée de 2 486,8 TWh en 2022 à 2 617,5 TWh en 2024.

14. Au cours des dix dernières années, 72,5 GWe (72 réacteurs) de capacité nette ont été ajoutés au réseau, dont 76 % (54,3 GWe, soit 51 réacteurs) en Asie – région dans laquelle la croissance a été largement stimulée par la Chine, qui a ajouté 39,0 GWe (38 réacteurs) au réseau depuis 2014.

### A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion

#### Situation

15. Une cinquantaine de pays souhaitent ajouter l'électronucléaire à leur bouquet énergétique pour favoriser leur développement socio-économique. Parmi eux, 37 sont déjà à différents stades du lancement ou de la mise en œuvre de leur programme électronucléaire.



16. Vingt-trois en sont à la phase décisionnelle, c'est-à-dire qu'ils envisagent de recourir à l'électronucléaire sans pour autant avoir pris de décision (Algérie, Azerbaïdjan, El Salvador, Éthiopie, Indonésie, Iraq, Jamaïque, Malaisie, Maroc, Mongolie, Myanmar, Niger, Norvège, Ouganda, Rwanda, Sénégal, Serbie, Singapour, Soudan, Sri Lanka, Thaïlande, Tunisie et Zambie). La plupart d'entre eux ont déjà procédé à des études de pré faisabilité pour informer les décideurs au sujet des avantages d'un programme électronucléaire mais également des besoins et exigences à prendre en considération pour le mener à bonne fin. D'autres ont lancé leur programme et s'emploient à créer des mécanismes nationaux de coordination et à élaborer des feuilles de route.

17. Quatorze en sont à la phase postdécisionnelle, c'est-à-dire qu'ils ont pris la décision de recourir à l'électronucléaire et mettent sur pied l'infrastructure nécessaire ou ont signé un contrat et entameront prochainement ou ont déjà entamé les travaux de construction. Les Philippines sont passées de la phase décisionnelle à la phase postdécisionnelle, tandis que le Viet Nam a décidé de relancer son programme électronucléaire et a demandé qu'une mission d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) de phase 2 soit organisée en 2025.

18. Aux centrales nucléaires de Rooppur (Bangladesh) et d'Akkuyu (Türkiye), les travaux de construction des premières tranches (toutes deux des VVER-1200) touchent à leur fin. Le chargement du combustible et les essais devraient avoir lieu mi-2025, et l'exploitation commerciale devrait débuter une fois toutes les étapes de la mise en service et tous les tests terminés. À la centrale d'El-Dabaa (Égypte), la première coulée de béton de la tranche 4 (VVER-1200) a eu lieu en janvier 2024 et la construction des enceintes de confinement internes des tranches 1 et 2 a débuté en mars et en septembre 2024, respectivement. L'Arabie saoudite devrait, quant à elle, choisir les fournisseurs des technologies pour sa centrale nucléaire en 2025, et le premier réacteur devrait être mis en service en 2036.



*FIG. A.4. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et S. A. R. le Prince Abdulaziz bin Salman Al-Saud, Ministre de l'énergie du Royaume d'Arabie saoudite, lors d'une réunion bilatérale organisée à l'occasion de la 68<sup>e</sup> session ordinaire de la Conférence générale. (Source : AIEA)*

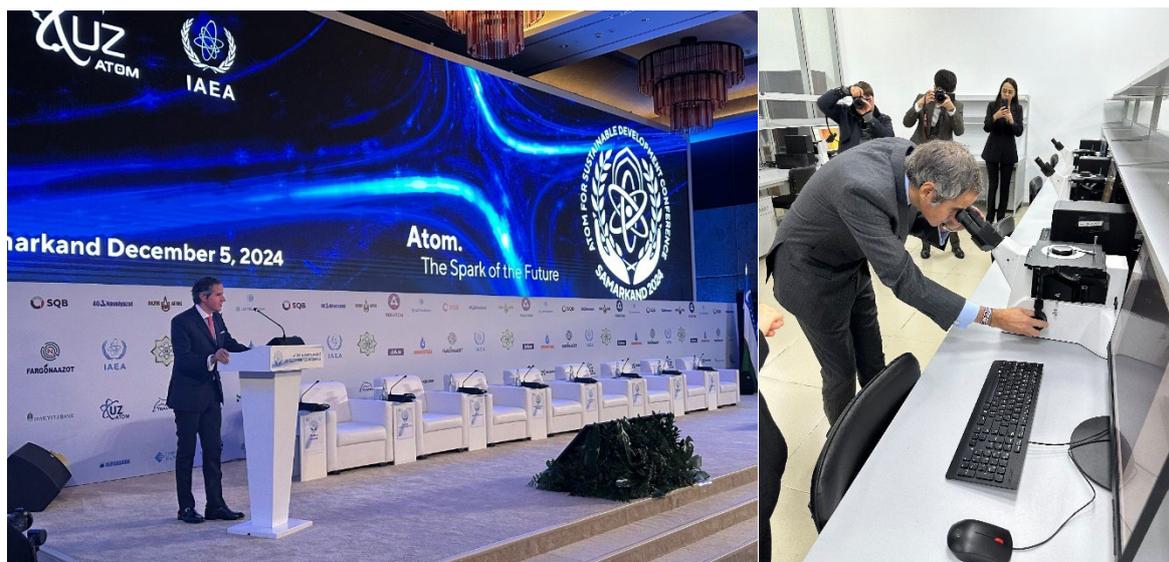
19. En Pologne, le choix des technologies et des fournisseurs pour la construction de REP dont la capacité nucléaire installée totale d'ici à 2042 devrait s'établir entre 6 000 et 9 000 MWe est arrêté. Le pays a déjà signé plusieurs contrats pour sa première centrale nucléaire, qui comptera trois réacteurs AP1000 et prépare actuellement le contrat final d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction (IAC). En avril 2024, la Pologne a accueilli une mission INIR de phase 2, qui a permis d'évaluer les progrès en matière d'infrastructures, l'idée étant de faciliter ensuite les étapes de la sous-traitance et de la construction.



*FIG. A.5. Mission INIR de phase 2 en Pologne, 14 avril 2024.  
(Source : Ministère du climat et de l'environnement)*

20. Une mission de suivi INIR aux Philippines a été menée du 2 au 6 décembre 2024 pour évaluer les progrès réalisés dans la prise en compte des recommandations et des suggestions formulées lors de la mission INIR principale de 2018, qui visait à aider les Philippines dans le développement de leurs infrastructures. Dans un décret présidentiel publié en 2022, le Gouvernement philippin a exposé sa position sur l'inclusion de l'énergie nucléaire dans le bouquet énergétique du pays. En 2024, les Philippines ont annoncé leur feuille de route pour l'énergie nucléaire, l'objectif étant de disposer de centrales nucléaires commercialement opérationnelles d'ici 2032, capables de produire au moins 1 200 MW dans un premier temps, puis jusqu'à 4 800 MW d'ici 2050 en augmentant progressivement.

21. La Jordanie continue de peaufiner l'appel d'offres pour un projet de SMR destiné à la production d'électricité et au dessalement de l'eau de mer, qu'elle prévoit de publier en 2026. De son côté, le Ghana a élargi son choix de technologies de réacteur aux SMR et examine actuellement les propositions de cinq fournisseurs potentiels pour l'établissement d'une capacité d'environ 1 000 MWe. La mise en service est prévue pour 2029. Le Kenya poursuit l'élaboration des documents d'appel d'offres aussi bien pour la construction de SMR que de grandes centrales nucléaires. En Ouzbékistan, un contrat a été signé en mai 2024 pour la construction de six réacteurs RITM-200N de 55 MWe, soit 330 MWe au total.



*FIG. A.6. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, à la Conférence sur les perspectives d'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques dans le cadre du développement durable, que les États membres de l'Organisation de la coopération islamique ont tenue sur le thème « Expériences aux niveaux international et national », à Samarkand (Ouzbékistan) le 5 décembre 2024 (source : AIEA) (photo de gauche) ; et le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, en visite sur le campus de Tashkent de l'Université nationale de recherche nucléaire MEPhI, où sont proposés des cursus sur le nucléaire (photo de droite).*

22. Pour son programme électronucléaire, l'Estonie envisage exclusivement la technologie des SMR. En octobre 2023, elle a accueilli une mission INIR de phase 1, qui l'a aidée à mener à bien l'évaluation approfondie de son infrastructure électronucléaire. Les résultats de cette évaluation ont été transmis au gouvernement, et le Parlement estonien a ensuite adopté, en juin 2024, une résolution en faveur du lancement d'un programme électronucléaire sur le territoire national.

23. Le Kazakhstan a choisi un site pour sa première centrale nucléaire et a poursuivi l'élaboration de sa stratégie d'appel d'offres et de passation de contrats et la rédaction des documents connexes. Un référendum national y a été organisé sur le recours à l'électronucléaire, qui a été plébiscité par 71 % des électeurs. Le Kazakhstan envisage également de faire appel à des SMR.

24. L'Agence a continué à faciliter le développement de l'infrastructure électronucléaire en organisant des activités à l'échelle nationale, régionale et interrégionale.



FIG. A.7. Atelier interrégional sur l'autoévaluation de l'état de développement des infrastructures pour les programmes électronucléaires, Jakarta (Indonésie), 23-27 septembre 2024.  
(Source : Agence nationale indonésienne pour la recherche et l'innovation)

### Tendances

25. De plus en plus de pays envisagent de recourir à l'électronucléaire pour faciliter leur développement socioéconomique et résoudre des problèmes liés à la sécurité énergétique ou aux changements climatiques. En 2024, cinq nouveaux pays ont commencé à travailler sur des études de pré faisabilité pour éclairer leurs décisions à venir sur l'adoption de l'électronucléaire. Outre les 32 pays qui procèdent à des études de pré faisabilité ou qui mettent sur pied des infrastructures et construisent leurs premières centrales nucléaires, une vingtaine d'autres s'intéressent à l'électronucléaire et envisagent de l'inclure dans leur futur bouquet énergétique. L'Agence a mis au point une nouvelle voie d'approche pour coopérer avec eux à un stade précoce, afin de les aider à mettre en place des mécanismes de coordination, à établir une première feuille de route et à lancer les études de pré faisabilité nécessaires à la prise de décisions. S'ils veulent assurer un déploiement responsable, les pays doivent redoubler d'efforts pour préparer leurs infrastructures, mais pourront compter pour ce faire sur l'aide de l'Agence.

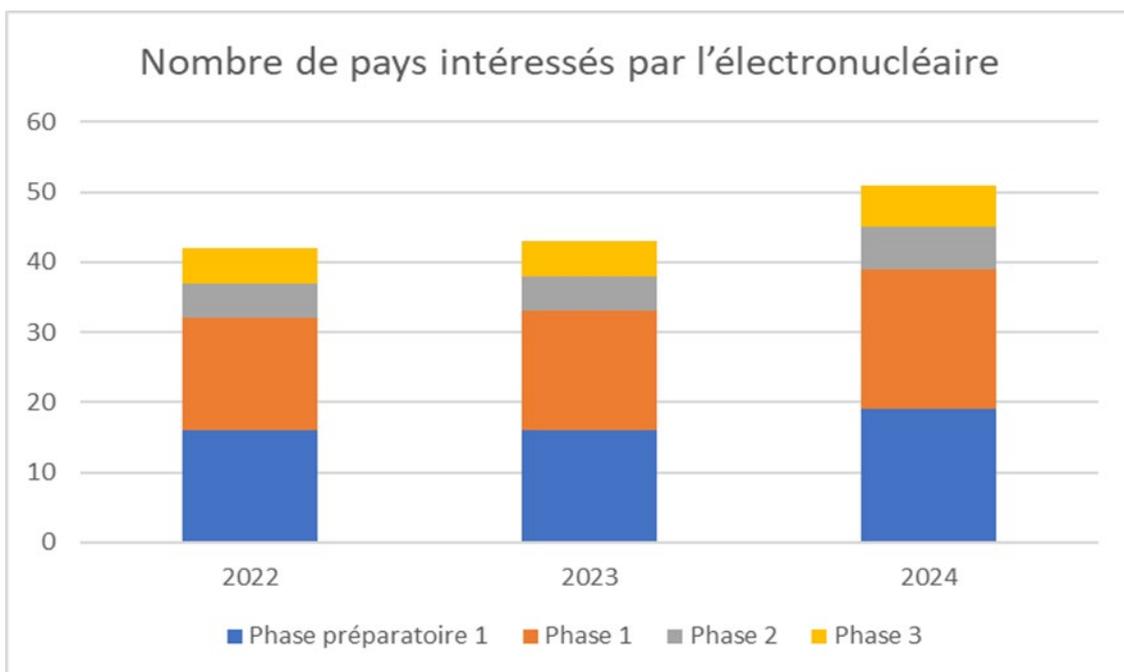


FIG. A.8. Nombre de pays aux différentes phases de l'approche par étapes. (Source : AIEA)

26. La prise de décisions et la mise en œuvre de projets de construction de centrales nucléaires progressent également dans de nombreux pays qui développent leur programme électronucléaire, parmi lesquels l'Argentine, l'Arménie, la Hongrie, le Pakistan, la République islamique d'Iran, la République tchèque, la Roumanie et la Slovaquie – et d'autres envisagent de les suivre sur cette voie. Dans plusieurs États Membres, les acteurs de l'industrie nucléaire appuient le regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire que l'on constate actuellement au niveau mondial et mettent en place des capacités supplémentaires de production de nouveaux composants. Plusieurs pays font maintenant entrer les SMR en ligne de compte lorsqu'ils réfléchissent aux technologies à utiliser et continuent de suivre les avancées en la matière. L'intérêt qu'ils portent aux SMR tient aux progrès de cette technologie et aux avantages qu'elle peut offrir par rapport aux grandes centrales nucléaires, tels que des coûts d'investissement initiaux réduits, la possibilité de couplage à de plus petits réseaux, les applications non électriques et la modularité. Pour autant, les États Membres qui entreprennent de se doter d'un programme électronucléaire fondé sur des centrales nucléaires évolutives continuent de s'intéresser aux technologies des grandes centrales.



*FIG. A.9. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi prend la parole devant des administrateurs du Groupe de la Banque mondiale à Washington le 27 juin 2024. (Source : AIEA)*

## **A.4. Développement de la technologie électronucléaire**

### **Situation**

27. L'engagement qui a été pris à la COP28, et auquel plus de 30 pays avaient souscrit fin 2024, consiste à tripler la capacité des réacteurs nucléaires en exploitation d'ici à 2050. Puisque de plus en plus de pays souhaitent étendre leurs capacités électronucléaires ou s'apprêtent à mettre en service leur premier réacteur, il est urgent d'accélérer le déploiement de centrales nucléaires avancées. Pour l'heure, les technologies éprouvées des grandes centrales – en d'autres termes, presque exclusivement des réacteurs avancés refroidis à l'eau – restent la solution privilégiée pour la production d'électricité. Ceci dit, les SMR et un certain nombre de technologies évolutives et innovantes suscitent actuellement un intérêt croissant, d'autant que ces technologies peuvent servir à bien d'autres applications que la simple production d'électricité et pourraient aider à assurer un avenir plus durable. Pour décarboner le secteur énergétique au-delà de la simple électrification, en particulier les activités industrielles particulièrement énergivores, il faudra utiliser toute la chaleur disponible, en tirant parti de la cogénération et des applications non électriques comme la fourniture de vapeur industrielle, la production d'hydrogène, le chauffage urbain et le dessalement. On comprend donc pourquoi les technologies des réacteurs avancés (tels que les réacteurs à haute température, les réacteurs à sels fondus, et les modèles à spectre rapide à caloporteur métal liquide et sodium), qui fonctionnent à des températures plus élevées, semblent

particulièrement intéressantes, et ce même si une immense partie de la demande de chaleur peut être satisfaite par des solutions déjà existantes et déployables à court terme, puisqu'une simple température modérée (en dessous de 500 °C) suffit. Les recherches se poursuivent sur les applications innovantes, telles que l'utilisation de la cogénération et de la propulsion dans l'industrie navale, les applications spatiales et le recours aux microréacteurs dans les zones hors réseau.

28. Les membres de la 33<sup>e</sup> réunion du comité directeur de l'INPRO, soit des représentants de 46 États Membres de l'AIEA et de l'Union européenne réunis en octobre 2024, ont approuvé le plan stratégique de l'INPRO pour 2024-2029 et la mise en œuvre du nouveau projet de collaboration intitulé « Renforcement des capacités en matière de planification stratégique pour une énergie nucléaire durable grâce aux programmes de formation » (conformément au programme type de l'INPRO).

## **Tendances**

29. Les réacteurs refroidis à l'eau sont la technologie nucléaire la plus courante à l'échelle mondiale. On tend actuellement à se concentrer sur l'amélioration de leurs caractéristiques de sûreté – par exemple leurs systèmes passifs de refroidissement qui aideront à améliorer la fiabilité générale des systèmes – et le perfectionnement des combustibles pour en augmenter le rendement et réduire le volume des déchets.

30. Compacts et capables d'être déployés dans des zones ou régions reculées mal dotées en infrastructures de réseau, les SMR continuent d'être envisagés pour toute une gamme d'applications dans le monde entier. Actuellement, l'objectif est surtout d'améliorer leur rentabilité, leurs caractéristiques de sûreté et leur adaptabilité.

31. En ce qui concerne le développement de la technologie des réacteurs à neutrons rapides, la tendance actuelle est à l'amélioration des mesures de sûreté au moyen de systèmes passifs de mise à l'arrêt et de nouveaux caloporteurs, notamment dans les modèles de réacteurs innovants. L'accent est également surtout mis sur l'amélioration de leur rentabilité, pour en réduire les coûts de construction et en améliorer le potentiel, l'idée étant de réduire sensiblement la radiotoxicité des déchets de haute activité qui doivent faire l'objet d'un stockage définitif. Il convient également de noter que les concepteurs et les exploitants de réacteurs à neutrons rapides s'efforcent de leur trouver une place optimale dans le cycle du combustible nucléaire, au vu des avantages que présentent ces réacteurs, notamment la simplification des exigences relatives à la composition isotopique du plutonium, la capacité de transmuter les actinides mineurs et la possibilité de produire du plutonium.

32. En 2024, une étape importante a été franchie dans la décarbonation de l'industrie : un premier grand projet consacré au chauffage et à l'électricité a été annoncé. Deux réacteurs à eau ordinaire HPR1000 et le HTR-PM600S, comptant six réacteurs à haute température refroidis au gaz (RHTRG), fourniront plus de 4 000 t/h de vapeur de qualité (jusqu'à 460 °C) et jusqu'à 1 653 MWe au parc pétrochimique de Lianyungang dans le Jiangsu (Chine) d'ici 2030.

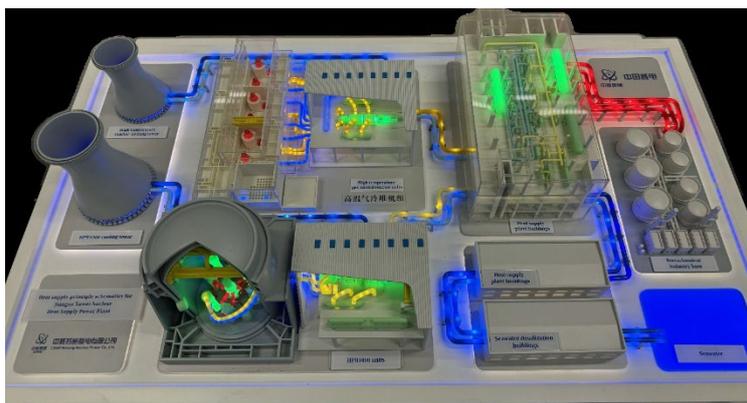


FIG. A.10. Modèle du projet de centrale nucléaire de chauffage de Jiangsu Xuwei en phase 1, comptant deux réacteurs HPR1000 (dont un ici au premier plan) et un HTR-PM600S (six réacteurs au centre), tel que présenté à l'Agence. (Source : AIEA)

#### A.4.1. Réacteurs avancés refroidis à l'eau

##### Situation

33. Les réacteurs refroidis à l'eau restent le fer de lance de l'industrie électronucléaire commerciale, représentant plus de 95 % des centrales nucléaires en service dans le monde. Les récentes avancées observées sur ces réacteurs sont le fruit d'une volonté mondiale d'innovation, motivée avant tout par des préoccupations de sûreté, d'efficacité et de durabilité. Parmi les caractéristiques importantes de ces réacteurs figurent des systèmes de sûreté passive, qui exigent peu d'interventions de la part des opérateurs, des technologies de combustible avancé offrant une meilleure résistance, des méthodes de refroidissement améliorées et des stratégies permettant de mieux gérer les déchets. En 2024, l'intérêt porté dans le monde à l'amélioration des performances des réacteurs refroidis à l'eau s'est accru, sous l'impulsion de la demande d'énergie fiable et des impératifs de résilience climatique. L'efficacité et la sûreté des réacteurs se trouvent renforcées par les progrès considérables de la science des matériaux et des modèles de calculs. Parmi les grandes avancées en matière de réacteurs refroidis à l'eau, on peut citer les nouveaux modèles en service, notamment le AP1000 aux États-Unis d'Amérique, le APR1400 aux Émirats arabes unis, le HPR1000 en Chine et l'EPR1650 en France, qui présentent des innovations sur le plan de la sûreté passive. Les travaux de la Fédération de Russie sur le réacteur VVER-S et les travaux de R-D sur les réacteurs refroidis à l'eau supercritique menés à l'échelle mondiale montrent que l'on s'achemine vers des systèmes modulaires et adaptables. La Fédération de Russie travaille également sur des projets de VVER-1200 et de VVER-TOI. Les études nationales sur les applications hybrides combinant énergie nucléaire et énergies renouvelables s'intéressent à la manière dont les réacteurs refroidis à l'eau pourraient aider à stabiliser les réseaux et faciliter certaines applications non électriques, à l'appui d'un avenir énergétique durable.

### Réacteurs refroidis par eau



de centrales nucléaires en service dans le monde

## Tendances

34. On compte 58 réacteurs refroidis à l'eau en construction dans 14 États Membres, dont 55 réacteurs à eau pressurisée (REP) avancés – 1 ACP100, 2 APR-1400, 8 CAP1000, 1 CAREM, 2 EPR, 14 HPR1000, 1 Pre-Konvoi et 25 VVER de différents types –, 2 réacteurs avancés à eau bouillante et 1 réacteur à eau lourde pressurisée (RELAP).

35. Les réacteurs refroidis à l'eau avancés sont appréciés pour leur fiabilité et leur sûreté. Ils contiennent de plus en plus souvent des systèmes de sûreté passive qui leur permettent de mieux résister aux accidents graves, même sans alimentation externe, comme le veulent les normes internationales de sûreté.

36. De nombreux pays prolongent la durée de vie de leurs réacteurs en modernisant des composants clés, afin de rentabiliser au mieux l'infrastructure déjà en place. En outre, les techniques de construction modulaire, qui permettent d'accélérer le déploiement et d'en réduire les coûts, sont de plus en plus répandues.

37. Au niveau mondial, les nouveaux réacteurs refroidis à l'eau sont souvent construits à côté de tranches existantes, en particulier en Asie et en Afrique, où la demande de grandes sources d'énergie fiables augmente. Dans les années à venir, l'objectif pour ces réacteurs avancés sera avant tout de gagner en sûreté, en flexibilité et en durabilité. À mesure qu'ils s'adapteront aux systèmes énergétiques et aux priorités climatiques, ils contribueront sensiblement à l'implantation, à l'échelle mondiale, de solutions énergétiques bas carbone éprouvées.

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

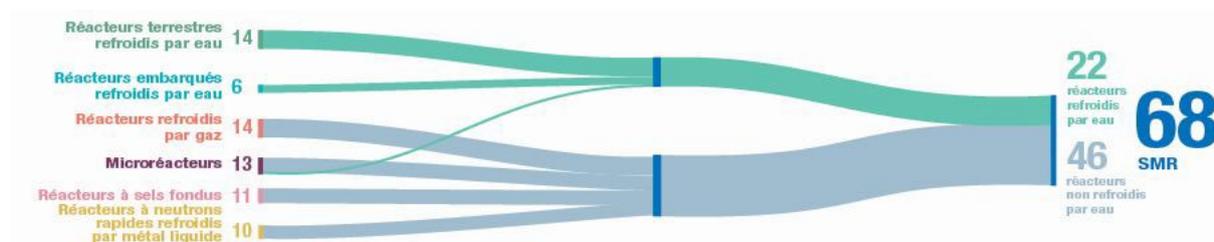


FIG. A.11. Répartition des 68 modèles de réacteurs en cours de développement, illustration tirée de la publication de l'Agence intitulée « Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024 ».

(Source : AIEA)

## Situation

38. Les SMR, y compris les microréacteurs, devraient jouer un rôle important dans le développement de l'électronucléaire pour ce qui est d'atteindre l'objectif zéro émission nette à l'échelle mondiale. La plupart de ces réacteurs reposent sur les grandes technologies disponibles, illustrées sur la figure ci-dessus, et sont bien placés pour permettre la décarbonation des secteurs de l'électricité et de l'industrie. Capables de fournir jusqu'à 300 MWe chacun, ils constituent une bonne solution pour remplacer les centrales à combustible fossile vieillissantes et pour alimenter les petits réseaux et les régions isolées. En synergie avec les énergies renouvelables et les systèmes de stockage de l'énergie, ils devraient aussi aider à moduler l'offre, et ils pourraient servir à des applications non électriques, comme le dessalement nucléaire et la production d'hydrogène. C'est dans cette optique qu'a débuté en décembre 2023 l'exploitation commerciale en Chine du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM), un SMR basé sur la technologie des réacteurs à haute température refroidis au gaz et doté de deux modules qui fournissent 200 MWe au réseau et assurent du chauffage urbain. Grâce

à la conception hautement modulaire et standardisée des SMR, les délais de construction devraient être raccourcis et les coûts d'investissement initiaux être limités, facilitant ainsi le financement des projets. Les SMR offrent une nouvelle technologie électronucléaire alternative convenant aux réseaux et aux applications industrielles pour lesquels les grands réacteurs nucléaires ne seraient pas adaptés. Ces dix dernières années, ils sont également devenus la technologie privilégiée pour les centrales nucléaires embarquées, et notamment les unités flottantes transportables de production d'électricité et les plateformes d'alimentation électrique pour les industries pétrolière et gazière. Le secteur maritime a également manifesté son intérêt pour cette technologie, car il considère qu'elle pourrait permettre d'atteindre l'objectif zéro émission nette d'ici à 2050.

39. La première Conférence internationale de l'AIEA sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications s'est tenue en octobre 2024. Ouverte par le Directeur général, elle a rassemblé plus de 1 200 participants de 97 États Membres et 18 organisations internationales.



*FIG. A.12. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA ; John Hopkins, NuScale Power ; Ramzi Jammal, Commission canadienne de sûreté nucléaire ; Xavier Ursat, EDF ; et Zhengyu Zou, Compagnie nucléaire nationale chinoise, lors de la Conférence internationale sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications à Vienne (Autriche), le 21 octobre 2024. (Source : AIEA)*

## Tendances

40. Les SMR suscitent toujours de plus en plus d'intérêt et les États Membres qui envisagent de choisir cette technologie pour leur première centrale nucléaire sont de plus en plus nombreux. Tout au long de l'année 2024, l'intérêt des États Membres pour les centrales nucléaires flottantes et les microréacteurs, ainsi que pour leurs applications, s'est lui aussi accru. De gros travaux visant à faciliter l'élaboration de nouveaux modèles et le déploiement rapide de tels réacteurs sont en cours dans les secteurs industriel et réglementaire. Les technologies à un stade d'élaboration ou de préparation avancé pourraient être déployées rapidement, vers 2030. En 2024, les activités liées à la mise au point d'un sous-ensemble des SMR, les « microréacteurs », se sont poursuivies en Afrique du Sud, au Canada, aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie, en France, au Japon et en République tchèque. Les modèles existants sont conçus pour une plage de puissance faible, 20 MWe au maximum, soit l'idéal pour les futurs marchés de niche de l'électricité et du chauffage urbain, qui pourront ainsi desservir les populations, mines et pêcheries des régions reculées qui n'ont pas d'accès à un réseau et qui sont alimentées par des centrales au gazole depuis des dizaines d'années. Parmi les technologies adoptées pour les microréacteurs figurent les réacteurs refroidis au gaz, les réacteurs à neutrons rapides à métaux liquides et les caloducs.

41. De plus en plus de pays s'emploient à concevoir des SMR embarqués pour des centrales nucléaires flottantes destinées à des applications sur terre et en mer. La première centrale flottante dotée de SMR basés sur le modèle KLT-40S, qui avait été mise en service à des fins commerciales dans la Fédération de Russie en 2020, a débuté son deuxième cycle quadriennal. Une jeune entreprise danoise développe actuellement un réacteur compact à sels fondus de 100 MWe pour une centrale nucléaire flottante. La République de Corée poursuit la mise au point du réacteur BANDI-60, réacteur à eau pressurisée compact d'une capacité de 60 MWe. La Fédération de Russie a choisi le modèle RITM-200M pour ses futures centrales nucléaires flottantes. De son côté, la Chine travaille sur l'ACP100S (une variante du modèle terrestre ACP100, pour lequel les travaux de construction ont commencé).

42. Ces SMR embarqués sont destinés à des usages bien précis, par exemple la production d'électricité et de chaleur pour des populations isolées, l'industrie de la construction navale et le dessalement, et peuvent également servir à compléter les systèmes énergétiques hybrides qui comptent une part accrue de renouvelables. Les aspects juridiques, réglementaires et institutionnels de ces projets de SMR transportables font l'objet d'un examen qui devrait en faciliter le déploiement.

43. De nombreux modèles de SMR se fondent sur les technologies des REP intégrés et des réacteurs à eau bouillante à circulation naturelle, tirant parti des points communs avec les grands réacteurs à eau ordinaire commerciaux existants. Deux modèles de REP intégrés actuellement en construction devraient être couplés au réseau d'ici 2030.

44. Dans cette optique de développement rapide, la Plateforme de l'AIEA sur les petits réacteurs modulaires et leurs applications, créée en 2021 par le Directeur général, coordonne les activités de l'Agence dans le domaine des SMR. En 2024, elle a continué de coordonner les actions de l'Agence visant à mieux épauler les États Membres et autres acteurs qui souhaitent déployer rapidement des SMR. En tout, cette Plateforme peut compter sur l'appui de 17 sections de l'Agence.

## STRUCTURE

### **Le Comité directeur de la Plateforme SMR**

est l'organe directeur présidé par le Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de l'énergie nucléaire. Il est constitué des directeurs des départements et bureaux pertinents qui font rapport au Directeur général.

**L'équipe de mise en œuvre de la Plateforme SMR** est composée des chefs de sections des départements et bureaux compétents de l'AIEA qui font rapport au Directeur général, et d'équipes spéciales qui sont organisées par thématiques pour répondre aux demandes particulières des États Membres et autres parties prenantes.

### **L'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI)**

vise à favoriser le bon déploiement de réacteurs nucléaires avancés sûrs et sécurisés dans le monde. Elle est mise en œuvre sous l'autorité du Directeur général de l'AIEA et la supervision des directeurs généraux adjoints chargés de l'énergie nucléaire ainsi que de la sûreté et de la sécurité nucléaires. Elle comprend deux volets distincts quoique complémentaires :

- **Le volet industriel de la NHSI** présidé par la directrice de la Division de l'énergie d'origine nucléaire, est axé sur les quatre thématiques que sont l'harmonisation des prescriptions de haut niveau destinées aux utilisateurs, les orientations communes en matière de codes et de normes, les essais expérimentaux et la validation des codes informatiques de conception et d'analyse de la sûreté des SMR,

et l'accélération de l'établissement de l'infrastructure nucléaire nécessaire aux SMR.

- **Le volet réglementaire de la NHSI**, présidé par le directeur de la Division de la sûreté des installations nucléaires, est constitué de trois groupes de travail chargés des questions suivantes : mise en place d'un système de partage d'informations, élaboration d'un examen réglementaire plurinationnel de la conception préalablement à l'octroi de licences, et élaboration de modalités pour mettre à profit d'autres examens réalisés par les responsables de la réglementation et appuyer les organismes de réglementation qui entreprennent des examens conjoints.

**Une équipe spéciale de la NHSI**, co-présidée par les deux directeurs, a été mise sur pied dans le cadre de la Plateforme SMR pour assurer la coordination avec les autres activités de l'Agence relatives à ces réacteurs.

**Le portail sur les SMR (<https://smr.iaea.org>)** présente aux États Membres et autres parties prenantes un panorama complet et méthodique de l'ensemble des services et activités de l'Agence en rapport avec les SMR et leurs applications. Il s'agit d'un outil de partage d'informations avec les partenaires externes et d'un point d'accès pour les États Membres et autres parties prenantes qui sollicitent une assistance. Les demandes d'assistance ou de renseignements supplémentaires peuvent être envoyées à l'adresse suivante : [SMR.Platform@iaea.org](mailto:SMR.Platform@iaea.org)

### A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides

#### Situation

45. En décembre 2024, la Fédération de Russie exploitait trois réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) : un réacteur expérimental BOR-60 de 60 MWe et deux grands réacteurs à neutrons rapides, le BN-600 et le BN-800, dont les capacités installées respectives s'élèvent à 600 MWe et 880 MWe, respectivement. La Chine exploite déjà depuis 2010 un réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de 20 MWe et construit actuellement deux CFR-600 identiques – des RNR-Na de taille industrielle d'une puissance de 600 MWe : le premier est en train d'être mis en service et le second devrait l'être en 2028. L'Inde met actuellement en service un prototype de surgénérateur à neutrons rapides (PFBR) – un RNR-Na expérimental de taille industrielle d'une capacité de 500 MWe, qui est en cours de mise en service et dont la première divergence devrait avoir lieu en 2025-2026. Au-delà des réacteurs refroidis au sodium, dont le développement est déjà ancien, plusieurs nouveaux systèmes à neutrons rapides suscitent un vif intérêt. Sur les six concepts de réacteurs innovants que le Forum international Génération IV a choisi de mettre en avant, on compte trois réacteurs à neutrons rapides et deux autres réacteurs à spectre mixte (comprenant des neutrons rapides). La technologie innovante des réacteurs refroidis par métal liquide lourd semble, quant à elle, prometteuse, et plusieurs pays

s'emploient à la développer – parmi eux la Fédération de Russie, qui construit un réacteur de démonstration à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb), le BREST-OD-300, d'une capacité de 300 MWe.



*FIG. A.13. Chantier du réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb BREST-OD-300 à Seversk, près de Tomsk (Fédération de Russie), en avril 2024. (Source : Complexe chimique de Sibérie)*

## Tendances

46. Les RNR-Na demeurent la solution privilégiée pour un déploiement à moyen terme de systèmes à neutrons rapides. En plus des trois RNR-Na qu'elle exploite déjà, la Fédération de Russie met au point le grand réacteur BN-1200M, d'une capacité de 1 200 MWe, et construit un réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides (MBIR) de 150 MWt. La Chine s'emploie de son côté à développer ses projets de RNR-Na avec un réacteur de quatrième génération, le CFR-1000, d'une puissance de 1 000 MWe. Aux États-Unis d'Amérique, l'entreprise TerraPower a débuté les travaux de construction du RNR-Na Natrium, qui fonctionne avec un système de stockage des sels fondus, peut atteindre une puissance de pointe de 500 MWe et peut être associé à d'autres sources d'énergie. Autre projet de RNR-Na aux États-Unis : le Versatile Test Reactor, réacteur d'essai polyvalent en attente de l'approbation du Congrès américain depuis 2021. En France, parmi les 11 projets présentés dans le cadre du premier appel à projets nucléaires innovants « France 2030 », six entreprises de l'Union européenne ont été sélectionnées pour le développement de SMR à neutrons rapides (trois projets s'appuyant sur des technologies à métaux liquides et trois projets s'appuyant sur des technologies de sels fondus), aux côtés d'autres projets fondés sur les technologies des réacteurs à eau sous pression, des réacteurs à haute température et de la fusion par confinement magnétique ou inertiel.

47. Bien que les RNR-Na restent la technologie la plus aboutie, plusieurs pays mettent au point et construisent des RNR-Pb – parmi eux le BREST-OD-300, en Fédération de Russie, qui devrait être mis en service en 2028. En Fédération de Russie, une centrale nucléaire dotée de réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb BR-1200M est en train d'être mise au point dans le cadre de la création de complexes énergétiques industriels associant des centrales nucléaires et des entreprises du cycle fermé du combustible sur un même site. D'après les plans actuels, la Fédération de Russie devrait construire 8 réacteurs à neutrons rapides de grande capacité d'ici 2042. Sont également en gestation le réacteur européen avancé de démonstration à neutrons rapides à caloporteur plomb (120 MWe), conçu conjointement par l'Italie et la Roumanie, et plusieurs modèles de RNR-Pb de type SMR en Chine et en France. De jeunes entreprises travaillent à la mise au point du réacteur avancé suédois refroidi au plomb SEALER de 55 MWe, ainsi que du RNR-Pb AS-30 (30 MWe) en France et du RNR-Pb AS-200 (200 MWe) au Royaume-Uni. Des travaux de R-D sont également menés en Italie. D'autres technologies de réacteurs à neutrons rapides, tels que ceux refroidis au gaz ou à sels fondus, sont en cours d'élaboration dans plusieurs États Membres de l'Agence.

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

##### Situation

48. Plusieurs États Membres utilisent l'énergie nucléaire pour des applications non électriques depuis de nombreuses années, et de nombreux autres réfléchissent à faire de même pour atteindre les objectifs climatiques. À l'heure actuelle, 67 réacteurs peuvent être utilisés pour des applications non électriques, telles que le chauffage industriel, le chauffage urbain et le dessalement. En 2024, sur ces 67 réacteurs, 46 réacteurs nucléaires répartis dans 10 États Membres ont fourni 2 644,1 GWh d'équivalent électrique de chaleur pour des applications non électriques. La majeure partie de cette chaleur (94 %) a été utilisée pour le chauffage urbain, pour un total de 2 487,4 GWh, en Bulgarie, en Chine, en Hongrie, en République tchèque, en Roumanie, en Russie, en Slovaquie et en Suisse. En Inde et en Suisse, 107,4 GWh (4 %) d'équivalent électrique de chaleur ont été utilisés pour le chauffage industriel, tandis que 49,2 GWh (2 %) ont été utilisés pour le dessalement en Inde et au Japon.

49. Capable de produire de la chaleur pour toute une gamme de processus industriels, l'énergie nucléaire est particulièrement bien adaptée à la décarbonation de nombreux secteurs dont les émissions sont difficiles à réduire. Bon nombre d'États Membres et d'industries cherchent à savoir quels besoins l'énergie nucléaire pourrait couvrir, notamment dans les raffineries de pétrole, les cimenteries, les usines pétrochimiques et les usines d'engrais. En 2024, la Chine a concrétisé son premier projet industriel de vapeur nucléaire grâce à la centrale nucléaire de Tianwan, qui fournit maintenant 600 tonnes de vapeur par heure à une usine pétrochimique voisine. L'énergie nucléaire est déjà utilisée depuis de nombreuses années pour fournir de la chaleur industrielle dans des installations comme la centrale nucléaire de Gösgen (Suisse), qui alimente en vapeur une usine de carton et une papeterie depuis 1979, ou encore la centrale nucléaire du Rajasthan (Inde), qui produit de l'eau lourde depuis 1980, principalement pour une utilisation sur site. En France, plusieurs entreprises ont soutenu l'appel à projets de réacteurs nucléaires innovants « France 2030 », dont l'objectif est de faciliter la décarbonation de l'industrie au moyen de sources de chaleur bas carbone.

50. L'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins d'alimentation des centres de données et de l'intelligence artificielle est en plein essor, en raison de l'explosion de la demande énergétique dans ces secteurs. Les grandes entreprises des technologies investissent directement dans le nucléaire pour parvenir à couvrir leurs besoins croissants en énergie et à atteindre leurs objectifs climatiques.

51. De nombreux États Membres cherchent à exploiter l'énergie nucléaire à des fins de production d'hydrogène. C'est notamment le cas du Canada, de la Chine, des États-Unis d'Amérique, de la Fédération de Russie, de la France, de l'Inde, du Japon, de la République de Corée, du Royaume-Uni et de la Suède. En République de Corée, l'entreprise Korea Hydro & Nuclear Power prévoit de coupler une installation de production d'hydrogène par électrolyse basse température (10 MWe) à une centrale nucléaire à des fins de démonstration. Ce projet devrait mobiliser 13 établissements de recherche. Au-delà de l'électrolyse basse et haute température, de nombreux pays, dont le Canada, la Chine et l'Inde, développent des capacités de production d'hydrogène nucléaire par des processus thermochimiques. Le Royaume-Uni prévoit d'installer un électrolyseur à oxyde solide à la centrale nucléaire de Heysham B afin de créer de l'hydrogène propre, par électrolyse de la vapeur à haute température, pour décarboner la production d'asphalte et de ciment. Le consortium est composé d'EDF, du producteur de matériaux de construction Hanson, du laboratoire nucléaire national britannique et de l'entreprise Vulcan Burners. En Fédération de Russie, à la centrale nucléaire de Kola, il est prévu de construire un complexe de bancs d'essais pour la production d'hydrogène, et un projet de centrale nucléaire dotée d'un réacteur à haute température refroidi au gaz (RHTRG) et d'une unité de production d'hydrogène est en train d'être mis sur pied.

52. Les États Membres continuent également de s'intéresser à d'autres applications non électriques, telles que le chauffage urbain et le dessalement. Trois villes finlandaises ont signé des accords pour évaluer la faisabilité du déploiement de SMR à des fins de chauffage urbain. En 2023, l'Agence a mené une mission d'experts en Jordanie sur l'utilisation de SMR à des fins de production d'électricité et d'eau potable.



*FIG. A.14. Installations d'essais d'électrolyse à haute température au Laboratoire national de l'Idaho. (Source : Laboratoire national de l'Idaho)*

## **Tendances**

53. Dans le contexte des applications non électriques, l'énergie nucléaire continue de susciter l'intérêt pour sa capacité unique à fournir à la fois de la chaleur et de l'électricité bas carbone en toute fiabilité. Ces applications aideront à atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre en décarbonant des secteurs comme le chauffage, les transports et d'autres industries qui dépendent actuellement des combustibles fossiles et sont responsables de la majeure partie des émissions dans le monde. En outre, l'énergie nucléaire peut être utilisée pour des applications spatiales et navales (propulsion thermique ou électrique). Couplée à d'autres solutions, comme les sources d'énergie renouvelable ou les dispositifs de stockage d'énergie, elle peut également venir renforcer les systèmes énergétiques hybrides en permettant de faire des économies et d'améliorer les capacités.

## **B. Cycle du combustible nucléaire**

### **B.1. Amont**

#### **Situation**

54. En janvier 2024, le prix au comptant de l'uranium a atteint son plus haut niveau en 17 ans, soit 106 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (275 \$ É.-U./kg d'uranium), et depuis la mi-2024, il oscille entre 80 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (soit 208 \$ É.-U./kg d'uranium) et 85 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (soit 221 \$ É.-U./kg d'uranium). Il s'agit d'une hausse considérable (environ 400 %) par rapport aux prix du marché relativement stables enregistrés sur la période 2016-2021, qui se situaient approximativement entre 20 et 30 \$ É.-U. par livre d' $U_3O_8$  (soit 52 à 78 \$ É.-U./kg d'uranium).

§ É.-U/livre d'U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

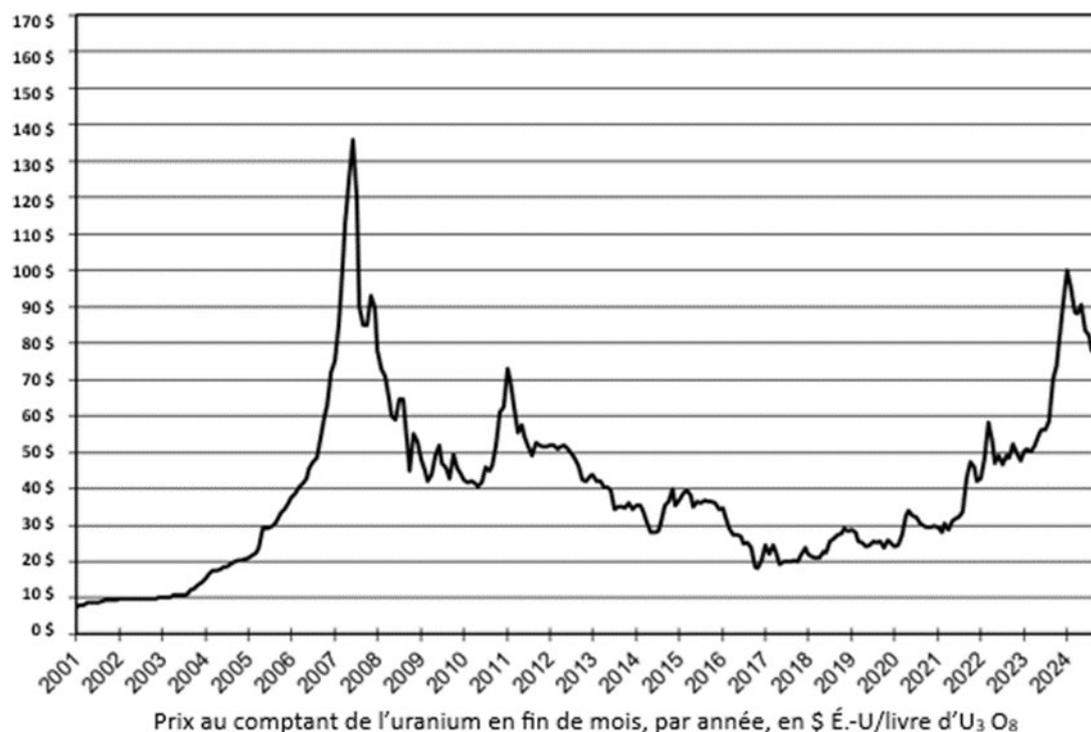


FIG. B.1. Prix au comptant de l'uranium en fin de mois entre 2001 et 2024. (Source : UxC)

55. Selon la publication intitulée *Uranium 2024: Resources, Production and Demand*, également appelée « Livre rouge » et élaborée conjointement par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN) et l'AIEA, la production des mines d'uranium dans le monde, après être passée de 54 478 à 47 581 tonnes d'uranium (tU) entre 2019 et 2020 (soit une baisse de 14 %), a augmenté de 4 % entre 2021 et 2022 (de 47 361 à 49 490 tU) et aurait atteint 54 345 tU en 2023 (soit 9 % de plus que l'année précédente). Sur cette période, les principaux pays producteurs d'uranium, notamment le Canada, le Kazakhstan et la Namibie, ont repris les activités qui avaient été limitées ou réduites par la pandémie de COVID-19 en 2020-2021.

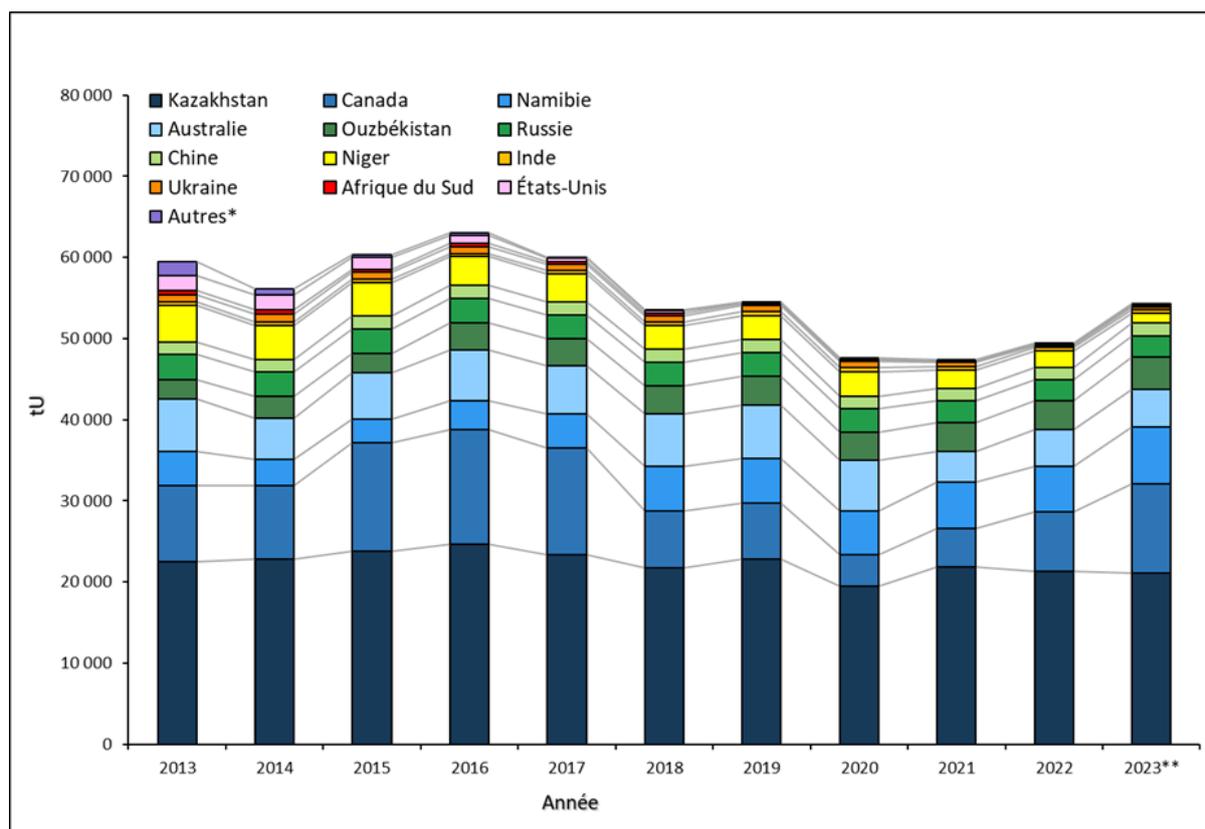


FIG. B.2. Production mondiale d'uranium au cours des dix dernières années. (Source : AIEA)

\* Les « autres » comprennent les autres petits producteurs.

\*\* Estimations de l'AEN et de l'AIEA.

56. Les ressources classiques d'uranium récupérable identifiées dans le monde (c'est-à-dire celles dont l'existence est présumée ou raisonnablement assurée dans les gisements géologiques habituellement exploités) suffisent à assurer la croissance de la production d'énergie nucléaire à court et à moyen terme. Selon l'édition 2024 du Livre rouge, les gisements identifiés pourraient permettre de récupérer plus de 10 millions de tonnes d'uranium dans la catégorie < 260 \$ É.-U./kgU et environ 7,9 millions de tonnes d'uranium dans la catégorie < 130 \$ É.-U./kgU. Compte tenu des besoins mondiaux pour les réacteurs (59 018 tU en 2022), si toutes ces ressources sont exploitées, elles devraient suffire à couvrir les besoins sur plus de 130 ans. Ce chiffre ne tient cependant pas compte des conséquences de la récente déclaration faite à la COP28 concernant le triplement des capacités de production d'énergie nucléaire d'ici à 2050, ni du déploiement de SMR à grande échelle qui est envisagé, de sorte que ces réacteurs pourraient représenter 25 % du parc nucléaire à terme.

57. Un assemblage combustible n'est pas un bien fongible, mais un produit complexe qui est issu d'activités de conception, de délivrance d'autorisation et de recherche-développement et doit répondre à certaines spécifications. Celles-ci sont déterminées par les caractéristiques physiques du réacteur, la stratégie d'exploitation du réacteur et de gestion du cycle du combustible de la compagnie d'électricité, et les prescriptions régionales ou nationales en matière d'autorisation. La production de combustible nucléaire repose sur des technologies éprouvées, qui ont évolué au fil des ans, et a connu des améliorations dans le domaine de l'automatisation, de la numérisation, de la réduction des déchets et du renforcement de la sûreté radiologique des travailleurs. La capacité mondiale de fabrication de combustible pour REO s'élève à environ 15 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, tandis que, pour les RELP, elle dépasse les 5 300 t ML par an. Ces capacités sont aujourd'hui suffisantes pour répondre à la demande attendue.

58. Les États Membres ont sensiblement progressé dans le domaine de l'efficacité économique, de la fiabilité et de la durabilité, et des travaux de recherche-développement approfondis ont été menés sur des combustibles innovants comme les combustibles tolérants aux accidents ou les combustibles de technologie avancée (ATF) et les combustibles pour les réacteurs avancés, y compris pour les SMR. Pour ces combustibles, de nouvelles installations de fabrication et une délivrance d'autorisations rigoureuse peuvent être nécessaires, car le taux d'enrichissement est plus élevé, par exemple pour l'UFE+ et l'uranium faiblement enrichi à teneur élevée (HALEU). Le projet de recherche coordonnée (PRC) de l'Agence sur l'essai et la simulation de combustibles de technologie avancée et de combustibles résistant aux accidents (ATF-TS) aide les États Membres qui ont lancé des programmes de recherche-développement et de déploiement consacrés à l'utilisation industrielle des combustibles innovants, tandis que le PRC sur les combustibles destinés aux réacteurs à neutrons rapides a été mis en œuvre pour des États Membres qui cherchent à mettre au point des réacteurs à neutrons rapides, y compris de type SMR.

### Tendances

59. À la COP28, 22 pays ont fait une déclaration pour défendre l'objectif ambitieux de triplement des capacités de production d'énergie nucléaire d'ici à 2050. Selon les prévisions qui figurent dans l'édition 2024 du Livre rouge, la demande mondiale d'uranium pourrait être comprise entre 99 485 tU (hypothèse basse) et 142 695 tU (hypothèse haute) en 2050.



60. Au fur et à mesure de leur mise en service entre 2025 et 2050, les sites d'extraction prévus ou potentiels de 19 pays pourraient contribuer à obtenir une capacité nominale de production mondiale de 80 494 tU par an au total. Pour garantir l'approvisionnement en uranium, il faudra remettre en service les mines inactives et mettre en service les sites d'extraction prévus ou potentiels. En outre, il faudra que les conditions de marché restent durablement favorables pour que de nouveaux gisements soient mis au jour. Ce point est particulièrement important pour l'implantation de nouvelles mines d'uranium, qui prend en moyenne 10 à 15 ans (de la découverte du gisement au début de l'exploitation minière). En outre, il faudra mobiliser en temps voulu des investissements importants dans des techniques d'exploration et d'extraction ou de traitement, notamment pour trouver des techniques d'extraction de l'uranium qui soient rentables pour exploiter des gisements non classiques (gisements de phosphate ou de schiste noir uranifères, par exemple), dont certains pourraient devenir lucratifs puisque le cours de l'uranium a récemment augmenté de manière spectaculaire.

61. Les innovations et les avancées relativement récentes qui peuvent transformer des gisements d'uranium peu importants et peu rentables en mines productives sont notamment les suivantes : progrès constants accomplis concernant la lixiviation in situ de l'uranium dans des gisements de type discordance, comme le gisement Phoenix, situé dans le bassin de l'Athabasca au Canada ; utilisation commerciale du procédé SABRE (extraction de ressources par trou d'accès à la surface), une nouvelle méthode d'extraction modulable mise au point par Orano Canada, qui permet d'exploiter des gisements à haute teneur relativement petits, qui sont soit trop petits, soit trop profonds pour être exploités de manière rentable au moyen de méthodes d'exploitation souterraines ou à ciel ouvert ; et biolixiviation

de grès uranifères in situ, comme dans les mines d'uranium 512, 721 et 745 en Chine. En outre, des techniques de lixiviation en tas, généralement utilisées pour l'extraction de métaux dans d'autres types de gisements minéraux, continuent d'être mises au point et semblent prometteuses pour certaines activités liées à l'uranium.

62. Au cours des dix prochaines années, le secteur de la production de combustible nucléaire devra répondre à une demande croissante pour tous les types de combustibles en raison de l'augmentation du nombre de programmes de construction – aussi bien dans les pays déjà dotés de réacteurs que dans les pays primo-accédants –, qui exigent de mettre au point de nouveaux types de combustibles, notamment pour les SMR et les réacteurs avancés. Certains États Membres ont déjà prévu de mettre en place, d'ici la fin de la décennie, une infrastructure à l'appui de l'octroi des autorisations relatives aux combustibles, qui permettrait de porter les taux de combustion et d'enrichissement au-delà de la limite des 5 % initialement prévue et/ou d'augmenter les capacités d'enrichissement et de rendre possible l'exploitation sûre et rentable des REO existants sur des cycles de 24 mois sans qu'il y ait lieu de modifier les caractéristiques physiques des usines de fabrication et des conteneurs de transport (c'est-à-dire en modifiant uniquement les procédures d'autorisation).

63. De nombreux types de combustibles améliorés sont actuellement à l'étude, ce qui donne lieu à un large éventail de solutions présentant différents niveaux de complexité. Certains de ces combustibles seront relativement faciles à fabriquer dans les chaînes et installations de fabrication existantes, tandis que d'autres en nécessiteront de nouvelles, car ils exigeront un enrichissement à plus de 5 % (ce sera le cas de l'UFE+ et de l'HALEU). Toutes les étapes de la mise en point des techniques de production de combustibles, de la recherche-développement à leur industrialisation, devront avoir été franchies avant qu'il soit possible d'utiliser avec succès tous les types de combustibles destinés aux SMR.

64. Des programmes de production d'HALEU ont été lancés en Amérique du Nord, en Europe et dans la Fédération de Russie. La Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom », qui dispose d'une infrastructure complète pour la production industrielle d'HALEU, est techniquement capable de produire de l'UFE+ et de l'HALEU sous diverses formes et enrichis jusqu'à 19,75 % en uranium 235. Aux États-Unis d'Amérique, des mesures ont été prises pour mettre en place une chaîne d'approvisionnement en HALEU : le Département de l'énergie des États-Unis a créé le consortium HALEU et la société Centrus Energy a commencé à faire la démonstration de la production d'HALEU. Urenco se prépare à approvisionner les marchés internationaux en UFE+. La société Orano veut proposer un taux d'enrichissement jusqu'à 6 % en 2025 et jusqu'à 19,75 % par la suite, en fonction de la demande. Elle travaille aussi sur des solutions pour le transport d'hexafluorure d'uranium enrichi jusqu'à 19,75 %, d'oxydes d'uranium, d'uranium métal et d'alliages d'uranium, au moyen d'un colis de transport VP-55 doté d'un panier haute capacité.

## **B.2. Aval**

### **Situation**

65. Les stocks de combustible nucléaire usé s'accumulent dans le monde au rythme d'environ 7 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, leur volume total avoisinant les 300 000 t ML. La prolongation de la durée de vie de certaines centrales nucléaires (comme Takahama au Japon ou Koeberg en Afrique du Sud) contribue à l'augmentation de la quantité de combustible usé.

66. Pour les pays qui sont dotés de programmes nucléaires depuis longtemps et qui suivent des stratégies de cycle ouvert, les principales difficultés à surmonter restent la nécessité d'augmenter les capacités d'entreposage du combustible usé et l'allongement de la durée d'entreposage avant stockage définitif. Dans la plupart des pays, le combustible nucléaire usé passe d'une installation d'entreposage en piscine à une installation d'entreposage à sec après un temps de refroidissement initial. De nouvelles

installations d'entreposage à sec sont entrées en service (par exemple en Argentine, au Japon, en Slovaquie et en Slovénie). Le Département de l'énergie des États-Unis a lancé une initiative en faveur d'une approche collaborative pour l'implantation d'installations d'entreposage centralisées. Les États Membres continuent de procéder à l'enlèvement et au déplacement de leur combustible nucléaire usé dans le cadre des projets de déclassement de leurs centrales nucléaires. De nouvelles technologies mises en place permettent de faciliter l'inspection des installations d'entreposage du combustible nucléaire usé et la manipulation des châteaux de transport. Enfin, des équipements importants ont été installés dans l'usine finlandaise d'encapsulation.

67. Le transport de combustible nucléaire usé reste une activité courante dans certains pays. Ces dernières années, face à l'augmentation des stocks, de nouveaux colis d'entreposage et de transport (TN Eagle, CASTOR geo ou encore TUK-137T.P, par exemple) ont été mis au point, autorisés (TN Eagle, par exemple) et utilisés.

68. Pour les pays qui suivent des stratégies de cycle fermé, les principales difficultés à surmonter sont les capacités de retraitement restreintes et la mise en œuvre du recyclage multiple à l'échelle industrielle dans les REO. La mise au point, à l'échelle commerciale, de nouvelles techniques de recyclage des combustibles utilisés dans le parc actuel de réacteurs et les réacteurs avancés se poursuit dans la Fédération de Russie, en France, en Inde et au Japon. Actuellement, quelque 40 réacteurs en Europe (en Belgique, en France, au Royaume des Pays-Bas et en Suisse) sont autorisés à utiliser du combustible MOX, et plus de 30 en utilisent effectivement. Au Japon, 4 réacteurs sont autorisés à utiliser ce type de combustible et plusieurs en utilisent déjà. Le pays prévoit aujourd'hui de commencer à exploiter commercialement l'usine de retraitement de Rokkasho durant l'exercice financier de 2026. Aux États-Unis d'Amérique, l'entreprise SHINE Technologies met au point des procédés de recyclage du combustible avancé et a commencé à collaborer avec la Commission nationale de la réglementation nucléaire dans le cadre d'activités qui faciliteront la demande d'autorisation pour une installation pilote de recyclage du combustible nucléaire usé. La société Oklo a quant à elle mené à bien l'étude expérimentale de faisabilité de son procédé de recyclage du combustible. En Fédération de Russie, l'exploitant du réacteur à neutrons rapides BN-600 souhaite en prolonger la durée de vie après inspection des équipements essentiels. Des assemblages combustibles expérimentaux en nitrure d'uranium et de plutonium destinés au BN-1200M seront testés dans le BN-600 afin de progresser dans la mise en œuvre du concept de « cycle équilibré du combustible », qui prévoit de retraiter le combustible usé, de recycler des matières nucléaires régénérées sous forme de combustible nucléaire et de transmuter des actinides mineurs dans des réacteurs à neutrons rapides. En outre, en 2024, trois assemblages de combustible MOX contenant du neptunium et de l'américium ont été chargés dans le réacteur BN-800 pour montrer qu'il était possible de brûler des actinides mineurs dans des réacteurs à neutrons rapides. L'année 2024 a également marqué la fin des étapes de construction et de mise en service de l'installation principale du module de fabrication et de refabrication de combustible nucléaire (NFR) du complexe énergétique de démonstration expérimentale (EDEC). Le module de retraitement de l'EDEC est en cours de conception. Il utilisera un diagramme des opérations fondé sur une combinaison d'opérations pyrochimiques et hydrométallurgiques, qui permettent de retraiter le combustible nucléaire usé en garantissant une exposition minimale et d'obtenir un produit final purifié des produits de fission (un mélange d'actinides) et adapté à la fabrication d'un nouveau combustible (régénéré).

69. Comme certains SMR devraient être alimentés par des sels combustibles (uranium, plutonium ou thorium dissous dans un sel fondu), des activités de recherche-développement sur le recyclage et la gestion de ce type de combustible, notamment concernant le nettoyage du sel, sont actuellement menées. Aux États-Unis d'Amérique, Kairos Power a commencé à construire une usine de production de sels combustibles après avoir mené avec succès des tests de fonctionnement d'une pompe à sels sur le banc d'essai qu'elle a fabriqué. En France, Orano étudie la possibilité de produire et de recycler du combustible liquide pour les réacteurs à sels fondus en spectre rapide et a conclu un partenariat avec des concepteurs de réacteurs à spectre de neutrons rapides de type SMR en 2024 pour travailler sur la R-D,

les installations pilotes et les solutions logistiques pour le sel de combustible chlorure. En Fédération de Russie, un programme est mis en œuvre pour mettre au point et construire un réacteur à sels liquides de 10 MWe pour la transmutation des actinides mineurs sur le site du Combinat minier et chimique de Krasnoïarsk.

### **Tendances**

70. La connaissance des caractéristiques des combustibles nucléaires usés et du comportement et des mécanismes de dégradation et de vieillissement de ces combustibles et des structures, systèmes et composants d'entreposage reste essentielle pour continuer à assurer l'entreposage de tels combustibles en toute sûreté, puis leur transport vers des installations de stockage définitif ou de retraitement. Des efforts soutenus ont été déployés pour mieux caractériser les combustibles nucléaires usés, d'autant que l'enrichissement initial et les taux de combustion devraient être plus élevés à l'avenir, ce qui entraînera une augmentation de la puissance thermique et des risques accrus de fragilisation des gaines, qui peuvent avoir une incidence sur la gestion du combustible usé jusqu'au stockage définitif.

71. Dès lors que de nouveaux combustibles destinés au parc de réacteurs existant (par exemple des combustibles dopés) et aux modèles de réacteurs avancés (notamment aux SMR) sont envisagés et testés, ils pourraient avoir un comportement différent au stade de la gestion du combustible usé et il faudra trouver des solutions innovantes pour que ce type de combustible puisse être utilisé. La gestion du combustible usé des réacteurs ARG au Royaume-Uni et des réacteurs HTGR en Allemagne permet de tirer des enseignements précieux, qui pourraient servir pour la gestion des combustibles usés issus de nouveaux réacteurs HTRG, comme le réacteur à lit de boulets qui est exploité en Chine.

72. En raison des préoccupations que soulève l'énergie nucléaire sur le plan de la durabilité, le recyclage des combustibles usés suscite un intérêt croissant. Malgré la réduction globale des capacités mondiales de retraitement du combustible usé, la mise au point de technologies de recyclage avancées suscite un intérêt croissant tant pour ce qui concerne les combustibles actuels que pour le déploiement durable de réacteurs avancés et de SMR. En France, la stratégie d'aval a été confirmée au-delà de 2040 par le gouvernement. Par conséquent, les installations industrielles de La Hague seront agrandies et de nouvelles installations seront construites. Les travaux de construction d'une nouvelle usine de retraitement débuteront en 2045/2050.

73. Il est essentiel d'intégrer les cycles du combustible nouveaux et innovants dans les cycles du combustible existants pour pouvoir surmonter les difficultés actuelles d'approvisionnement énergétique et garantir le développement durable, sûr et sécurisé de l'énergie d'origine nucléaire. Des initiatives visant à gérer de manière intégrée le combustible usé et les déchets radioactifs commencent à être examinées et mises en œuvre au Canada, aux États-Unis d'Amérique et en France. La mise au point et le déploiement de nouveaux réacteurs et des cycles du combustible correspondants est une vaste entreprise et, pour y parvenir, il est primordial de nouer des collaborations et des partenariats à l'échelle internationale.

## **C. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs**

### **C.1. Déclassement**

#### **Situation**

74. Même si l'on ignore encore à quel rythme les installations nucléaires seront mises à l'arrêt, le nombre de centrales nucléaires et de réacteurs de recherche en cours de démantèlement continue d'augmenter, la tendance étant au démantèlement rapide peu après la mise à l'arrêt définitive. Cette tendance est influencée par les politiques publiques, les réductions de coûts obtenues grâce à un entretien et une surveillance minimums des installations pendant les périodes de mise en attente sûre, et les préoccupations suscitées par les coûts croissants d'un démantèlement différé et de la gestion correspondante des matières.

75. Le déclassement de nombreuses installations nucléaires, y compris d'installations dotées de plusieurs réacteurs de puissance ou de recherche, progresse régulièrement dans bien des pays, par exemple en Allemagne, en Bulgarie, au Canada, en Espagne, aux États-Unis d'Amérique, dans la Fédération de Russie, en France, en Italie, au Japon, en Lituanie, au Royaume-Uni, en Slovaquie et en Suède. En particulier, des pays qui ont décidé de sortir progressivement du nucléaire ou ont adopté une stratégie de démantèlement accéléré – comme l'Allemagne ou le Royaume-Uni – ont délivré un nombre croissant d'autorisations de déclassement. La fin du déclassement des réacteurs de recherche dans des pays comme la Finlande ou le Royaume-Uni montre également les progrès accomplis. En novembre 2024, 211 réacteurs de puissance répartis dans 21 États Membres avaient été mis à l'arrêt définitif à des fins de déclassement, 23 tranches étant entièrement déclassées en Allemagne, aux États-Unis d'Amérique, au Japon et en Suisse.

76. D'autre part, les projets de déclassement montrent l'importance accrue qui est accordée aux principes de l'économie circulaire. Ainsi, le caractère durable du déclassement apparaît de différentes manières. Il se traduit notamment par une utilisation efficace des matériaux déclassés afin de réduire au minimum le volume de déchets qui doivent être entreposés à long terme ou stockés définitivement, et par une attention accrue portée à la réutilisation ou à la reconversion des sites pour de futurs projets industriels. L'application des principes de l'économie circulaire au déclassement exige toutefois la collaboration de diverses parties prenantes, notamment de responsables politiques, d'organismes de réglementation et de collectivités, qui ne partagent pas nécessairement les mêmes idées sur l'utilisation future des sites nucléaires.

77. Malgré ces avancées, des difficultés persistent, surtout dans les pays dont les ressources techniques et financières sont limitées, ce qui les empêche de mettre en œuvre des stratégies de déclassement efficaces. Les transferts de connaissances et la collaboration internationale sont indispensables pour faire connaître les meilleures pratiques et les innovations techniques et, à terme, faciliter le déclassement dans le monde entier.

78. Le secteur s'adapte à l'évolution de la situation, mais les SMR influent également sur les stratégies de déclassement, car ils peuvent contribuer à simplifier les futures méthodes de déclassement grâce à leur conception modulaire.

79. Leur emprise étant plus faible et leur conception plus simple, les SMR pourraient contribuer à réduire la durée du déclassement et le volume de déchets par rapport aux réacteurs de plus grande taille. De nouveaux cadres réglementaires devront toutefois être mis en place pour résoudre les problèmes qu'ils posent sur le plan du déclassement. L'attention qui est désormais portée au déclassement des SMR offre des possibilités d'innovation, en particulier une conception au service de l'économie circulaire.

Certains concepteurs de SMR travaillent sur des modèles qui favorisent la longévité, la facilité de reconditionnement et la possibilité de réutiliser, de reconvertir ou de recycler les matériaux. Alors qu'un nombre croissant de pays envisage d'ajouter les SMR à son portefeuille énergétique, une collaboration entre les organismes de réglementation, les acteurs du secteur et les instituts de recherche sera indispensable pour que les méthodes de déclassements soient efficaces, sûres et écologiquement responsables.

80. Compte tenu de ce changement, le déclassement devrait évoluer au cours des prochaines années, ce qui exigera de poursuivre la coopération internationale, le développement des compétences et les innovations techniques afin de pouvoir gérer les exigences variées qui sont induites par les différents types de réacteurs en cours de déclassement.

### **Tendances**

81. En matière de déclassement des centrales nucléaires, on observe depuis peu une montée en puissance de consortiums spécialisés qui mettent en commun les compétences de plusieurs entreprises pour mettre en œuvre des projets de déclassement complet à budget fixe. Ces consortiums suivent des approches normalisées et assument les risques des projets, ce qui permet d'améliorer l'efficacité et la gestion des coûts.

82. L'utilisation des différentes techniques de déclassement continue de progresser, comme en témoigne le recours accru à des outils télécommandés comme les drones et les robots pour la décontamination, la segmentation des composants des installations, les mesures, la manutention et la gestion automatisée des déchets.

83. À l'avenir, le numérique devrait jouer un rôle essentiel dans les activités de déclassement en rendant les connaissances sur les projets actuels plus accessibles aux concepteurs d'installations nucléaires, aux exploitants, aux organismes de réglementation et aux parties prenantes des futurs projets. L'utilisation plus large de l'intelligence artificielle favorisera le passage au numérique dans les activités de déclassement. Parmi les autres innovations, on peut citer le recours à des robots mobiles pour étudier l'état des structures et la situation radiologique, et les outils télécommandés pour les zones où la dose est élevée, afin d'améliorer la sûreté et l'efficacité des opérations.

## **C.2. Remédiation environnementale et gestion des matières radioactives naturelles (NORM)**

### **Remédiation environnementale**

#### **Situation**

84. La remédiation environnementale des sites radiocontaminés a progressé régulièrement dans le monde entier, de nombreux pays ayant mis en place des cadres pour gérer la contamination de manière sûre et remettre en état les milieux touchés. Les États Membres qui sont dotés de programmes nucléaires avancés – comme les États-Unis d'Amérique, la France et le Japon – ont adopté de solides programmes de remédiation axés sur la décontamination d'anciens sites nucléaires, d'anciennes mines d'uranium et d'installations utilisées pour des activités industrielles. Les progrès accomplis sont souvent le fruit des effets conjugués de normes réglementaires, d'innovations techniques et d'une collaboration entre différents secteurs.

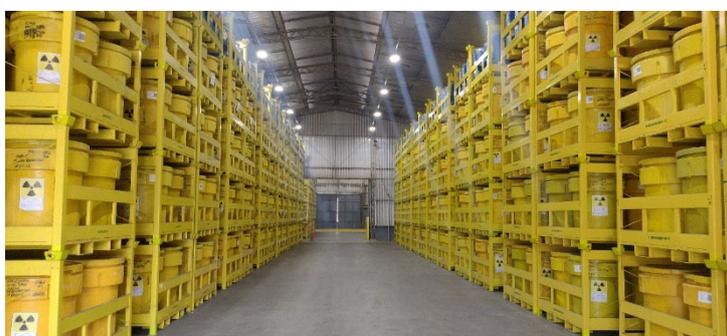
85. Des projets de remédiation d'envergure variable ont été lancés dans de nombreux pays. Aux États-Unis d'Amérique, le Bureau de la gestion de l'environnement du Département de l'énergie supervise le plus grand programme de remédiation environnementale au monde, dont l'objet initial était d'assainir 107 sites dans le pays. À ce jour, 92 d'entre eux ont été assainis et 15 sont encore en phase de

remédiation active. Au Royaume-Uni, l'Autorité du déclassé nucléaire est chargée d'assainir 17 sites nucléaires civils et de gérer les déchets et installations historiques.

86. Énergie atomique du Canada limitée gère le passif nucléaire du Gouvernement canadien, qui comprend cinq sites nucléaires et plusieurs sites d'extraction et de traitement de l'uranium. En Allemagne, la remédiation des sites d'extraction et de traitement de l'uranium qui se trouvent en Saxe et en Thuringe a commencé en 1991 et les travaux sont achevés à presque 90 %.

87. L'Agence coordonne l'assainissement en cours des anciens sites de production d'uranium en Asie centrale par l'intermédiaire du Groupe de coordination pour les anciens sites de production d'uranium. Le Projet de remédiation de l'environnement des mines d'uranium (PRAMU) qui a été lancé en Argentine vise à assainir les anciens sites d'extraction de l'uranium, et des progrès similaires ont été observés concernant la remédiation des sites de production d'uranium en France et au Portugal.

88. S'agissant des sites où un accident nucléaire s'est produit, des travaux d'assainissement considérables se poursuivent à Tchernobyl et à Fukushima. Ils portent sur le confinement à long terme, la surveillance et la remédiation environnementale des zones contaminées.



*FIG. C.1. Installation d'entreposage de déchets de matière radioactive naturelle issus d'activités pétrolières et gazières. (Source : Petrobras)*

## **Tendances**

89. Parmi les nouvelles tendances en matière de remédiation, on peut citer la priorité accordée aux pratiques durables, par exemple à l'application des principes de l'économie circulaire pour réduire le volume de déchets et utiliser au mieux les ressources. Des outils comme la télédétection, l'apprentissage automatique ou la robotique jouent un rôle important, car ils permettent une caractérisation plus précise des sites, une meilleure surveillance et une gestion plus sûre des déchets. Toutefois, dans les pays dont les ressources sont limitées, des difficultés subsistent, ce qui rend la coopération internationale indispensable pour disposer de capacités techniques suffisantes, acquérir des connaissances et accéder aux meilleures pratiques.

90. La remédiation environnementale pose des problèmes différents selon l'État Membre concerné. S'agissant de l'assainissement des sites nucléaires complexes, des progrès sont bien visibles, mais le rythme des travaux et le fait de savoir si les moyens ont été pleinement investis à bon escient suscitent des préoccupations. Pour les pays où il y a d'anciennes mines d'uranium – surtout pour ceux dont les ressources sont limitées –, la difficulté est de trouver des solutions innovantes dans lesquelles le stade final offre aux sites une « seconde vie » productive. Il reste indispensable de mener des travaux de recherche sur des technologies de pointe et des approches intégrées, de la caractérisation des sites aux solutions de remédiation. L'innovation est également essentielle pour pouvoir réellement valoriser les résidus miniers.

91. À l'avenir, la priorité pour le monde entier est de mettre en œuvre des stratégies de remédiation durable, qui réduisent au minimum les risques pour la santé humaine et l'environnement à long

terme, grâce à des partenariats entre les gouvernements, les acteurs du secteur et les organisations internationales. La collaboration internationale est indispensable pour échanger des données d'expériences et des connaissances qui permettent de trouver des solutions conformes aux attentes du public, ce qui contribuera à renforcer la confiance de la société dans l'énergie nucléaire.

## **Gestion des matières radioactives naturelles**

### **Situation**

92. La gestion des matières radioactives naturelles dans le monde s'améliore à mesure que les pays élaborent et affinent des cadres réglementaires afin de relever les défis uniques que posent ces matières. De nombreux pays, dont le Canada, les États-Unis d'Amérique et les États membres de l'Union européenne, ont mis en œuvre des lignes directrices spécifiques pour la gestion des matières radioactives naturelles. Ces lignes directrices portent sur la manipulation, l'entreposage et le stockage définitif des résidus conformément aux normes internationales, certains pays ayant pris en compte les principes de l'économie circulaire afin de réduire au minimum le volume de déchets et de réutiliser les matières dans la mesure du possible. Des technologies de pointe comme l'intelligence artificielle ou la gestion des stocks basée sur les données sont de plus en plus utilisées pour suivre et gérer les matières radioactives naturelles.

93. Il est plus difficile aux pays à faible revenu qui présentent des disparités sur le plan des moyens et des compétences techniques de mettre en œuvre une stratégie globale de gestion des matières radioactives naturelles. La coopération internationale et l'échange de connaissances restent indispensables pour aider les pays à établir des cadres efficaces et à lutter contre les effets des résidus de matières radioactives naturelles sur la santé, la sûreté et l'environnement.

### **Tendances**

94. La gestion des matières radioactives naturelles reste un défi pour de nombreux États Membres, en particulier pour ceux qui doivent démanteler des plateformes pétrolières et gazières en mer. Elle doit être intégrée, englober une politique et une stratégie et s'appuyer sur des inventaires des résidus complets et des filières d'évacuation des déchets de matière radioactive naturelle qui soient financièrement pertinentes. La mise en œuvre de solutions de l'économie circulaire pour les résidus produits jouera également un rôle essentiel et aidera les États Membres à procéder à un démantèlement sûr et durable en temps voulu.

## **C.3. Gestion des déchets radioactifs**

### **Situation**

95. La gestion des déchets radioactifs a sensiblement progressé tout au long de l'année 2024, des avancées notables ayant été enregistrées en ce qui concerne les programmes de stockage définitif et l'application sûre des techniques de gestion des déchets avant stockage définitif. Ces activités témoignent d'un engagement en faveur de solutions de gestion à long terme des déchets qui donnent la priorité à la sûreté et à la protection de l'environnement.

96. Les installations d'entreposage de type RADON sont en cours de déclassement dans plusieurs pays. La Lituanie a déjà récupéré les déchets et les objets contaminés situés dans l'installation de Maišiagala, en vue d'une libération du site à la mi-2025. En Hongrie, des projets en cours visent à enlever les déchets qui se trouvent sur le site de Püspökszilágy et à les mettre dans le dépôt de Bábaapáti.

La République de Moldova se prépare également à déclasser son installation de type RADON en 2026-2027.



*FIG. C.2. Infrastructure utilisée pour le déclassement de l'installation d'entreposage de type RADON de Maišiagala, en Lituanie. (Source : centrale nucléaire d'Ignalina)*

97. La Commission pakistanaise de l'énergie atomique a mis au point des moyens de caractérisation des déchets des centrales nucléaires et des déchets de déclassement. Parallèlement, des traitements sur mesure sont en train d'être mis au point pour les résines échangeuses d'ions, une attention particulière étant accordée à la réduction maximale du volume de déchets à l'aide de supercompacteurs et d'incinérateurs.



*FIG. C.3. Laboratoire de caractérisation et conditionnement de déchets à la centrale nucléaire de Chashma, au Pakistan. (Source : PAEK)*

98. De nombreux États Membres continuent d'élaborer et d'affiner leurs politiques et leurs stratégies nationales de gestion des déchets radioactifs, tout en mettant en place des organismes spécialisés dans la gestion des déchets. En Türkiye, l'Institut turc de recherche sur l'énergie, le nucléaire et l'activité minière (TENMAK) a été créé pour superviser tout le cycle de vie de la gestion des déchets radioactifs, tandis que l'Arménie et le Portugal continuent d'élaborer un cadre juridique pour pouvoir créer des organismes de gestion des déchets.

99. En Bulgarie, l'entreprise publique chargée des déchets radioactifs (la DPRAO) a achevé la construction de l'installation nationale de stockage définitif en juin 2024. Située à proximité de la centrale nucléaire de Kozloduy, cette installation fait actuellement l'objet d'essais de mise en service sans matières radioactives. Il s'agit d'une installation ultramoderne, qui a été conçue et construite pour stocker définitivement les déchets radioactifs de faible ou moyenne activité produits par la centrale de Kozloduy.

100. En juillet 2024, le Centre industriel français de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES) a reçu une autorisation pour augmenter sa capacité de stockage définitif et ainsi passer de 650 000 m<sup>3</sup> à 950 000 m<sup>3</sup>, sans pour autant augmenter sa surface. Sa durée de vie utile sera ainsi prolongée d'une quinzaine d'années.

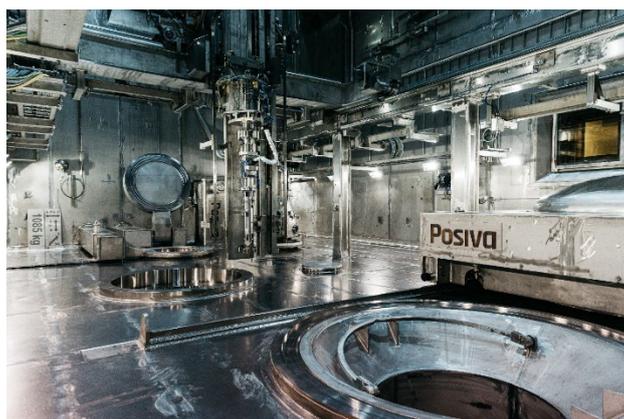
101. En Fédération de Russie, des recherches sont menées sur la séparation de la « fraction à vie courte » du combustible nucléaire usé – plus précisément les isotopes du césium et du strontium. L'idée serait de les conditionner dans des matrices qui pourraient être stockées à faible profondeur, ce qui permettrait de réduire d'un certain ordre de grandeur les volumes et l'activité de stockage en profondeur des déchets radioactifs. En outre, il est prévu de créer un laboratoire dans la région de Krasnoïarsk pour tester la technologie de stockage en grande profondeur des déchets de haute et moyenne activité.

102. En Slovénie, l'Agence pour la gestion des déchets radioactifs (ARAO) a commencé à construire une installation de stockage définitif pour les déchets de faible activité issus de l'exploitation et du déclassement ultérieur de la centrale nucléaire de Krško. Cette installation en béton de type silo, la première du genre, est construite à partir de la surface. Une fois les travaux terminés, elle aura un diamètre intérieur d'environ 27 mètres et une profondeur d'environ 51 mètres. La construction de l'installation devrait être achevée en 2027 et elle devrait fonctionner jusqu'au milieu des années 2040.



*FIG. C.4. En Slovénie, la construction de l'installation de stockage définitif des déchets de faible activité a commencé. (Source : ARAO)*

103. Des progrès prometteurs ont été enregistrés dans le domaine des dépôts géologiques profonds, et ce même s'il reste difficile de trouver des sites et d'obtenir les autorisations pour ces installations. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires a reçu l'autorisation de « descendre sous terre » et d'engager la construction d'un dépôt géologique profond à Oskarshamn. L'installation de stockage définitif d'Onkalo (Finlande), destinée à accueillir le combustible usé dans la roche hôte cristalline d'Olkiluoto, fait figure d'exception car elle est presque opérationnelle. L'entreprise Posiva y a débuté un essai de stockage définitif en août 2024. Cet essai consiste à encapsuler cinq conteneurs en fonte et en cuivre où ont été placés de faux assemblages. Six organismes de gestion des déchets et une autorité d'un État Membre assistent à l'essai et ont payé Posiva Solutions à cette fin. La Société canadienne de gestion des déchets nucléaires a lancé en 2010 sa procédure de choix du site, en mettant l'accent sur la participation des communautés et le consentement. En novembre 2024, elle a annoncé qu'elle avait choisi la Nation ojibwée de Wabigoon Lake et la localité d'Ignace, dans la province de l'Ontario, pour accueillir le futur site de dépôt géologique profond du Canada. En France, le projet « Cigéo » de dépôt géologique profond de déchets radioactifs est actuellement au stade indispensable des consultations publiques et de l'analyse technologique, et progresse conformément au calendrier prévu. Les travaux de construction devraient débuter en 2027-2028 et l'installation devrait commencer à être utilisée en 2035.



*FIG. C.5. En Finlande, les essais de stockage définitif du combustible utilisé visent à tester l'ensemble du système de stockage définitif, notamment les techniques employées, l'organisation mise en place et les procédures. (Source : Posiva Finlande)*

## **Tendances**

104. La gestion intégrée des déchets radioactifs contribue à une utilisation durable de la technologie nucléaire grâce à l'optimisation du traitement des déchets, de leur production à leur stockage définitif. Elle permet de rationaliser les processus et d'atténuer les risques pour l'environnement, et exige une coordination entre les décideurs et les gestionnaires de déchets afin de fixer des objectifs judicieux et de choisir des solutions techniques adéquates.

105. Le Département de l'énergie (DOE) des États-Unis a conclu une étude de deux ans sur la gestion à long terme du combustible nucléaire utilisé provenant de réacteurs avancés. Cette étude servira de base aux négociations que le Département mènera avec les futurs exploitants de réacteurs pour fixer ses conditions d'acceptation de combustible nucléaire utilisé.

106. L'intérêt croissant des États Membres pour le déploiement de SMR devrait transformer l'industrie nucléaire, mais il pose aussi de nouveaux défis pour la gestion des déchets radioactifs. Les politiques et stratégies de gestion des déchets radioactifs devront évoluer à mesure que les pays adoptent ce type de réacteur. L'essentiel est de bien connaître les caractéristiques des déchets – en particulier les types, les volumes et les niveaux de radioactivité des déchets qui sont produits par les SMR. Ces connaissances sont indispensables pour pouvoir mettre au point des systèmes de gestion des déchets efficaces, notamment des solutions de traitement, d'entreposage et de stockage définitif qui soient adaptées aux caractéristiques particulières des déchets issus des SMR.

107. La hiérarchisation des déchets radioactifs, qui met l'accent sur la prévention, la minimisation, la réutilisation et le recyclage des déchets, est une tendance qui prend de l'importance. Elle permet de réduire le volume des déchets envoyés aux installations de stockage définitif pour préserver ces dernières, qui sont un atout précieux pour le long terme. À titre d'exemple, on peut citer l'installation Western Clean-Energy Sorting and Recycling exploitée par Ontario Power Generation, qui réduit au minimum les déchets des centrales nucléaires, limitant ainsi les besoins d'entreposage et les coûts de déclasserment. Le recyclage des résidus radioactifs issus de la production de radio-isotopes médicaux et la récupération d'UFE par l'installation belge RECUMO témoignent également d'un engagement en faveur de la réduction des déchets. Le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs de la France vise à fournir une stratégie pluriannuelle intégrée de gestion des déchets nucléaires, en vue de réduire les volumes de déchets et d'améliorer la circularité du secteur nucléaire.

108. L'Initiative mondiale de gestion du radium 226 vise à recycler les anciennes sources de radium. Dans le cadre de cette initiative, des sources de radium retirées du service ont été enlevées en El Salvador, en Slovaquie et en Thaïlande. Huit autres transferts sont prévus, notamment aux Fidji, en

Indonésie, en Malaisie, aux Philippines et à Sri Lanka, afin de dresser l'inventaire des sources de radium retirées du service qui permettraient de produire des radio-isotopes pour le traitement du cancer. En 2024, 11 sources de haute activité ont été enlevées au total en Jordanie, en République de Moldova et en République dominicaine. À la suite de l'opération qui a été menée avec succès au Chili en 2023, les États Membres continuent de demander un appui technique pour l'enlèvement de sources de catégories 1 ou 2 dont les stocks sont complexes et volumineux.

## **D. Recherche et développement de la technologie de la fusion pour la future production d'énergie**

### **Situation**

109. Des progrès ont continué d'être réalisés à l'Installation nationale d'ignition (États-Unis d'Amérique). Depuis qu'ils sont parvenus à atteindre le seuil d'ignition de l'énergie de fusion en décembre 2022, les chercheurs du Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis d'Amérique) ont réussi à reproduire cette prouesse à quatre reprises au moins dans le cadre de quatre expériences réalisées en 2023 et début 2024. Lors de l'expérience la plus récente, ils ont obtenu un rendement record de 5,2 mégajoules et un gain supérieur à 2.



*FIG. D.1. Installation nationale d'ignition du Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis d'Amérique). (Source : Laboratoire national Lawrence de Livermore)*

110. Le déclassement du Tore européen commun (JET) a commencé au terme de 40 années d'activité et à l'issue des dernières expériences menées avec le mélange de combustible deutérium-tritium jusqu'à la fin de 2023. Il se poursuivra jusqu'en 2040 environ et fournira des informations précieuses aux spécialistes de la fusion qui auront la possibilité d'analyser l'évolution des matériaux à l'intérieur de la cuve après des années de fonctionnement.

111. Lors des dernières expériences menées en décembre 2023, le JET a franchi une étape décisive. Les scientifiques ont établi un record mondial en maintenant la réaction de fusion pendant 5 secondes, produisant ainsi 69 mégajoules d'énergie avec un minimum de combustible. Ils ont étudié des techniques innovantes, telles que l'inversion de la forme du plasma pour en améliorer le confinement. En outre, ils ont dirigé intentionnellement un faisceau d'électrons à haute énergie, produits lors de disruptions du plasma, sur la paroi interne pour mieux comprendre les mécanismes de contrôle du faisceau et d'endommagement des matériaux de la paroi.



*FIG. D.2. La réaffectation du JET sera facilitée par des systèmes de télémanipulation.  
(Source : Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni)*

112. Le projet ITER est passé par une période de transition et les activités se poursuivent désormais en fonction d'un nouveau scénario de référence. Les réparations de composants clés suivent leur cours conformément au calendrier prévu. Les activités de construction, de fabrication, d'assemblage et de mise en service du système continuent de progresser. Au terme d'un d'examen qui a duré plus d'un an, une nouvelle proposition de scénario de référence a été soumise au Conseil ITER en juin 2024 – proposition que le Conseil a approuvé en novembre 2024.

113. La découverte et l'analyse de non-conformités géométriques dans les joints biseautés de plusieurs secteurs de la chambre à vide, ainsi que la fissuration par corrosion sous contrainte due au chlorure dans les circuits de refroidissement des écrans thermiques, ont entraîné un retard dans l'assemblage du tokamak ITER dû à la nécessité d'effectuer des réparations. Des discussions approfondies ont eu lieu avec l'Autorité de sûreté nucléaire française (ASN) afin d'améliorer la démonstration de sûreté associée à l'octroi d'autorisation pour le projet ITER. Entre-temps, les systèmes d'alimentation électrique, l'usine cryogénique et le circuit d'eau de refroidissement ont été installés et pour l'essentiel mis en service. Toutes les bobines de champ poloïdal et de champ toroïdal et la plupart des modules du solénoïde central et d'autres composants de première importance ont été livrés.

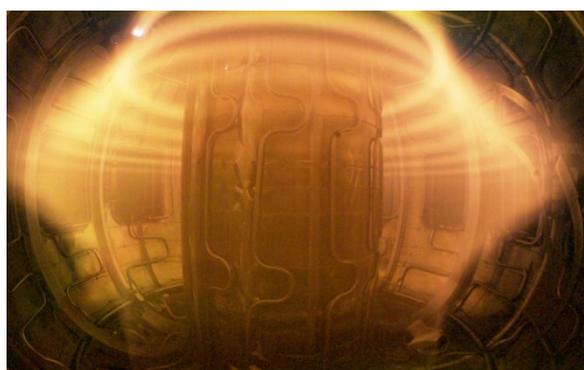
114. La tâche la plus importante de l'année écoulée a consisté à intégrer ces éléments dans un nouveau scénario de référence qui soit réaliste. Les étapes d'assemblage et d'exploitation précédemment envisagées sont désormais regroupées dans la proposition qui a été établie. Les risques techniques et opérationnels sont atténués grâce à deux mesures : d'une part, l'intégration du divertor, de blocs de blindage, d'un premier mur sacrificiel et d'autres composants de réduction des risques dans une machine plus complète avant la mise en service initiale, et d'autre part, la réalisation d'essais complets sur certaines bobines de champ toroïdal et de champ poloïdal avant leur installation. Les activités de recherche commenceront en 2034 par une période de 27 mois qui sera consacrée à de vastes recherches expérimentales sur les plasmas d'hydrogène et de deutérium-deutérium, et aboutiront, en 2036, à l'exploitation du tokamak en impulsions longues sous une intensité du champ magnétique et avec un courant plasma (15 mégaampères) au plus haut. Dans une large mesure, la phase de démarrage des activités de recherche servira à expérimenter l'intégration des systèmes nécessaires aux activités de fusion à l'échelle industrielle. La phase d'exploitation du deutérium-tritium, initialement prévue pour 2035 dans le scénario de référence précédent, est reportée de quatre ans et commencera en 2039.



*FIG. D.3. Vue aérienne du site du projet ITER en juillet 2024.  
(Source : Organisation ITER)*

115. La Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom » a mis au point un modèle préliminaire pour une technologie de réacteur tokamak. La mise en œuvre de ce projet permettra à la Russie de développer et d'appliquer les connaissances et données d'expérience acquises dans le cadre du projet ITER.

116. Le tokamak supraconducteur à haute température HH70, premier en son genre au monde, mis au point par l'entreprise chinoise Energy Singularity, a produit son premier plasma. Ce dispositif est doté d'un champ magnétique toroïdal de 0,6 tesla, d'un grand rayon de 0,75 mètre et d'un système de 26 aimants supraconducteurs à haute température. Energy Singularity prépare déjà la nouvelle génération de son tokamak supraconducteur à haute température doté d'un champ magnétique puissant, le HH170, en vue d'obtenir un gain d'énergie supérieur à 10 équivalent à celui qui serait atteint avec du combustible deutérium-tritium.



*FIG. D.4. Intérieur du tokamak HH70 mis en service en juin 2024. (Source : Energy Singularity)*

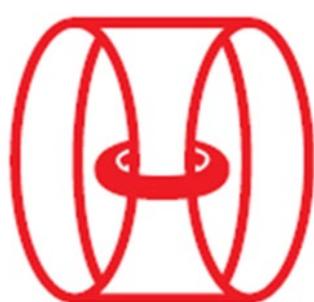
## **Tendances**

117. Aux quatre coins de la planète, les pouvoirs publics reconnaissent le potentiel de l'énergie de fusion et investissent massivement dans la recherche-développement pour stimuler le progrès. Les pays sont en train de se doter de stratégies nationales, assorties de financements substantiels, pour soutenir les initiatives tant publiques que privées, l'élaboration des premiers cadres réglementaires et la mobilisation accrue des chaînes d'approvisionnement. Ils redoublent également d'efforts en matière de collaboration en mettant en commun leurs connaissances, leurs ressources et leurs infrastructures dans le cadre d'accords qui visent à accélérer la transition vers la production commerciale d'énergie de fusion. Les synergies qui naissent de la combinaison d'avancées scientifiques et de cadres stratégiques propices

favorisent l'instauration d'un écosystème solide qui entend faire de l'énergie de fusion une réalité dans un avenir proche.



FIG. D.5. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi visite le Laboratoire de physique des plasmas de Princeton, Université de Princeton (États-Unis d'Amérique). (Source : AIEA)



Fin 2024,  
**l'industrie de  
l'énergie de fusion**  
enregistre plus de  
**8 milliards de  
dollars des États-Unis**  
d'investissements

118. L'industrie de l'énergie de fusion connaît une croissance constante des investissements d'année en année. Si la majorité des fonds (environ 70 %) étaient jusqu'ici traditionnellement investis dans des entreprises de fusion situées aux États-Unis d'Amérique, l'année 2023 a été marquée par une augmentation notable des prises de participation au capital-actions d'entreprises dans un plus grand nombre de pays. Parmi ces pays figurent notamment

l'Allemagne, le Canada, la Chine, la France, Israël, le Japon et la Suède, ce qui démontre que le développement de l'énergie de fusion suscite une vague d'intérêt et un afflux massif d'investissements à l'échelle mondiale. L'industrie de l'énergie de fusion attire désormais plus de 8 milliards de dollars des États-Unis d'investissements.

119. Les organismes de réglementation et les législateurs se penchent de plus en plus sur les difficultés et les perspectives intrinsèques à l'énergie de fusion. En juillet 2024, le Gouvernement des États-Unis a promulgué une loi appelée « ADVANCE Act », qui intègre des dispositions de la loi bipartite sur l'énergie de fusion (« Fusion Energy Act ») et vise à faciliter le développement de l'énergie de fusion à des fins commerciales en établissant un organisme de réglementation spécifique et en prévoyant des mesures d'incitation à l'investissement. Ces dispositions vont dans le sens de la décision prise précédemment par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) de dissocier la réglementation de l'énergie de fusion de celle qui régit l'énergie de fission, en réglementant les systèmes d'énergie de fusion pour le court terme en vertu du cadre applicable aux sous-produits, dont relèvent actuellement les accélérateurs de particules. En 2023, la Californie est devenue le premier État des États-Unis à reconnaître l'énergie de fusion comme étant une technologie distincte de l'énergie de fission. La NRC s'emploie actuellement à élaborer des directives en matière d'octroi d'autorisations pour les systèmes de fusion.

120. Le Gouvernement britannique a annoncé que toutes les installations d'énergie de fusion au stade de prototypes prévues au Royaume-Uni continueraient d'être réglementées par l'Agence de l'environnement et la Direction générale de la santé et de la sûreté, contrairement aux centrales nucléaires, qui tombent sous le coup de la réglementation du Bureau de la réglementation nucléaire.

121. En outre, le groupe de travail des Nations agiles sur l'énergie de fusion, composé du Canada, du Japon et du Royaume-Uni en tant que membres, ainsi que de Bahreïn et de Singapour en tant qu'observateurs, a émis des recommandations conjointes qui reconnaissent l'importante contribution que l'énergie de fusion pourrait apporter face aux défis mondiaux que représentent les changements climatiques et la sécurité énergétique, ainsi que les avantages d'une approche harmonisée adoptée par plusieurs pays pour établir une réglementation de l'énergie de fusion. Le groupe a également plaidé pour un cadre réglementaire clair, transparent et favorable à l'innovation, qui s'appliquerait aux installations d'énergie de fusion, indépendamment de la technologie de fusion utilisée, et qui énoncerait des mesures de protection appropriées pour les personnes et l'environnement en fonction des risques liés à cette énergie.

122. L'Allemagne s'engage dans une voie semblable. Une audience publique de la Commission de l'éducation, de la recherche et de l'évaluation des répercussions technologiques tenue en 2024 a mis en évidence la nécessité d'établir un cadre juridique pragmatique, propice à l'innovation et indépendant pour régir l'énergie de fusion. Ce cadre aurait pour finalité d'encourager les investissements privés et de favoriser le développement de marchés pour les technologies de la fusion. De son côté, la France considère que la fission et la fusion présentent des défis techniques et réglementaires communs et estime par conséquent qu'il conviendrait, pour progresser sur la voie de la fusion, de s'appuyer sur le cadre réglementaire et de gouvernance créé pour la fission.

123. Dans une volonté de renforcer la collaboration au sein du secteur de la fusion, l'Agence a annoncé la création du Groupe mondial pour l'énergie de fusion. Ce groupe a pour vocation de réunir des scientifiques, des ingénieurs, des décideurs, des financiers, des responsables de la réglementation et des entreprises privées en vue d'accélérer la commercialisation de l'énergie de fusion. La réunion ministérielle inaugurale du groupe, qui s'est tenue à Rome le 6 novembre 2024, a été organisée par l'Agence et le Gouvernement italien.

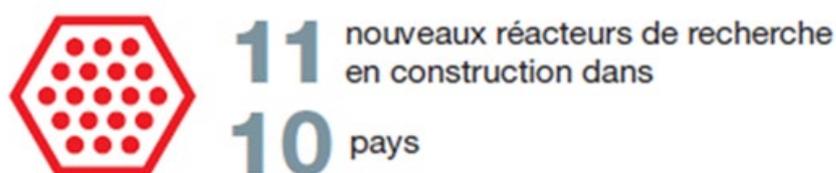


*FIG. D.6. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, en compagnie des représentants d'États Membres lors de la réunion ministérielle inaugurale du Groupe mondial pour l'énergie de fusion, organisée à Rome (Italie), le 6 novembre 2024. (Source : AIEA)*

## E. Réacteurs de recherche

### Situation

124. À la fin de 2024, 234 réacteurs de recherche, si l'on y inclut ceux mis temporairement à l'arrêt, étaient en service dans 54 pays. Ils ont continué à produire des faisceaux de neutrons, à fournir des services d'irradiation indispensables dans les domaines de la science, de la médecine et de l'industrie, et à contribuer aux programmes de formation pratique et théorique. Le tableau E-1 figurant en annexe en présente les applications les plus courantes.



125. Onze nouveaux réacteurs de recherche sont en construction dans les dix pays suivants : Arabie saoudite, Argentine, État plurinational de Bolivie, Brésil, Chine, Fédération de Russie, France, République de Corée, République islamique d'Iran et Ukraine.

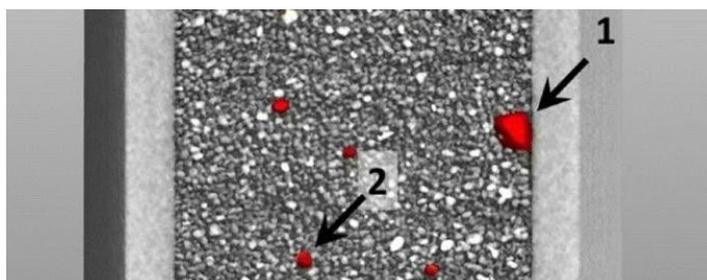


FIG. E.1. Installation du réservoir réflecteur du réacteur de recherche RA-10 au Centre atomique Ezeiza, en Argentine. [Source : Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA) (Argentine)]

126. À la fin de 2024, 13 États Membres avaient des plans de construction de nouveaux réacteurs de recherche formellement établis : l'Afrique du Sud, le Bangladesh, le Bélarus, la Belgique, la Chine, les États-Unis d'Amérique, l'Inde, le Nigéria, le Royaume des Pays-Bas, le Tadjikistan, la Thaïlande, le Viet Nam et la Zambie. Un nombre non négligeable de pays envisagent également de construire des réacteurs de recherche : l'Azerbaïdjan, l'Éthiopie, l'Iraq, le Kenya, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Niger, l'Ouganda, la République-Unie de Tanzanie, le Royaume-Uni, le Rwanda, le Sénégal, le Soudan, la Tunisie et la Türkiye.

127. Les initiatives internationales visant à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur civil se sont poursuivies. Tous les grands producteurs mondiaux de molybdène 99 (le radio-isotope médical le plus demandé) ont cessé d'utiliser des cibles à l'UHE. À ce jour, 109 réacteurs de recherche et installations de production d'isotopes à usage médical qui utilisaient de l'UHE l'ont remplacé par de l'UFE, ou leur mise à l'arrêt a été confirmée, et 6 934 kilogrammes d'UHE ont été réexpédiés dans leur pays d'origine ou évacués d'une autre manière de 48 pays [et de Taïwan (Chine)].

128. La production mondiale de plastiques et leur mise au rebut de manière inappropriée ont engendré des quantités massives de microplastiques et de nanoplastiques, qui sont aujourd’hui des polluants omniprésents dans l’air, l’eau et les sols et qui constituent une menace pour les écosystèmes naturels et la santé humaine. Ils sont issus de la fragmentation de divers produits, ce qui a une incidence sur leur morphologie, leur dynamique interne et la façon dont ils réagissent aux stimuli externes. Du fait de leur sensibilité aux éléments légers, les neutrons peuvent servir de sonde dans le cadre de la recherche sur la pollution par le plastique. L’imagerie neutronique permet non seulement d’identifier les microplastiques, mais fournit également des informations précieuses sur leur forme, leur taille et leur répartition dans les sédiments ou le sol. La diffusion de neutrons aux petits angles (DNPA) est une technique non destructive efficace d’étude de la structure des matériaux à l’échelle mésoscopique (échelle de grandeur s’étendant à quelques nanomètres seulement). De plus, grâce à sa résolution temporelle, elle permet d’étudier, in situ et en temps réel, l’évolution de la structure tant au cours de la synthèse que de la désintégration des nanoparticules polymères, lesquelles sembleraient pouvoir pénétrer dans les cellules humaines. À cet égard, les neutrons froids, thermiques et épithermiques sont idéals pour sonder les cellules vivantes et étudier les modifications des propriétés des membranes causées notamment par les polymères, les nanoparticules et les nanoplastiques. La [carte interactive des instruments à faisceaux de neutrons](#) de l’Agence recense 55 installations d’imagerie neutronique dans 35 États Membres et 372 instruments de diffusion neutronique dans 26 États Membres utilisant des réacteurs de recherche ou des accélérateurs comme sources de neutrons, qui fournissent l’infrastructure et la capacité nécessaires à une approche globale prometteuse propre à assurer une gestion circulaire et durable des plastiques.



*FIG. E.2. Image tridimensionnelle obtenue en combinant la tomographie neutronique et la tomographie à rayons X. Le sous-volume qui contient une particule de plastique est associé au chiffre « 1 ». [Source : Journal of Soils and Sediments vol. 21, p. 1476 (2021)<sup>1</sup>]*

---

<sup>1</sup> TÖTZKE, C., OSWALD, S.E., HILGER, A. *et al.* Non-invasive detection and localization of microplastic particles in a sandy sediment by complementary neutron and X-ray tomography. J Soils Sediments 21, 1476–1487 (2021). Disponible (en anglais) à l’adresse suivante : <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02882-6>.

## Tendances

129. Le parc mondial de réacteurs de recherche est de plus en plus vieillissant : à la fin de 2024, 71 % d'entre eux étaient en service depuis plus de 40 ans, 51 % l'étaient depuis plus de 50 ans et 28 % depuis plus de 60 ans. Nombre de réacteurs de recherche, notamment des réacteurs de forte puissance, démontrent un fonctionnement sûr et une utilisation efficace même au-delà de 60 ans de service. Il s'agit de sources importantes de production de radio-isotopes pour la médecine et l'industrie, d'installations de base

pour tester de nouveaux combustibles et matériaux nucléaires et de sources intenses de neutrons pour la recherche avancée sur les faisceaux de neutrons. On peut ainsi notamment citer le réacteur LVR-15 en République tchèque, le réacteur de recherche de Budapest en Hongrie, le réacteur belge 2, le réacteur SM-3 en Fédération de Russie, le réacteur à haut flux au Royaume des Pays-Bas et le réacteur CABRI en France. Les programmes périodiques de gestion du vieillissement, de remise en état et de modernisation mis en œuvre dans les installations ont permis de continuer à en assurer la sûreté d'utilisation. De vastes campagnes de modernisation sont également menées au réacteur MARIA en Pologne et au réacteur RECH-1 au Chili, qui ont tous deux fêté leurs 50 ans de service en 2024.



Le vieillissement du parc mondial de réacteurs de recherche se poursuit :

à la fin de 2024, la part des réacteurs en service

depuis plus de 40 ans	depuis plus de 50 ans	depuis plus de 60 ans
<b>71 %</b>	<b>51 %</b>	<b>28 %</b>

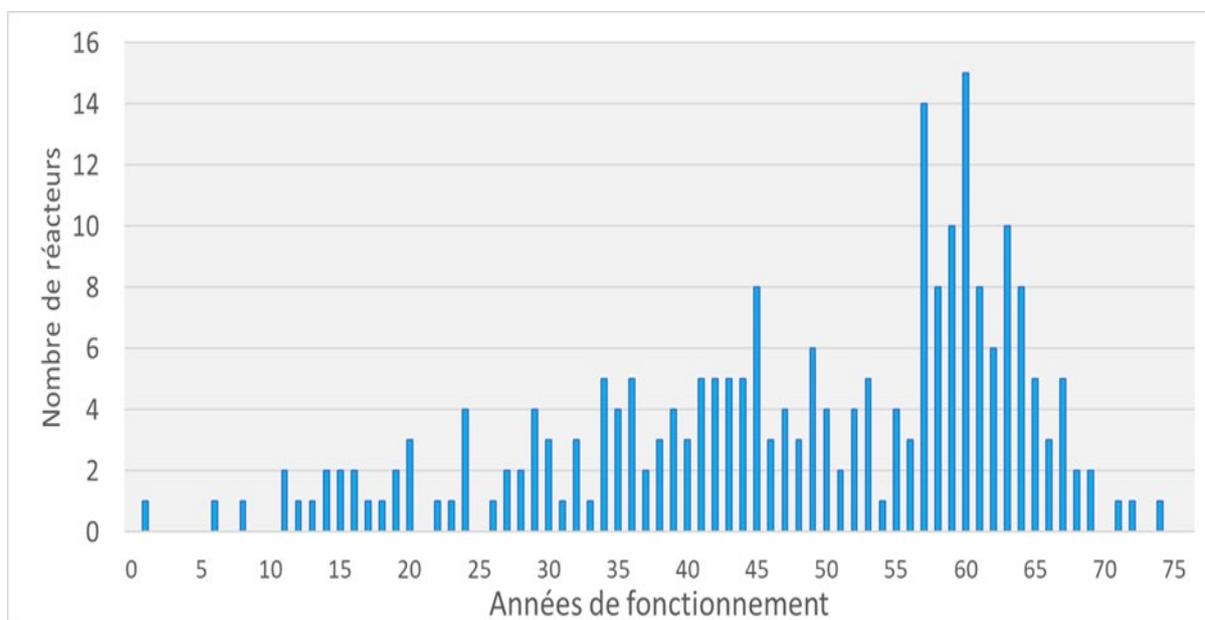


FIG. E.3. Répartition par âge des réacteurs de recherche en service, novembre 2024.  
(Source : Base de données de l'AIEA sur les réacteurs de recherche)



*FIG. E.4. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, à l'Institut de physique nucléaire de Tachkent en décembre 2024. (Source : Institut de physique nucléaire, Tachkent)*

130. L'intérêt croissant que suscite le nucléaire au niveau mondial a entraîné une augmentation de la demande de formation théorique et pratique dans ce domaine en réacteurs de recherche. Parallèlement aux programmes nationaux et aux mécanismes de renforcement des capacités facilités par l'Agence, tels que les écoles sur les réacteurs de recherche, les réacteurs-laboratoires par Internet et les centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche, plusieurs réacteurs de recherche d'universités en Europe et aux États-Unis d'Amérique ouvrent de plus en plus les formations pratiques qu'ils proposent à des participants internationaux.

131. Le dopage du silicium par transmutation neutronique est une technique importante utilisée dans la fabrication de semi-conducteurs en silicium de haute qualité. Mise au point dans les années 1970, elle consiste à exposer des lingots de silicium à un flux contrôlé de neutrons dans des réacteurs de recherche (voir FIG. E.5). Le nombre de grands producteurs mondiaux est limité, car seules quelques installations très performantes sont capables de fournir les services d'irradiation nécessaires et de contribuer à la chaîne d'approvisionnement à une échelle industrielle.



*FIG. E.5. Lingots de silicium – l'un des produits d'irradiation issus du réacteur de recherche OPAL en Australie – de différentes tailles. (Source : Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires)*

132. La hausse sensible de la demande de composants électroniques de forte puissance, qui nécessitent de faire appel au dopage du silicium par transmutation neutronique pour leur fabrication, est stimulée par l'essor de l'infrastructure des réseaux électriques, de l'automatisation industrielle, de l'éolien, des trains à grande vitesse et de l'industrie automobile, entre autres choses. Ces secteurs tablent sur l'utilisation de matériaux efficaces et très performants, ce qui fait du dopage du silicium par transmutation neutronique une ressource essentielle. De ce fait, il importe à l'avenir de veiller à la constante disponibilité de cette technique afin d'étayer les technologies à même de réduire les émissions de carbone, ce qui contribuera à atteindre les objectifs de neutralité carbone et à lutter contre les changements climatiques.

## F. Accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire

### F.1. Accélérateurs de particules

#### Situation

133. L'implantation ionique est un procédé physique qui permet de modifier les propriétés de matériaux présentant un grand intérêt technologique. Elle consiste à accélérer des particules subatomiques chargées (ions) au moyen de dispositifs sophistiqués appelés « implanteurs » avant de les projeter sur la surface de matériaux (voir FIG. F.1) ayant des propriétés physicochimiques spécifiques. Il s'agit à proprement parler d'une technique nucléaire reposant sur les accélérateurs de particules.



*FIG. F.1. Faisceau d'ions focalisé produit par un accélérateur en mode implantation ionique.  
(Source : Adobe Stock)*

134. Les applications de l'implantation ionique sont multiples et concernent presque tous les domaines des technologies modernes – de la production de semi-conducteurs à des fins industrielles (microprocesseurs, par exemple) à la modification de matériaux utilisés dans l'aéronautique. La demande d'implanteurs permettant de fabriquer des composants de télescopes ou de capteurs d'images spécialisés ne cesse de croître. Des recherches pionnières, comme celles portant sur l'érosion des grains planétaires, tirent également parti de cette technique avancée. D'après des études de viabilité financière, l'exploitation d'une installation d'implantation ionique peut être une activité très lucrative, notamment en raison de l'empreinte relativement faible de l'infrastructure nécessaire, ce qui permet des coûts de fonctionnement réduits par rapport à d'autres installations industrielles faisant appel à des accélérateurs. L'étendue des perspectives d'innovation et de développement socio-économique qu'offrent les installations d'implantation ionique est à la fois unique et incontestable. La baisse progressive des coûts associés à la mise en place de telles installations signifie qu'à l'avenir, des pays moins avancés pourraient tirer parti des nombreuses applications de l'implantation ionique.

#### Tendances

135. Plusieurs projets internationaux visent à établir une présence humaine permanente sur la Lune et à se rendre sur Mars et au-delà dans les prochaines décennies. Au cours de ces missions dans l'espace lointain, les astronautes seront exposés à des particules de haute énergie issues des rayons cosmiques galactiques et des particules énergétiques solaires, comme le montre la figure F.2. Les particules énergétiques peuvent être dangereuses pour l'être humain, car elles traversent la peau en déposant de l'énergie et en endommageant les cellules ou l'ADN au passage. En outre, le rayonnement cosmique peut altérer le fonctionnement des appareils et systèmes électroniques sous les effets de particules isolées dus aux ions lourds qui caractérisent généralement les rayons cosmiques et aux protons de haute énergie. Il importe donc de bien comprendre l'origine et la fréquence de ces effets pour réduire le risque de défaillance des composants et mettre au point des systèmes électroniques fiables.

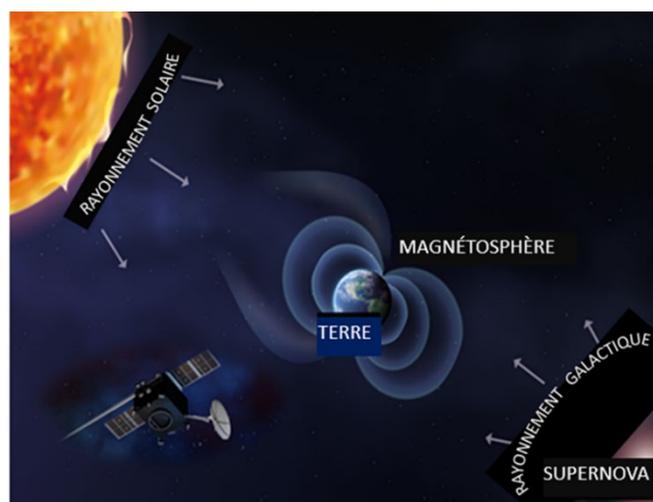


FIG. F.2. Le rayonnement cosmique peut présenter des risques importants pour les astronautes et les engins spatiaux.

(Source : Adaptée de [Rayonnement cosmique : pourquoi nous ne devrions pas nous inquiéter | AIEA](#))

136. Il est possible d'accélérer des protons et des ions lourds dans un accélérateur de faisceaux d'ions au point d'atteindre des énergies élevées qui, à des niveaux déterminés, vont provoquer un endommagement par irradiation (voir FIG. F.3), simulant de la sorte les effets d'une radioexposition dans l'espace. La dose de rayonnement émise en quelques minutes par les accélérateurs de particules est équivalente à celle reçue sur plusieurs années dans l'espace. Cette capacité d'irradiation et d'essai revêt donc une grande importance pour la planification de missions dans l'espace lointain puisqu'elle permet d'étudier les effets radiobiologiques, le durcissement par irradiation des appareils électroniques et les matériaux de protection.

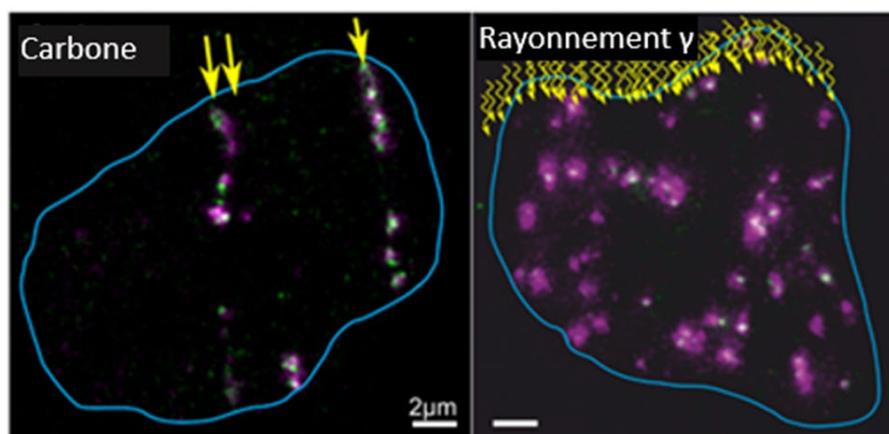


FIG. F.3. Lésions de l'ADN – visualisées grâce aux protéines de réparation (en magenta et en vert) – induites par trois ions carbone dans le noyau (ligne bleue) d'une cellule humaine qui a été irradiée à l'aide de l'accélérateur tandem du Laboratoire Maier-Leibnitz à Garching (Allemagne). Les lésions induites par les ions carbone, une composante du rayonnement cosmique, sont concentrées le long de la trajectoire du rayon. Les lésions graves, complexes et localisées de l'ADN entraînent un risque plus élevé de dommages cellulaires – tels que des altérations génétiques pouvant provoquer un cancer ou la mort cellulaire – que le rayonnement terrestre. Aux fins de comparaison, le noyau (ligne bleue) d'une cellule ayant reçu la même dose de rayons gamma est également représenté. On peut voir ici que les dommages sont répartis de manière homogène, ce qui permet à la cellule de se réparer plus facilement. [Source : Judith Reindl, Université de la Bundeswehr à Munich (Allemagne)]

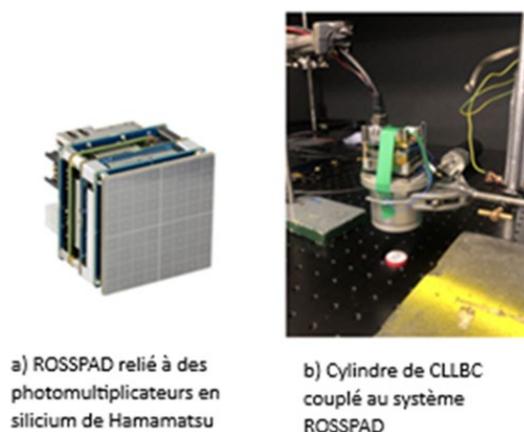
137. La science des accélérateurs de faisceaux d'ions apporte sa pierre à l'exploration spatiale à plusieurs égards : dosimétrie dans un environnement mixte de rayonnements, protection destinée à atténuer la radioexposition, durcissement des appareils électroniques et amélioration des connaissances des effets biologiques du rayonnement cosmique. Les résultats de ces travaux de recherche contribuent également à améliorer le traitement du cancer et à mettre au point des systèmes électroniques plus performants et plus fiables pour une utilisation dans des environnements caractérisés par un rayonnement très élevé. Entre autres activités, l'Agence s'emploie à mettre en œuvre les applications de la science des accélérateurs en radiobiologie et aux fins de la mise au point de détecteurs grâce à un PRC intitulé « Imagerie et irradiation subcellulaires à l'aide de techniques fondées sur les accélérateurs ».

## **F.2. Instrumentation nucléaire**

### **Situation**

138. Les progrès récents de la technologie des détecteurs de neutrons et de rayons gamma ont permis de mettre au point des systèmes compacts, écoénergétiques et à double fonction, qui sont indispensables à l'exploration spatiale. Ces détecteurs aident à dresser une carte de l'hydrogène et à réaliser l'analyse des éléments de corps célestes, tels que la Lune et Mars. Grâce à l'analyse des neutrons rapides et des émissions de rayons gamma issus des interactions de rayons cosmiques, les scientifiques sont capables de détecter la présence d'eau et d'éléments rares. Plus particulièrement, de nouveaux matériaux scintillateurs, comme le chlorure de césium-lanthane-lithium-brome (CLLBC), améliorent la sensibilité et la résolution en énergie dans des conditions extrêmes. Ces innovations facilitent la mise au point de modèles légers et multifonctionnels qui non seulement améliorent l'efficacité des charges utiles destinées aux missions de planétologie, mais permettent aussi de les simplifier. La figure F.4 montre un modèle préliminaire de module détecteur basé sur un cristal scintillateur, un ensemble de photomultiplicateurs en silicium et le module de lecture ROSSPAD. D'après une étude récente, le CLLBC couplé au système ROSSPAD est plus performant que d'autres scintillateurs utilisés pour la détection des rayons gamma et des neutrons.

139. En outre, l'incorporation de circuits intégrés à application spécifique (CIAS) de qualité spatiale et à canaux multiples dans ces systèmes de détection double des neutrons et des rayons gamma contribue à obtenir une meilleure réduction du bruit, à augmenter les vitesses de traitement des données et à prolonger les durées de vie en fonctionnement dans des conditions spatiales extrêmes. Utilisée dans des produits d'entreprises de technologie spatiale de premier plan, cette technologie offre des solutions compactes et très performantes qui améliorent l'acquisition et la fiabilité des données, ce qui simplifie les missions spatiales de longue durée et réduit la fréquence des activités de maintenance ou des remplacements à effectuer. La synergie des matériaux scintillateurs hybrides et des CIAS avancés de qualité spatiale illustre bien que l'on se tourne de plus en plus vers des systèmes de détection multifonctionnels et durables dans le domaine de l'exploration spatiale. Ces avancées permettent d'analyser la composition des planètes de manière détaillée et en temps réel, à l'appui des missions dédiées à la détection de ressources en eau et à la collecte d'autres données sur les corps élémentaires qui sont essentielles aux futures initiatives en matière d'exploration de la Lune et des planètes.



*FIG. F.4. Détecteur compact à scintillation de rayons gamma et de neutrons destiné à des applications terrestres et spatiales (système ROSSPAD) et dispositif expérimental utilisé à des fins d'essais. [Source : Département des systèmes technologiques, Université d'Oslo (Norvège)]*

## Tendances

140. Dans le domaine de la radiologie et de la sécurité nucléaire, diverses applications nécessitent de pouvoir identifier rapidement et de manière fiable les radionucléides présents dans des échantillons ou des matrices inconnus. Bien que l'analyse des spectres de rayons gamma ne présente pas de difficultés particulières, dans la pratique, il s'avère difficile de développer des algorithmes dédiés de reconstruction pouvant être utilisés par différents types de détecteurs lorsque l'on ignore a priori la nature des radionucléides présents, leur configuration interne ou le niveau de protection. Les difficultés proviennent notamment du fait que les applications sur le terrain utilisent souvent des systèmes de détection à faible résolution, que certains radionucléides sont parfois à la limite du seuil de détection, qu'un échantillon peut contenir des sources aussi bien de haute que de faible intensité et que la protection, qui est souvent inconnue, affecte le rapport d'intensité concernant les radionucléides qui émettent plusieurs rayons gamma d'activité significative. L'évolution rapide de diverses méthodes d'apprentissage automatique fait que, depuis peu, on recourt à ces dernières lorsqu'il s'agit d'identifier des radio-isotopes au moyen de la spectrométrie gamma. Grâce à leurs capacités supérieures de reconnaissance de formes, les réseaux de neurones artificiels sont particulièrement bien adaptés à l'analyse de données complexes. Plusieurs études connexes aux résultats prometteurs ont été réalisées dans différents États Membres. Cela étant, des travaux de recherche menés plus récemment par des scientifiques portugais en collaboration avec le Laboratoire des sciences et de l'instrumentation nucléaires de l'Agence ont permis d'obtenir de meilleurs résultats que les logiciels automatisés de spectrométrie gamma classiques utilisés pour l'analyse spectrale et la détermination des radionucléides. Pour que les applications industrielles de ces méthodes puissent être utilisées régulièrement, il conviendra d'abord de mettre en place des processus de qualification et de s'assurer que ces applications sont bien acceptées.

## **G. Données atomiques et nucléaires**

### **Situation**

141. Dans le cadre des recherches sur la fusion, il importe de disposer d'une base de données complète sur les mécanismes de collision dans le plasma, notamment les sections efficaces et les coefficients cinétiques relatifs aux collisions entre les électrons, les photons et les particules lourdes, pour pouvoir réaliser une modélisation et une simulation rigoureuses en vue de la conception d'une centrale à fusion. L'Agence fournit et conserve des données scientifiques qui sont essentielles dans le cadre des processus de modélisation de centrales à fusion, comme le montre la figure G.1. Au cours de l'année écoulée, les pages web de l'Agence consacrées aux données sur la fusion ont été consultées par des visiteurs de 163 États Membres, la plupart d'entre eux se trouvant en Chine, aux États-Unis d'Amérique ou en Inde. Les données fournies servent à des simulations des combustibles de fusion à l'état de plasma et à des modélisations des interactions importantes entre ce dernier et les composants de la paroi du réacteur.

142. ITER, en phase de construction, est un « méga-utilisateur » des données de fusion. Depuis plusieurs années, ITER et ceux qui collaborent à ce projet se servent des bibliothèques de données de l'Agence sur les neutrons de fusion. Plus récemment, ITER s'est aussi beaucoup intéressé aux bases de données de l'Agence sur les collisions dans le plasma et les interactions plasma-paroi. Compte tenu de l'interaction directe entre l'Agence et ITER, la base de données sur les processus de collision dans le plasma a été intégrée dans une interface publique de programmation d'application, laquelle permet d'effectuer des téléchargements sélectifs en masse ou un téléchargement en bloc de l'ensemble de la base de données. Il est prévu que la base de données sur les processus d'interaction plasma-paroi soit dotée de fonctionnalités similaires pour que les données de l'Agence sur la fusion soient autant que faire se peut publiquement accessibles.

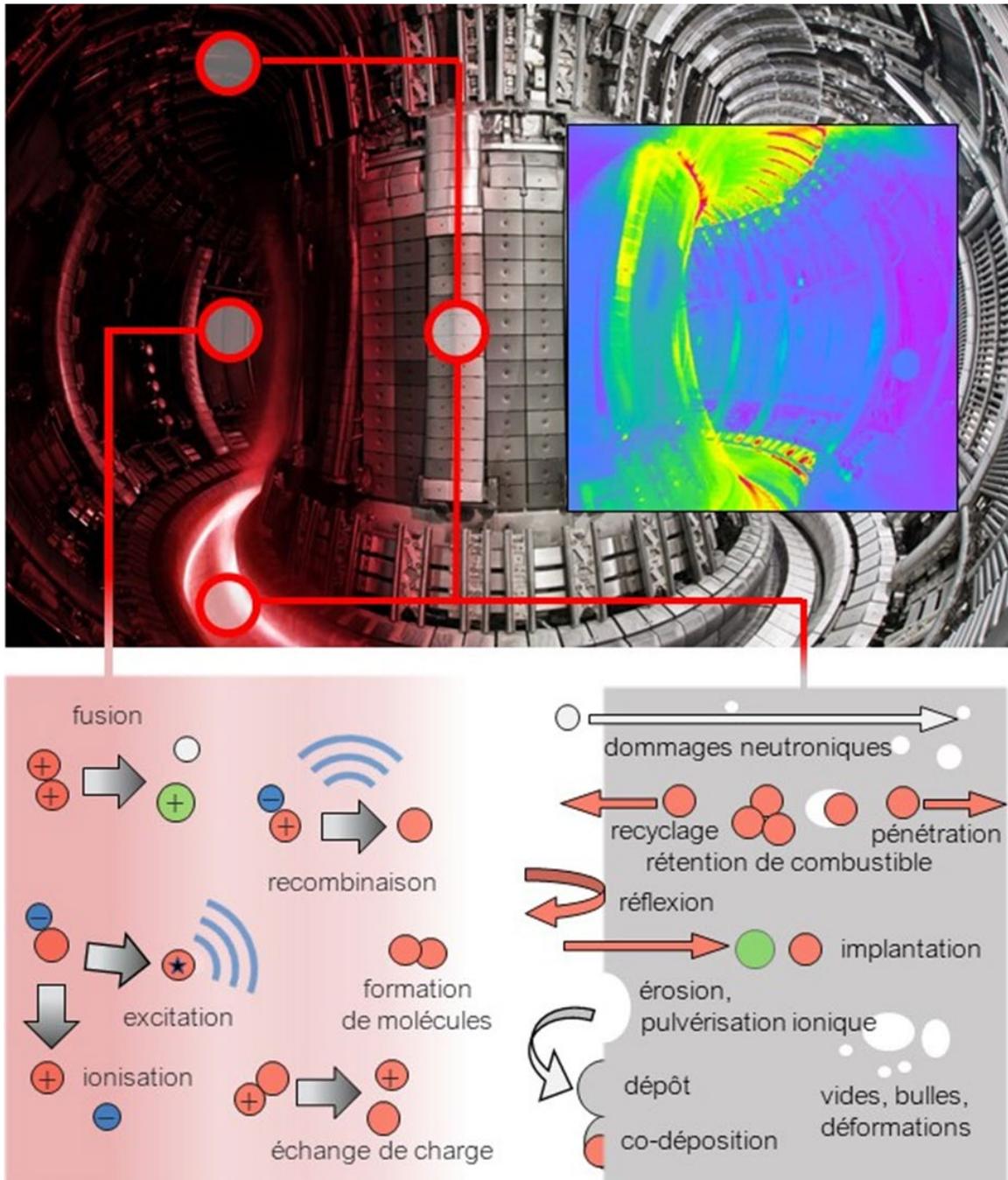


FIG. G.1. Image du haut : Intérieur du JET avec image superposée de plasma. L'encadré inséré montre l'empreinte thermique des composants de la paroi. (Source : EUROfusion)  
Image du bas : (à gauche) Réactions de fusion dans le cœur du plasma et autres processus intervenant dans le plasma, selon la température et la densité du combustible. Des espèces moléculaires peuvent se former près de la paroi du réacteur, où le plasma est plus froid ; (au centre) des interactions plasma-surface ont lieu au niveau de la première paroi du réacteur ; (à droite) des particules énergétiques du plasma, telles que les neutrons et les ions, peuvent pénétrer profondément dans les composants du réacteur, entraînant des dommages importants aux matériaux. (Source : AIEA)

## **Tendances**

143. Conformément à la tendance générale observée en science des données, les données nucléaires et atomiques dont la science et la technologie nucléaires ont besoin sont de plus en plus traitées par des interfaces de programmation d'application qui autorisent un accès programmatique aux données en vue d'une application directe dans des logiciels tels que les algorithmes d'apprentissage automatique. À ces interfaces s'ajoutent les interfaces graphiques qui ont été utilisées au cours des dernières décennies et qui continueront de l'être. Les interfaces de programmation d'application les plus avancées dans ce domaine sont celles qui servent à traiter les données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux, ainsi que les données relatives aux collisions d'atomes à l'intérieur du plasma de fusion. L'Agence suit la tendance et revoit ses anciennes bases de données nucléaires les plus importantes, comme les bibliothèques de données EXFOR et ENDF, en les mettant à disposition dans un format unifié aux fins d'un traitement automatisé par les utilisateurs.

## **H. L'intelligence artificielle au service de l'électronucléaire et du cycle du combustible nucléaire**

### **Situation**

144. Les techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle (IA) sont de plus en plus utilisées dans l'industrie nucléaire pour améliorer la qualité et l'efficacité. Dans le cadre du processus de fabrication de l'assemblage combustible de l'entreprise ENUSA (Espagne), une inspection visuelle de la surface des pastilles d' $UO_2$  à la fin du processus de production des céramiques permet de s'assurer qu'elles répondent aux exigences de qualité. Une image de la surface latérale, obtenue à l'aide d'une caméra, est automatiquement analysée par un logiciel. Cette méthode est plus fiable qu'une inspection visuelle, car elle élimine toute variation due à des facteurs humains, comme la subjectivité ou la fatigue. En Fédération de Russie, l'aspect des pastilles de combustibles est contrôlé automatiquement dans les usines de fabrication de la société de combustible TVEL. L'entreprise de concentrés chimiques de Novosibirsk a mis au point et intégré dans sa ligne de production un certain nombre de systèmes de contrôle de la qualité des composants de l'assemblage combustible.

145. Aux États-Unis d'Amérique, l'Institut de recherche sur l'énergie électrique étudie actuellement la possibilité d'utiliser l'IA pour analyser des photographies de conteneurs d'entreposage de combustible usé chargés prises lors d'inspections à distance en vue d'assurer l'uniformité et d'éliminer les facteurs humains au cours de l'évaluation des éventuelles constatations (décolorations, rayures ou piqûres, par exemple).

### **Tendances**

146. En 2024, l'IA a continué d'être mise à contribution au cours de la conception et de l'exploitation des réacteurs nucléaires commerciaux et des installations du cycle du combustible nucléaire. Ses applications sont susceptibles d'améliorer la sûreté, ainsi que l'efficacité et la rentabilité des opérations tout en facilitant la mise au point de technologies nucléaires avancées. L'introduction de systèmes fondés sur l'IA survient dans le contexte d'autres tendances, comme le recours accru à la numérisation et l'adoption de systèmes robotisés et de drones dans les centrales nucléaires en exploitation. Dans l'industrie manufacturière de pointe, le recours à l'IA permet d'accroître l'efficacité, la souplesse et la personnalisation des processus de production tout en réduisant les coûts et en améliorant la qualité. Ces progrès contribuent à la viabilité et à la compétitivité du nucléaire dans le contexte énergétique moderne.

147. L'IA concourt de diverses manières à améliorer les performances, la fiabilité, la sécurité, la sûreté, l'efficacité et la rentabilité dans le secteur nucléaire. Le concept de centrale intelligente, qui fait appel à des technologies numériques avancées et à des applications de l'IA dans toute une série de processus d'exploitation et de maintenance des centrales nucléaires afin de renforcer l'efficacité et la fiabilité, se répand en Chine, en République de Corée et dans d'autres pays. En outre, des systèmes fondés sur l'IA sont utilisés dans le cadre de projets de nouvelles centrales nucléaires en Chine pour faciliter la gestion et la supervision de ces derniers.

148. L'IA est mise à contribution aux fins de l'optimisation de modèles de cœurs de réacteurs. Elle permet de perfectionner les méthodes de chargement en combustible et de prolonger la durée de la charge de combustible, ce qui pourrait se traduire par une hausse de la production d'électricité et une forte réduction de la production de déchets et des coûts d'exploitation. En outre, par ses simulations de processus physiques complexes, elle contribue de plus en plus à la conception de réacteurs nucléaires et d'installations du cycle du combustible avancés. Elle permettrait ainsi d'améliorer les modèles tout en raccourcissant la période de conception. L'élaboration et le déploiement de solutions faisant appel à l'IA dans les centrales nucléaires commerciales et les installations du cycle du combustible devraient continuer de s'accélérer à mesure que l'on gagnera en expérience et que les incertitudes seront levées. L'utilisation de l'IA dans l'industrie nucléaire ne suppose pas une exclusion de l'humain. Il s'agit plutôt de simplifier et d'optimiser le travail humain, pour réduire l'influence du facteur humain sur les résultats. Les décisions finales reviendraient toujours à l'humain, qui tiendra compte des résultats obtenus à l'aide de l'IA.

## I. Santé humaine



*FIG. I.1. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et le Président du Fonds OPEP pour le développement international, S. E. M. Abdulhamid Alkhalifa, lors de leur visite au Laboratoire de dosimétrie de l'AIEA, en compagnie de M<sup>me</sup> Najat Mokhtar, Directrice générale adjointe du Département des sciences et des applications nucléaires. (Source : AIEA)*

## I.1. Des méthodes novatrices pour une radiothérapie plus efficace

### Situation

149. Le cancer reste l'une des principales causes de mortalité dans le monde : en 2022, 9,74 millions de personnes en sont mortes et 19,98 millions de nouveaux cas ont été déclarés. Près de la moitié des patients qui en sont atteints ont besoin d'une radiothérapie à un moment ou à un autre, mais l'accès à ce traitement vital est limité.

150. Pour remédier à cette situation, l'Agence a dirigé une commission du Lancet Oncology sur la radiothérapie et la théranostique, composée d'experts de premier plan issus de 44 établissements universitaires et centres médicaux de 23 pays différents qui étaient chargés d'examiner la disponibilité des services de radiothérapie. Les commissions du Lancet Oncology non seulement traitent les questions les plus urgentes concernant la prise en charge en cancérologie, mais formulent également des recommandations visant à modifier les politiques et les pratiques.

151. La Commission a constaté que les inégalités en matière de disponibilité des équipements constituaient toujours un problème, les pays à faible revenu ayant besoin en moyenne de plus de huit fois plus d'appareils que ce dont ils disposent actuellement pour atteindre l'objectif d'un appareil pour 500 patients. Ainsi, dans ces pays, le ratio est d'un appareil de téléthérapie pour plus de 15,6 millions de personnes, alors que dans ceux à revenu élevé, il est de un pour 130 000. S'agissant des ressources humaines, elles devraient augmenter de plus de 60 % par rapport à 2022 pour faire face à la charge que devraient constituer les 35,3 millions de nouveaux cas et les 18,5 millions de décès dans le monde anticipés en 2050.

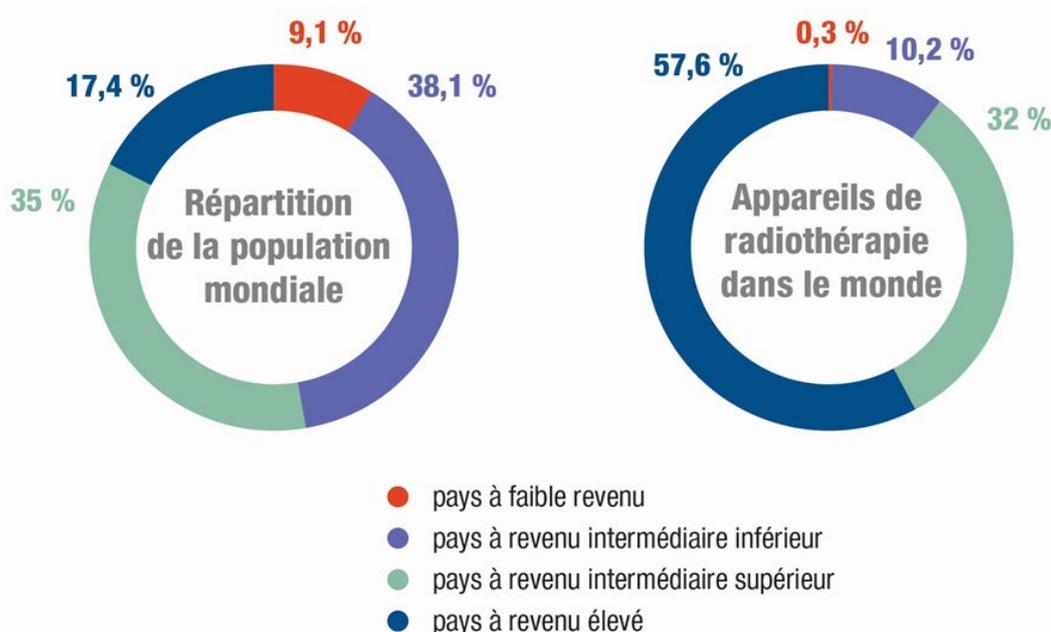


FIG. I.2. Accès à la radiothérapie pour les patients atteints d'un cancer. (Illustration : AIEA)

152. En sus des radiothérapies classiques, au vu de l'évolution rapide et récente des traitements radiopharmaceutiques, la Commission se penche aussi sur la question de l'accès à la théranostique, qui combine des applications thérapeutiques et diagnostiques. Comme en radiothérapie classique, la théranostique requiert d'avoir des connaissances sur les principes régissant l'application des rayonnements et en radiobiologie et un savoir-faire en techniques d'imagerie et d'utilisation des radiopharmaceutiques. Malgré les perspectives de transformation qu'elle ouvre, la Commission a constaté que les questions d'approvisionnement, de ressources humaines et de réglementation ont toutes

une incidence négative sur l'application des traitements radiopharmaceutiques. L'iode 131, qui sert habituellement à soigner l'hyperthyroïdie et le cancer de la thyroïde, fait exception en ayant été le radionucléide le plus utilisé au monde.

## Tendances

153. Pour améliorer l'accès aux traitements anticancéreux qui sauvent des vies, la Commission du Lancet Oncology dirigée par l'Agence étudie des initiatives correctives comme celles qui visent à optimiser les flux de travail, à économiser les ressources et à utiliser des techniques de pointe. Ainsi, le recours à la méthode de l'hypofractionnement – administrer quotidiennement des doses de rayonnement moins nombreuses mais plus élevées sur une période de traitement plus courte – peut permettre de soigner en plus 800 000 patients atteints du cancer de la prostate et 1,4 million de personnes atteintes du cancer du sein avec les ressources existantes. Le remplacement d'une radiothérapie classique à hauteur de 50 % par une radiothérapie hypofractionnée peut entraîner des économies de 1,28 milliard de dollars des États-Unis et de 1,48 milliard de dollars des États-Unis, respectivement.

154. L'investissement dans des traitements avancés, tels que la radiothérapie stéréotaxique corps entier (RSCE) – forme de thérapie hypofractionnée qui consiste à administrer des doses précises et élevées mais qui exige d'avoir investi en amont dans du matériel de pointe – peut aussi permettre de faire des économies à long terme, même dans les pays à revenu faible ou intermédiaire. Grâce à une modélisation économique de la santé, la Commission a démontré que tel était le cas en Mongolie en ce qui concerne le cancer du poumon. De même, d'après une modélisation du traitement théranostique du cancer de la prostate ([au <sup>177</sup>Lu]PSMA), les retombées sociales se chiffraient au total à 725 millions de dollars sur sept ans dans neuf pays représentatifs d'économies à revenu élevé, à revenu intermédiaire supérieur et à revenu intermédiaire inférieur.

155. L'initiative Rayons d'espoir de l'AIEA aide les États Membres à élargir l'accès à la radiothérapie. En décembre 2024, l'Agence avait créé au total 11 centres d'excellence (centres de renforcement des connaissances et des capacités qui permettent une collaboration et une coopération en matière de cancérothérapie dans les domaines de la formation théorique et pratique, de l'assurance de la qualité, de l'innovation et de la recherche).

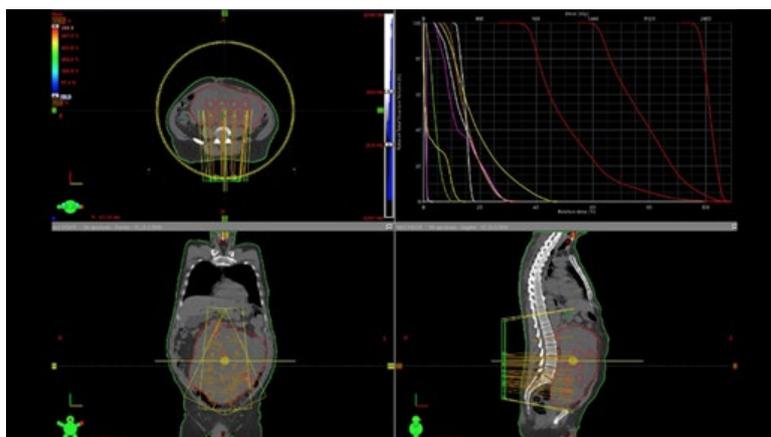
156. L'Agence mène également des recherches sur la radiothérapie fractionnée dans l'espace, technique innovante qui consiste à traiter les tumeurs volumineuses et radiorésistantes en administrant des doses de rayonnement non uniformes dans les volumes tumoraux. Il est ainsi possible d'augmenter la dose en toute sûreté afin de mieux contrôler la tumeur et d'améliorer la qualité de vie des patients en soulageant la douleur. Cette technique englobe i) la radiothérapie par grille qui consiste à administrer parallèlement des doses élevées et faibles par application de grilles physiques ou virtuelles, de manière à stimuler la réponse immunitaire et à favoriser la régression de la tumeur ; ii) la radiothérapie en réseau, une radiothérapie à modulation d'intensité volumétrique basée sur les photons (VMAT) qui traite de manière efficace et sûre les tumeurs profondes et volumineuses ; et iii) la radiothérapie stéréotaxique corps entier (RSCE)-PATHY qui, grâce à la précédente, tire avantage des effets non ciblés de la radiothérapie, y compris de l'effet de voisinage et de l'effet abscopal.



*FIG. I.3. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi et la Présidente de l'Institut coréen des sciences radiologiques et médicales (KIRAMS), Jin Kyung Lee, lors de la cérémonie de signature relative au centre d'excellence Rayons d'espoir. (Photo : KIRAMS)*

157. Bien que la radiothérapie fractionnée dans l'espace se révèle prometteuse pour le traitement de tumeurs volumineuses comme les sarcomes, le cancer du poumon et les cancers de la tête et du cou, il faut procéder à d'autres essais cliniques pour en définir le rôle dans un contexte clinique. Pour qu'elle soit validée, il est essentiel de parvenir à un consensus sur la prescription des doses et l'administration technique.

158. Un projet de recherche coordonnée entrepris par l'Agence en avril 2020 vise à évaluer dans quelle mesure la radiothérapie fractionnée dans l'espace est efficace pour améliorer les résultats cliniques en présence d'un cancer du col de l'utérus ou d'un cancer du poumon à un stade avancé, dans les pays à revenu faible et intermédiaire. Quinze États Membres de cinq régions géographiques y participent à cette fin.



*FIG. I.4. Tumeur métastatique abdomino-pelvienne volumineuse traitée par radiothérapie en réseau. Les sphères rouges représentent les doses de rayonnement élevées qui tuent directement les cellules tumorales, tandis que les zones adjacentes reçoivent des doses plus faibles, déclenchant une réponse immunitaire antitumorale qui favorise la destruction de la tumeur. [Photo : D' Rolando Loria, Service de radiothérapie de l'hôpital México à San José (Costa Rica) ; reproduite avec l'aimable autorisation de Naipy Perez, Innovative Cancer Institute, Miami (États-Unis)]*

## **J. Alimentation et agriculture**

### **J.1. Améliorer l'élaboration des normes de sécurité sanitaire des aliments grâce au radiomarquage innovant de médicaments vétérinaires**

#### **Situation**

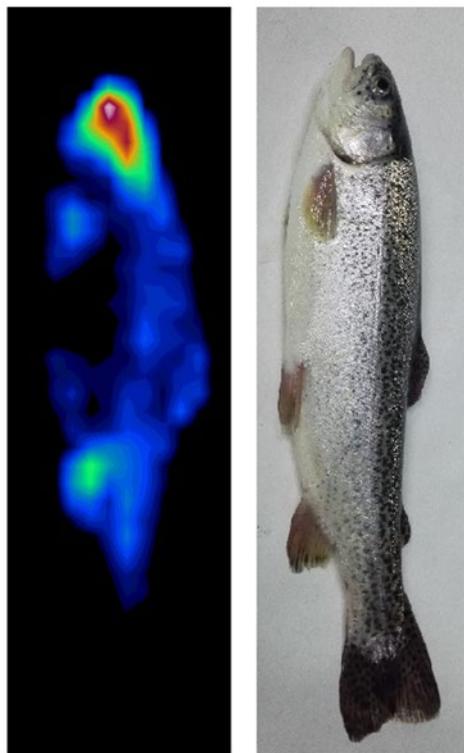
159. Pour protéger les consommateurs des produits agrochimiques potentiellement dangereux, tels que les médicaments vétérinaires et les pesticides, et favoriser un commerce mondial équitable, la présence de normes harmonisées comme les limites maximales de résidus (LMR) du Codex Alimentarius est indispensable. L'élaboration de telles normes repose sur des données concernant l'absorption, la répartition, la métabolisation et l'excrétion de ces substances chimiques chez les animaux destinés à l'alimentation. Grâce à ces informations, il est possible de déterminer le délai d'attente après lequel les produits alimentaires peuvent être consommés sans danger après la dernière administration des médicaments.

160. On utilise à cette fin des médicaments radiomarqués, les LMR servant de référence pour des applications notamment au titre de l'accord de l'Organisation mondiale du commerce sur les mesures sanitaires et phytosanitaires en cas de différends commerciaux et pour les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé animale.

#### **Tendances**

161. De nombreux États Membres ont déclaré avoir peu de moyens de recherche-développement permettant d'obtenir des données se rapportant aux LMR. Pour remédier à ce déséquilibre, l'Agence a entrepris un projet de recherche coordonnée (PRC) intitulé « Déplétion des médicaments vétérinaires et analyse radiométrique de leurs résidus dans des matrices animales », au cours duquel des recherches sont menées sur un large éventail de médicaments et d'animaux destinés à l'alimentation, notamment les poissons, les volailles, les ovins et les caprins. Alors que ces travaux reposent généralement sur l'utilisation de radio-isotopes tels que le carbone 14 et l'hydrogène 3, le PRC s'est intéressé entre autres à celle du zinc 65, qui forme des complexes stables avec les substances à marquer et dont la période radioactive est plus courte (244 jours) mais suffisamment longue pour faciliter les études de déplétion. L'utilisation de cette technologie nucléaire pourrait résoudre le problème de l'achat et de l'exportation de radio-isotopes, dont le coût est élevé, ainsi que celui des mécanismes d'acheminement.

162. Le PRC permet également aux États Membres de participer activement à la production de données scientifiques aux fins de l'établissement de normes nationales ou mondiales de sécurité sanitaire des aliments. Grâce à de telles recherches, ils pourraient désormais envisager d'utiliser les infrastructures existantes, comme les cyclotrons, non seulement pour produire des radio-isotopes à usage thérapeutique, mais aussi pour soutenir les recherches sur les animaux destinés à l'alimentation en améliorant leurs propres systèmes de sécurité sanitaire des aliments.



*FIG. J.1. Visualisation par imagerie d'un poisson traité avec un médicament radiomarqué au zinc 65.  
(Photo : AIEA)*

## **J.2. Détection efficace de la fraude alimentaire**

### **Situation**

163. De nombreux aliments ont une valeur ajoutée en raison de leur forte spécificité régionale ou nationale, ce qui leur vaut souvent d'obtenir une « indication géographique » (IG). Ce statut incite à l'adultération de certains d'entre eux pour des motifs économiques ou au remplacement complet d'un aliment IG par un produit de contrefaçon. Cependant, des composants alimentaires tels que les protéines et les sucres sont porteurs d'un signal interne lié à leur lieu de production d'origine grâce aux isotopes stables de l'hydrogène qu'ils contiennent. L'hydrogène non échangeable couplé au carbone n'interagit pas avec les éléments extérieurs comme l'eau ; il est donc utile pour détecter la fraude alimentaire et identifier l'origine géographique des produits alimentaires à l'aide d'une technique appelée spectrométrie de masse à rapport isotopique (SMRI). Les scientifiques peuvent mesurer les rapports des isotopes stables de l'hydrogène pour garantir que les produits alimentaires à l'étude proviennent d'un lieu déterminé. Ce processus, bien que relativement long, est possible parce que l'hydrogène non échangeable des matières végétales est lié à l'eau que la plante assimile lors de la photosynthèse pour produire des matières organiques telles que l'amidon. Les rapports des isotopes stables de l'hydrogène dans l'eau sont, quant à eux, répartis à la surface du globe systématiquement en fonction de l'origine géographique. Ce signal de l'eau incorporé dans le tissu végétal est l'« empreinte digitale » qui associe une plante à son lieu de culture et à la valeur ajoutée recherchée pour certaines denrées alimentaires liées à un pays ou une région spécifique (par exemple, le café Blue Mountain de Jamaïque, le thé du Sri Lanka, le riz au jasmin de Thaïlande et le fromage Parmigiano Reggiano).

## Tendances

164. L'Agence a mis au point la première d'une série de méthodes innovantes faisant appel à un appareil d'analyse élémentaire utilisé conjointement avec la SMRI (AE-SMRI). Les recherches qui sous-tendent l'« *authentification des aliments par la mesure des transformations au stade de la synthèse combinée à la spectrométrie de masse à rapport isotopique (FAST-IRMS)* » constituent un moyen plus rapide et plus accessible de contrôler l'authenticité des aliments.

165. Cette méthode est particulièrement utile pour analyser rapidement l'hydrogène non échangeable des sucres dans les aliments et les boissons afin de détecter tout ajout caché de produits à base de sirop de sucre bon marché dans les produits frelatés. Elle fournit également des informations sur l'origine géographique des aliments.

166. Cette approche présente plusieurs avantages majeurs :

- Des résultats obtenus plus rapidement : temps nécessaire réduit par rapport aux méthodes traditionnelles.
- Une plus grande précision : pas de problèmes d'échanges d'hydrogène, ce qui permet d'obtenir des résultats plus fiables.
- Une accessibilité plus étendue : possibilité pour un plus grand nombre de laboratoires dans le monde de bénéficier d'essais avancés menés par AE-SMRI sans avoir besoin de s'équiper en appareils coûteux.

167. D'une manière générale, la méthode FAST-IRMS permet aux pays et aux laboratoires de détecter efficacement la fraude alimentaire et de garantir l'authenticité des produits alimentaires à valeur ajoutée.

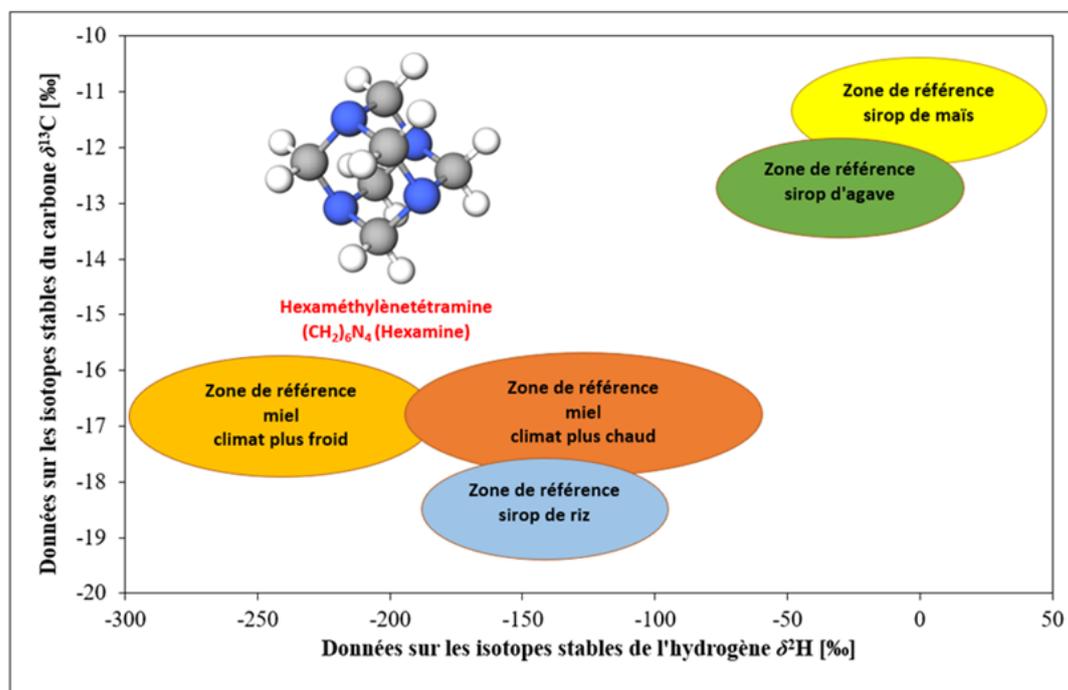


FIG. J.2. Le graphique montre des échantillons de miel authentique provenant du Canada et de la Nouvelle-Zélande (dans la zone de référence ambre du climat plus froid) ainsi que de Malaisie et du Viet Nam (dans la zone de référence orange du climat plus chaud), qui se distinguent clairement des sirops de sucre bon marché fabriqués à partir de riz, de maïs et d'agave (zones de référence bleue, jaune et verte, respectivement). La nouvelle méthode permet aux États Membres de détecter rapidement l'adultération, pour des motifs économiques, de miels de qualité supérieure avec des sirops de sucre bon marché, grâce à l'analyse des isotopes stables de l'hydrogène et du carbone des sucres après leur transformation en « hexamine ». (Graphique reproduit avec l'aimable autorisation de Simon Kelly, qui a travaillé au Centre mixte FAO/AIEA)

### J.3. Détection rapide des maladies et méthodes de diagnostic dans le cadre de la lutte contre la fusariose du bananier TR4

#### Situation

168. La détection précoce des agents pathogènes des plantes est essentielle pour freiner la propagation des maladies et réduire les dommages causés aux cultures. Une prévention et des contrôles efficaces passent forcément par des diagnostics précoces pour empêcher que les maladies se propagent encore davantage et en atténuer l'impact.

169. La détection de l'agent pathogène de la fusariose du bananier, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*), race tropicale 4 (TR4), est toujours indispensable en raison de ses graves répercussions sur la production mondiale de bananes, en particulier dans les régions vulnérables aux changements climatiques. Les techniques de diagnostic moléculaire telles que la réaction de polymérisation en chaîne (PCR), la PCR quantitative (qPCR) et la technique d'amplification isotherme facilitée par l'anneau (LAMP) sont certes largement employées, mais en raison de leur sensibilité limitée il est nécessaire de disposer hors laboratoire d'outils de détection rapides et fiables pour les applications sur le terrain. Ces outils réduisent le délai entre le prélèvement des échantillons et le diagnostic, contribuant ainsi à endiguer le mouvement transfrontalier de la souche *Foc* TR4.



FIG. J.3. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, en visite au Laboratoire de la sélection des plantes et de la phyto-génétique de Seibersdorf. (Source : AIEA)

170. Par l'intermédiaire du Laboratoire de la sélection des plantes et de la phyto-génétique (PBGL), l'Agence a mis au point une méthode novatrice d'une sensibilité, d'une spécificité et d'une reproductibilité exceptionnelles qui se prête ainsi particulièrement bien à la détection délocalisée dans les exploitations. Testée initialement aux fins de la détection de la *Foc* TR4, cette méthode a démontré sa transférabilité, son extrême sensibilité, sa spécificité et sa rentabilité. Elle a été validée avec succès sur plusieurs isolats, permettant une détection exacte et rapide des souches pathogènes. Cet essai améliore la rapidité et la fiabilité du diagnostic, permettant ainsi de diminuer les ressources nécessaires

aux procédures d'endiguement. La sélection par mutation combinée à des outils de diagnostic rapide constitue une stratégie exhaustive de protection des cultures et de production végétale.

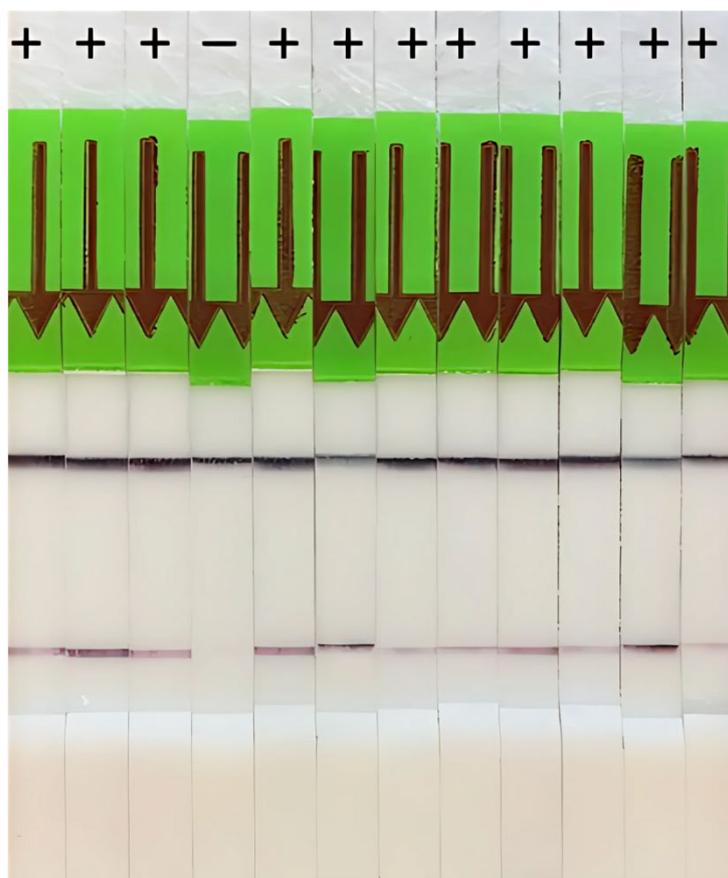
## Tendances

171. La tendance est de plus en plus à l'intégration de techniques nucléaires, comme la sélection par mutation, aux biotechnologies aux fins de la détection des maladies dans le cadre d'une stratégie de gestion globale. Cette approche gagne en importance à mesure que les incidences des agents pathogènes prennent une ampleur inégalée sous l'effet des changements climatiques. Cette évolution est conforme aux modèles climatiques mondiaux qui prévoient une augmentation des incidents liés aux phytopathogènes, d'où la nécessité de diagnostics plus rapides et plus précis.



*FIG. J.4. Symptômes internes de la fusariose due à la souche Foc TR4. Le jaunissement des tissus du xylème dans les lignées mutantes sensibles de bananiers contraste avec l'absence de jaunissement chez les mutants résistants. (Source : AIEA)*

172. L'Agence, par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, a expérimenté pour la première fois des tests de diagnostic avancés adaptés à la détection de la *Foc* TR4 à l'aide du système DETECTR (DNA endonuclease-targeted CRISPR trans reporter). Ces tests très sensibles, validés sur plusieurs isolats pathogènes, permettent de détecter précisément la *Foc* TR4 à partir d'un échantillon de races, de souches, d'endophytes et autres espèces apparentées. Ils conviennent aux méthodes de diagnostic délocalisées, favorisant une intervention rapide aux principaux points d'entrée tout en permettant une gestion durable et rentable.



*FIG. J.5. Dépistage DETECTR de la Foc TR4 dans des mutants de bananier à l'aide de la technique CRISPR/CAS. Les signes « - » et « + » indiquent respectivement les plantes résistantes et sensibles.  
(Source : AIEA)*

173. Cette technologie est rapide, fiable et économe en ressources : pas d'installation de laboratoire complexe, une préparation minimale des échantillons et une formation succincte des opérateurs. Des efforts sont actuellement déployés pour intégrer cette technologie à des biocapteurs, afin d'améliorer encore les capacités de détection de la Foc TR4 à des niveaux extrêmement faibles.

174. Grâce à des programmes de formation, l'Agence renforce les capacités des États Membres à utiliser des outils et des techniques de détection de pointe. Son action vient compléter les processus de sélection axés sur la résistance, améliorant en amont la résistance à la Foc TR4 dans les bananiers grâce à des interventions à caractère scientifique.

## K. Radioisotopes et technologie des rayonnements

### K.1. Exploiter le potentiel des systèmes de faisceaux d'électrons pour des applications mondiales



*FIG. K.1. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi participe à la réunion annuelle de consultation avec les centres collaborateurs dans le domaine des technologies des rayonnements, ce qui montre l'importance de faire progresser ces technologies au bénéfice du développement durable et de l'environnement. Cette démarche collaborative est étroitement liée aux initiatives phares de l'Agence, par exemple NUTEC Plastics ou Atoms4Food, mais aussi à d'autres activités stratégiques comme la préservation du patrimoine culturel, les technologies utilisant des appareils, les techniques de radiotraçage utilisées pour atténuer les effets sur l'environnement, et le contrôle non destructif pour le génie civil et la gestion des catastrophes naturelles. (Source : AIEA)*

#### Situation

175. Les rayonnements ionisants peuvent avoir des effets sur les liaisons moléculaires en modifiant les propriétés physiques, chimiques et biologiques des matériaux, ce qui en fait des outils essentiels dans les secteurs industriel et médical, dans le secteur de la gestion des déchets et dans les recherches scientifiques. Les installations d'irradiation des États Membres contribuent largement à la réalisation de certains objectifs de développement durable et soutiennent des initiatives de l'Agence comme NUTEC Plastics ou Atoms4Food.

176. La technologie des faisceaux d'électrons, de plus en plus répandue, est actuellement utilisée à des fins industrielles dans 40 États Membres. Nombre de gouvernements et d'organisations internationales préconisent et favorisent l'adoption de technologies comme les faisceaux d'électrons et les rayons X pour remplacer les sources radioactives industrielles lorsque cela est possible. Ces solutions offrent des avantages importants, notamment un fonctionnement à la demande au profit de la sûreté et une atténuation des risques pour la sécurité.



*FIG. K.2. Modèle de l'accélérateur transportable de faisceaux d'électrons qui sera installé dans les laboratoires de l'Agence à Seibersdorf, avec le soutien de la République de Corée et des États-Unis d'Amérique. Il a été officiellement présenté lors d'un événement organisé le 26 novembre 2024 en marge de la Conférence ministérielle sur la science, les technologies et les applications nucléaires et sur le programme de coopération technique de l'Agence. (Source : AIEA)*

## **Tendances**

177. Dans le passé, les accélérateurs étaient des appareils complexes et coûteux. Toutefois, de nombreux modèles compacts, polyvalents et plus fiables ont été récemment mis au point pour diverses applications.

178. L'Agence comble les lacunes dans les connaissances et la réglementation relatives à la technologie des faisceaux d'électrons afin de répondre aux besoins des États Membres en matière d'équipements rentables et accessibles. Elle peut ainsi non seulement mieux faire connaître cette technologie, mais aussi en favoriser la mise en œuvre à grande échelle par deux biais :

- L'accélérateur transportable de faisceaux d'électrons : un accélérateur transportable de faisceaux d'électrons sera installé dans les laboratoires de l'Agence à Seibersdorf, ainsi qu'un laboratoire bien équipé d'ici à la fin de 2025. Cet appareil appuiera les activités de formation et les travaux expérimentaux, en aidant les utilisateurs à comprendre la technologie et ses applications, entre autres la modification des polymères, les solutions environnementales, etc. Faciliter l'accès à cette technologie améliorera la compréhension des questions réglementaires et encouragera les États Membres à l'accepter plus largement, ce qui les conduira à adopter en connaissance de cause cette technique avancée (figure K.1).
- un cadre et des lignes directrices visant à aider les États Membres à acquérir et à faire progresser la technologie des faisceaux d'électrons sont en cours d'élaboration (figure K.2).



*FIG. K.3. Les faisceaux d'électrons sont actuellement utilisés à des fins industrielles dans 40 États Membres. Ici, irradiation de semi-conducteurs par un faisceau d'électrons de 10 MeV (20 kW) dans une entreprise privée de Daejeon (République de Corée). (Source : AIEA)*

## **K.2. Le contrôle non destructif en fabrication additive (impression tridimensionnelle)**

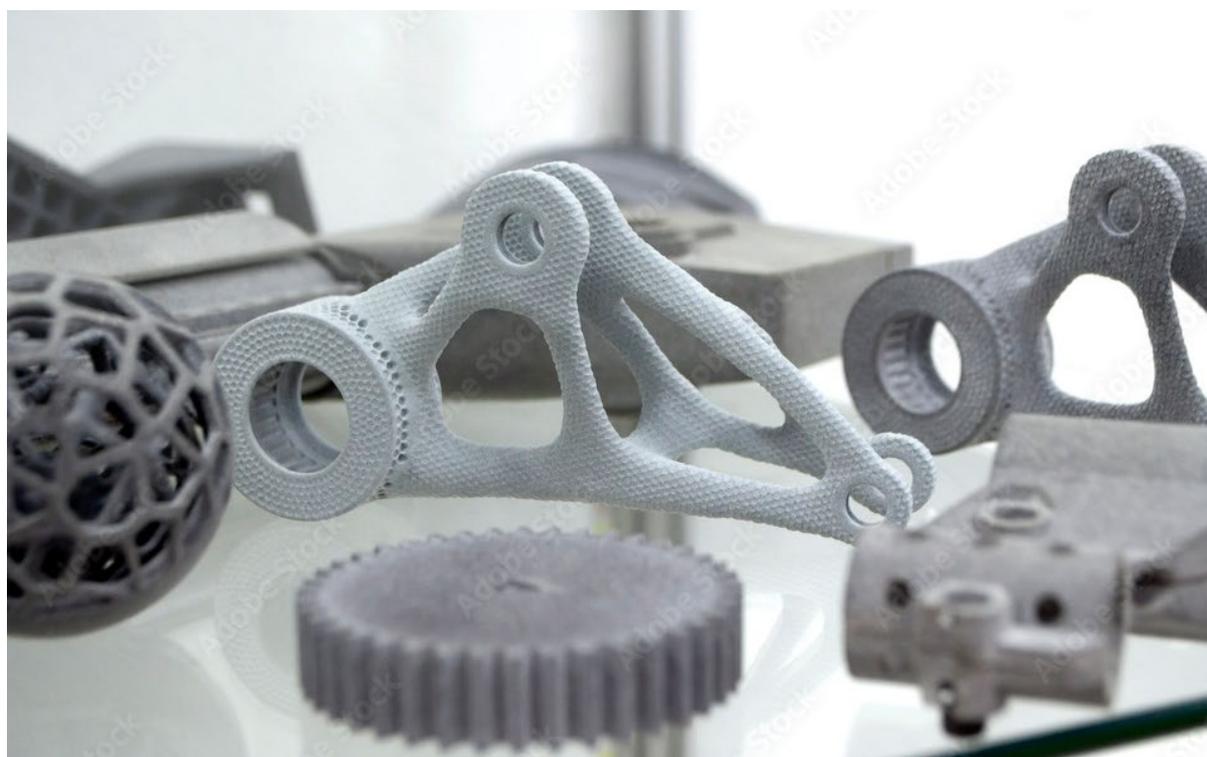
### **Situation**

179. La fabrication additive, dont l'impression 3D est le type le plus connu, révolutionne différents secteurs d'activité en permettant la production de formes géométriques complexes, de structures légères et de composants sur mesure. Contrairement aux méthodes de fabrication classiques, qui consistent à enlever de la matière (fabrication soustractive) ou à couler des pièces dans des moules, le principe de la fabrication additive est de produire les objets couche par couche, ce qui laisse une plus grande liberté de conception (figure K.3). Cette technique permet de réduire les déchets de matériaux et favorise l'efficacité énergétique, ce qui en fait une méthode de fabrication plus durable. Les applications vont de l'aérospatiale et l'automobile à la santé, à l'énergie et aux biens de consommation, où la production de pièces haute performance et complexes par cette méthode stimule l'innovation.

180. Malgré les avantages de la fabrication additive, il est difficile de garantir la qualité constante et l'intégrité structurale des composants imprimés. La nature couche par couche de ce procédé peut poser des problèmes spécifiques qui compromettent la qualité et la sécurité du produit final. Ces problèmes montrent que des méthodes d'assurance de la qualité robustes sont indispensables pour vérifier la fiabilité et la durabilité des composants obtenus par fabrication additive, surtout pour des applications où la sécurité est essentielle, par exemple pour les pièces d'avion, les prothèses médicales ou l'infrastructure énergétique.

181. Le contrôle non destructif (CND) contribue de manière essentielle à traiter ces problèmes en permettant d'inspecter et d'évaluer des pièces obtenues par fabrication additive sans les endommager.

Contrairement au contrôle destructif, qui exige de couper ou de casser les pièces pour en analyser les propriétés, les techniques de CND comme la tomographie à rayons X, la gamma tomographie, les essais aux ultrasons ou les méthodes au laser permettent de détecter des défauts comme les vides, les fissures ou les manques de fusion. Les structures internes et formes géométriques complexes qui sont fréquentes en fabrication additive posent cependant des problèmes pour l'emploi des méthodes classiques de CND. En outre, l'absence de normes universelles pour l'application du CND aux pièces obtenues par fabrication additive constitue un obstacle majeur. Dans le cas des procédés de fabrication classiques, les méthodes de CND sont éprouvées et normalisées, alors qu'en fabrication additive, de nouveaux paramètres apparaissent, par exemple les propriétés spécifiques des matériaux, un comportement mécanique anisotrope et des défauts propres au procédé employé. Il faut donc mettre au point des méthodes de CND adaptées et des protocoles d'essai complets spécifiquement pour les procédés de fabrication additive et les matériaux obtenus par ces procédés.



*FIG. K.4. Divers objets imprimés sur une imprimante 3D industrielle à poudre. (Photo : Adobe Stock)*

## **Tendances**

182. Des techniques avancées de CND comme la tomographie à rayons X ou la gamma tomographie offrent des perspectives intéressantes pour la détection précise des défauts internes dans des structures imprimées en 3D qui sont complexes, composites ou spécialement conçues. Les travaux de recherche sur l'intégration de systèmes de contrôle direct in situ dans les procédés de fabrication additive restent cependant peu nombreux. Ces techniques temps réel pourraient permettre de détecter les défauts en phase de production, ce qui rendrait les contrôles effectués ultérieurement moins nécessaires. Il est essentiel de relever ce défi pour pouvoir exploiter pleinement le potentiel de la fabrication additive et employer cette méthode de manière fiable et sûre dans différents secteurs.

183. À l'appui des actions engagées sur ce sujet dans le monde entier, l'Agence va lancer un PRC pour mettre au point des techniques radiographiques avancées de CND et d'essais directs. Cette initiative vise à améliorer l'assurance de la qualité des matériaux imprimés et la fiabilité et la sécurité des applications de la fabrication additive.

### K.3. Les émetteurs d'électrons Auger, une perspective d'avenir pour la thérapie par radioligands

184. La thérapie par radioligands est une méthode de traitement du cancer très efficace, surtout lorsque les thérapies classiques sont moins efficaces, par exemple lorsque le cancer est avancé ou métastatique<sup>2</sup>. Le principe consiste à utiliser des radionucléides qui émettent des particules bêta, des particules alpha, des électrons Auger ou des électrons de conversion. Ces radionucléides sont liés à des vecteurs sélectifs (peptides, anticorps ou fragments d'anticorps, par exemple) qui ciblent les cellules cancéreuses (figure K.4). Grâce à cette méthode sélective, la thérapie par radioligands permet d'endommager ou d'éliminer les cellules cancéreuses tout en préservant au maximum les tissus sains environnants<sup>3</sup>.

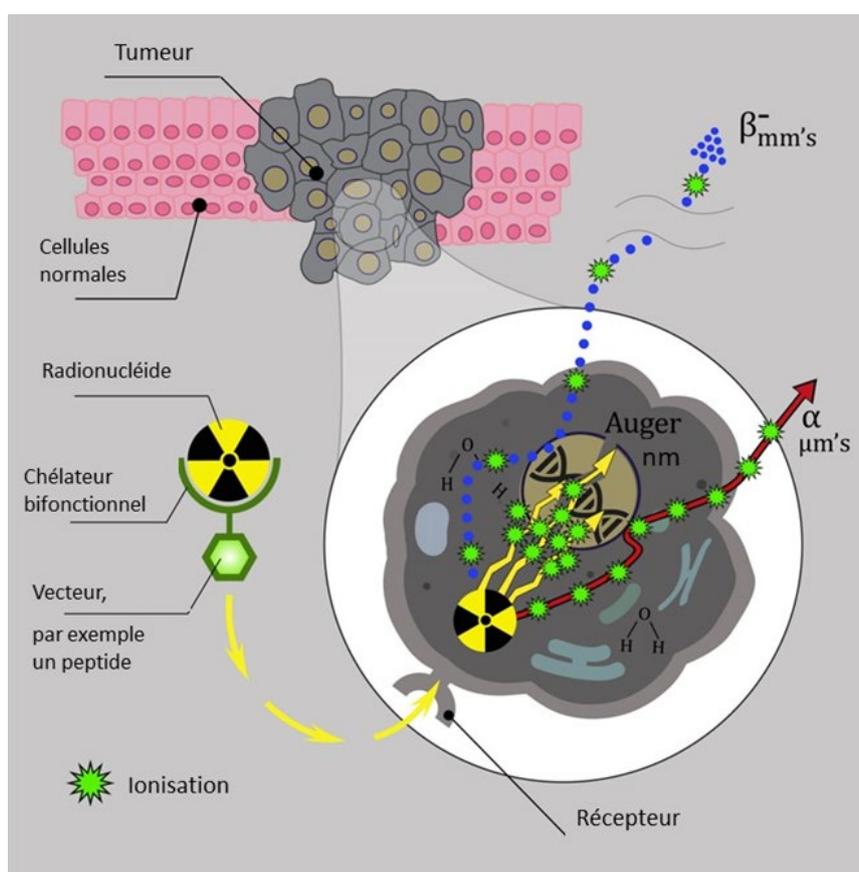


FIG. K.5. Schéma de principe de la thérapie par radioligands, où est représentée l'émission de particules bêta et alpha et d'électrons Auger. (Illustration : AIEA)

185. Pour la radiothérapie par radioligands, le choix du type de rayonnement émis par le radionucléide concerné dépend à la fois de l'énergie émise et du transfert linéique d'énergie (TLE)<sup>4</sup>. Les particules bêta, dont l'énergie est relativement élevée (de l'ordre du MeV) et qui ont un faible TLE, pénètrent les tissus sur une plus longue distance (plusieurs millimètres) avant de dissiper leur énergie. En revanche, le TLE des particules alpha et des électrons Auger est plus élevé, de sorte que ces particules déposent leur énergie à proximité de la cellule cancéreuse ciblée. Les dommages sont ainsi très localisés, ce qui

<sup>2</sup> Radchenko, V., & Hoehr, C. (2020). Modern Alchemy to Fight Cancer. Nuclear Physics News, 30(2), 28–32.

<sup>3</sup> Sgouros, G., Bodei, L., McDevitt, M.R. et al. Radiopharmaceutical therapy in cancer: clinical advances and challenges. Nat Rev Drug Discov 19, 589–608 (2020).

<sup>4</sup> Kassisi AI, Adelstein SJ. Radiobiologic principles in radionuclide therapy. J Nucl Med. 2005 Jan; 46 Suppl 1: 4S-12S. PMID: 15653646.

permet une meilleure sélectivité et une réduction des dommages causés aux cellules saines environnantes. Les électrons Auger, dont l'énergie est faible (entre 1 eV et quelques keV, alors que celle des particules alpha est de l'ordre du MeV), libèrent leur énergie de manière plus précise dans la cellule ciblée. La radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger est ainsi l'une des options thérapeutiques les plus prometteuses et sélectives parmi celles qui existent aujourd'hui. Il est cependant essentiel de choisir les radionucléides et les vecteurs adéquats pour optimiser l'efficacité.

186. Pour déterminer quels patients bénéficieraient le plus de la thérapie par radioligands, la théranostique – l'utilisation simultanée d'outils de diagnostic et d'agents thérapeutiques pour lesquels le vecteur et les radionucléides médicaux sont identiques – est devenue une méthode essentielle.

## **Tendances**

187. Le choix des radionucléides les plus appropriés pour la radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger est essentiel pour la mise au point de radiopharmaceutiques. Les principaux facteurs à prendre en compte pour ce choix sont la période du radionucléide, le nombre d'électrons Auger émis et les éventuelles émissions radioactives qui les accompagnent<sup>5</sup>. Il est tout aussi important de s'assurer que les radionucléides sélectionnés peuvent être produits en quantités suffisantes pour un usage médical. De nombreux émetteurs Auger puissants présentent l'avantage notable de pouvoir être produits dans des cyclotrons médicaux classiques, ce qui les rend facilement accessibles dans le monde entier<sup>6</sup>.

188. Dans la plupart des travaux de recherche actuellement menés sur la radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger, les radionucléides utilisés sont disponibles sur le marché (indium 111 ou iode 125, par exemple) et ne sont peut-être pas les meilleurs possible. Des efforts importants doivent donc être déployés pour mettre au point des procédés qui permettent de produire les radionucléides idéaux pour cette thérapie (figure K.6).

---

<sup>5</sup> Filosofov D, Kurakina E, Radchenko V. Potent candidates for Targeted Auger Therapy: Production and radiochemical considerations. *Nucl Med Biol.* 2021; 94-95:1-19. doi: 10.1016/j.nucmedbio.2020.12.001.

<sup>6</sup> Cyclotrons used for Radionuclide Production, IAEA Accelerator Knowledge Portal, <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Cyclotron.aspx>.

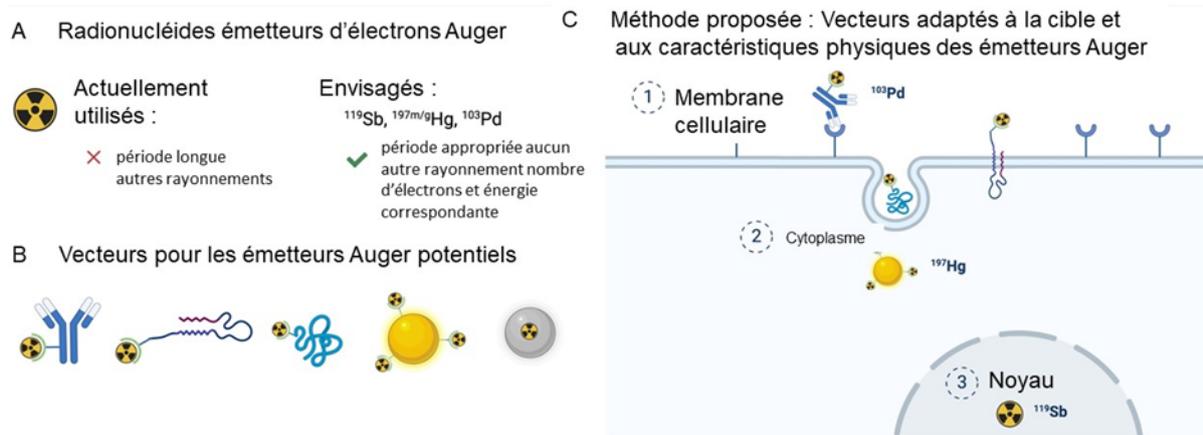


FIG. K.6. A) Radionucléides émetteurs d'électrons Auger actuellement utilisés et radionucléides qui pourraient être utilisés à l'avenir en radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger ; B) Conception rationnelle de vecteurs (anticorps, peptides, protéines et nanoparticules inorganiques, par exemple) pour les émetteurs d'électrons Auger ; C) Stratégies optimales pour le transport des émetteurs Auger jusqu'aux sites cibles à l'aide de vecteurs adaptés aux caractéristiques physiques des émetteurs, comme la période ou l'énergie des électrons. (Illustration : Gökçe Engüdar via BioRender)

189. Le choix des radionucléides les plus appropriés pour la radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger doit s'opérer dans le cadre plus large de la conception des radiopharmaceutiques<sup>7</sup>. Il s'agit notamment d'associer le radionucléide à un vecteur adéquat qui assure l'internalisation dans le cytoplasme de la cellule cible ou à proximité immédiate du noyau de la cellule. En outre, l'utilisation d'un chélateur approprié est souvent indispensable pour fixer le radionucléide. C'est pourquoi un groupe de spécialistes en production de radionucléides, en radiochimie, en radiomarquage et en radiobiologie a été convoqué à une réunion technique à l'Agence en 2022, ce qui leur a permis de présélectionner les radionucléides prometteurs pour la radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger, ainsi que les vecteurs correspondants (figure K7)<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Ku, A., Facca, V.J., Cai, Z. et al. Auger electrons for cancer therapy – a review. EJNMMI radiopharm. chem. 4, 27 (2019).

<sup>8</sup> Bolcaen J, Gizawy MA, Terry SYA, Paulo A, Cornelissen B, Korde A, Engle J, Radchenko V, Howell RW. Marshalling the Potential of Auger Electron Radiopharmaceutical Therapy. J Nucl Med. 2023 Sep;64(9):1344-1351. doi: 10.2967/jnumed.122.265039.

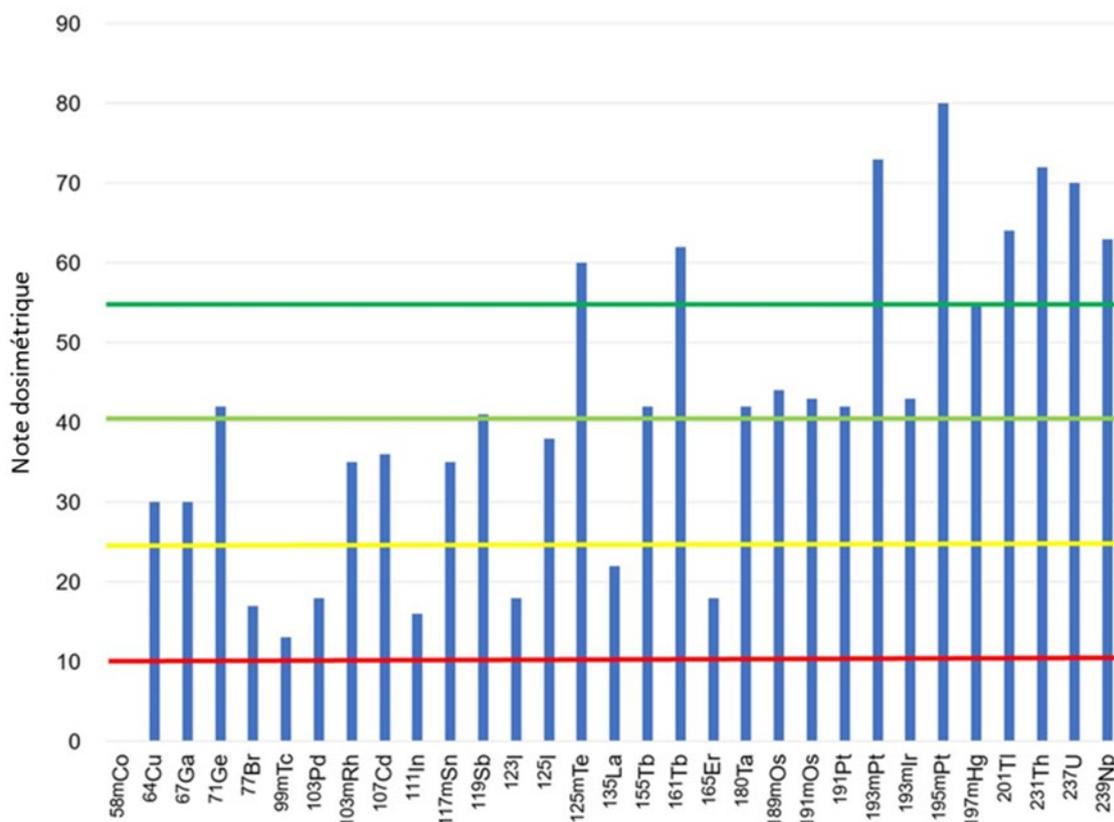


FIG. K.7. Note dosimétrique des radionucléides les plus prometteurs pour la radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger, telle qu'elle a été calculée à la réunion technique qui s'est tenue à l'Agence en 2022. [Illustration : *Journal of Nuclear Medicine* Sep 2023, 64 (9) 1344-1351; DOI: 10.2967/jnumed.122.265039]

190. La collaboration actuelle entre les chercheurs spécialisés dans la production de radionucléides, la radiochimie, le radiomarquage et la mise au point de chélateurs, ainsi que l'évaluation préclinique et clinique, seront déterminantes pour la mise au point des radiopharmaceutiques cliniquement pertinents en radiothérapie par radioligands à émission d'électrons Auger. L'Agence contribue de manière essentielle à faciliter ces démarches en offrant un cadre pour les réunions techniques et les projets de recherche coordonnée qui visent à faire advenir la prochaine génération de radiothérapies par radioligands.

## K.4. Polymères biosourcés pour lutter contre la pollution par le plastique

### Situation

191. Les matériaux issus de sources biologiques renouvelables, c'est-à-dire de la *biomasse*, éveillent un vif intérêt depuis quelques dizaines d'années en raison des préoccupations croissantes que suscitent l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et l'impact des plastiques d'origine pétrolière sur l'environnement. Cet intérêt a conduit à la mise au point de méthodes qui permettent de transformer la biomasse en éléments valorisables ou en matériaux biosourcés. Pour pouvoir améliorer le rendement et la sélectivité, un fractionnement efficace de la biomasse est indispensable. La plupart des méthodes classiques reposent sur des procédés thermochimiques (utilisation de vapeur ou de chauffage électrique), qui présentent souvent un faible rendement énergétique, de sorte que les temps de réaction sont longs et que plusieurs sous-produits sont générés. En revanche, l'utilisation de rayonnements ionisants (rayons gamma ou irradiation par faisceau d'électrons, par exemple) est une solution prometteuse, car elle

maximise l'efficacité énergétique tout en réduisant au minimum le nombre de réactions secondaires indésirables lors du prétraitement de la biomasse. En outre, les progrès de la science des matériaux ont permis de mettre au point des matériaux biosourcés dotés de meilleures propriétés mécaniques, plus facilement biodégradables ou recyclables et à un prix compétitif à l'échelle industrielle.

192. Si l'on met à profit la biomasse, matière première renouvelable (figure K.7), des résidus naturels comme l'amidon, la cellulose ou la lignine peuvent être exploités et irradiés, ce qui permet de remplacer efficacement les plastiques conventionnels et de réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles à mesure que des matériaux biosourcés sont utilisés pour les emballages, l'agriculture et les biens de consommation.



*FIG. K.8. Dans le cadre des activités de l'Agence, différents types de matières premières renouvelables, comme les déchets de maté en Argentine (à gauche) ou des algues en Indonésie (à droite), sont actuellement étudiés pour produire des substituts des plastiques à usage unique qui soient durables et efficaces. [Photos : M. Guillermo Arndt : Institut national de technologie industrielle (Argentine) ; M<sup>me</sup> Sukna Surya Kusumah : Centre de recherches sur la biomasse et les bioproduits de l'Agence nationale de recherche et d'innovation (Source : BRIN)]*

## **Tendances**

193. Les consommateurs étant de plus en plus soucieux de l'environnement, la demande de produits durables augmente. Cette tendance pousse les fabricants à envisager de vendre des matériaux biosourcés, y compris des produits issus du traitement de la biomasse par rayonnements ionisants, afin de répondre aux besoins du marché en matière d'emballages et de produits durables (figure K.8). À mesure que l'utilisation des rayonnements ionisants pour fabriquer de bioplastiques se développe et que le nombre des produits de grande valeur qui contiennent des matériaux biosourcés augmente, le renforcement des cadres réglementaires et des normes de sûreté prend une importance accrue. Le contrôle analytique du composant biosourcé dans les plastiques, par l'analyse de la teneur en  $^{14}\text{C}$ , peut aider à renforcer la surveillance réglementaire et à mieux informer les consommateurs.

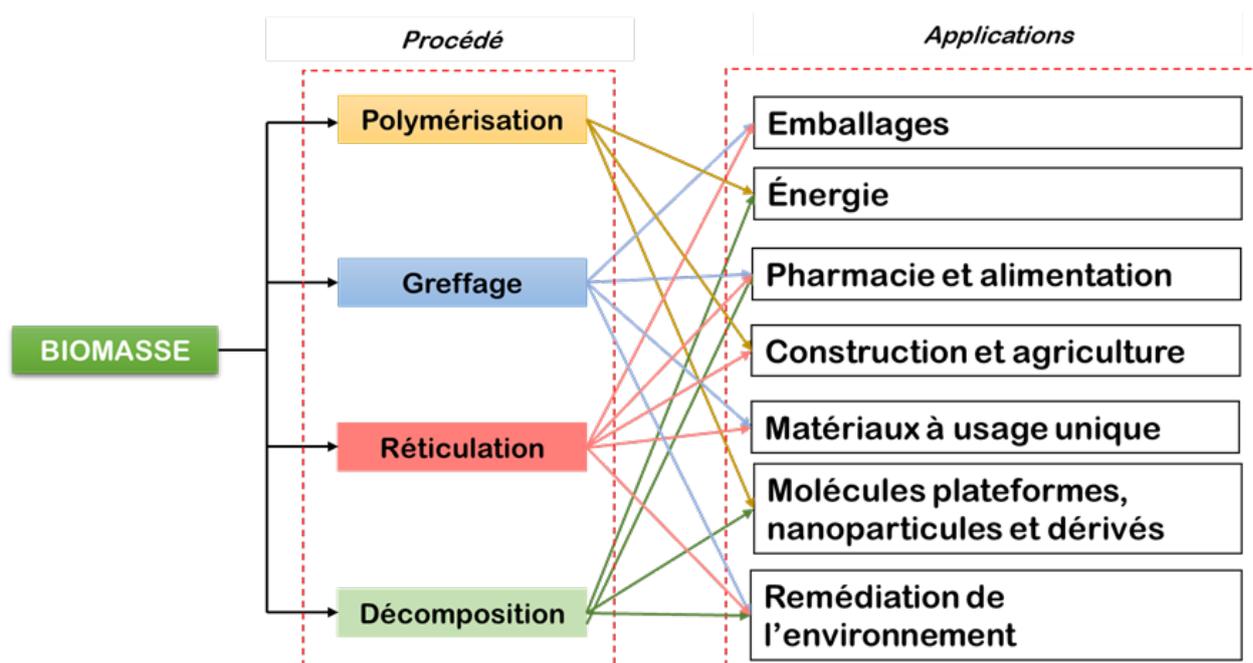


FIG. K.9. Utilisation des rayonnements pour transformer la biomasse en produits finis à valeur ajoutée. (Illustration : AIEA)

194. Les polymères biosourcés qui sont produits avec de la biomasse grâce aux rayonnements ionisants permettent de lutter contre la pollution par le plastique et contribuent à la durabilité environnementale. La tendance est au renforcement de la collaboration entre les universités, l'industrie et les pouvoirs publics afin de faire progresser la recherche-développement sur les bioplastiques, ce qui facilite le transfert des connaissances et la mise en commun des moyens.

195. Si les polymères biosourcés sont une solution prometteuse à la pollution par le plastique, les possibilités de développement et l'intégration de ces produits dans les systèmes de gestion des déchets existants exigent des approches pluridisciplinaires. Les actions de l'Agence dans le domaine des techniques radiologiques offrent des possibilités uniques d'innovation et de renforcement des capacités et aident les États Membres à mettre au point des substituts durables des plastiques conventionnels tout en s'attaquant aux problèmes environnementaux mondiaux. Des organismes de 15 États Membres ont lancé un PRC de cinq ans en 2023 afin de contribuer à lever les obstacles<sup>9</sup>. Des producteurs nationaux de matériaux d'emballage et de contenants alimentaires participent également à ce projet en vue de mettre au point des bioplastiques entièrement biodégradables à base d'algues afin de remplacer les plastiques à usage unique pour la vente au détail, le commerce électronique et l'utilisation domestique.

<sup>9</sup> Renforcement de l'utilisation de la biomasse pour la synthèse des bioplastiques et d'autres composés chimiques à l'aide des techniques radiologiques, [www.iaea.org/projects/crp/f22081](http://www.iaea.org/projects/crp/f22081).

## L. Hydrologie isotopique



*FIG. L.1. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et M<sup>me</sup> Ghada Waly (à gauche), Directrice exécutive de l'Office des Nations Unies contre la drogue et le crime (ONUDC) et Directrice générale de l'Office des Nations Unies à Vienne (ONUW), visitent le Laboratoire d'hydrologie isotopique pour découvrir les traceurs isotopiques qui sont utilisés pour mieux connaître et mieux gérer les ressources en eau. La cheffe du Laboratoire, M<sup>me</sup> Jennifer McKay (à droite), explique la méthode d'analyse du tritium organique. (Source : AIEA)*

### L.1. Suivi des évolutions rapides des eaux souterraines

#### Situation

196. Alors qu'environ la moitié de la population mondiale dépend partiellement ou complètement des eaux souterraines pour sa survie, les changements climatiques et les changements d'affectation des terres compromettent la pérennité de cette ressource. Les phénomènes météorologiques extrêmes (cyclones et ouragans, par exemple) et les évolutions du couvert végétal accroissent le risque de contamination des eaux souterraines en augmentant la probabilité que des contaminants présents en surface migrent vers les aquifères. L'Agence a mis au point des méthodes d'analyse innovantes pour des radionucléides à vie courte, en particulier pour le soufre 35, ce qui lui permet d'étudier ces processus rapides.

197. Le soufre 35 est un isotope cosmogénique produit par l'interaction entre les rayons cosmiques et les atomes d'argon 40 naturellement présents dans l'atmosphère. Sa période étant de 87,4 jours, il peut être utilisé très efficacement pour étudier les eaux qui atteignent les aquifères dans l'année – durée très importante pour éliminer les contaminants biologiques ou informer les gestionnaires des ressources en eau d'un risque immédiat de contamination à la suite d'une catastrophe naturelle ou d'un accident industriel. La période de ce traceur est donc idéale pour les scientifiques et les gestionnaires de l'eau qui

cherchent à mieux comprendre les effets des phénomènes météorologiques extrêmes et des changements d'affectation des terres sur la réalimentation des eaux souterraines et les régimes d'écoulement.

198. Dans un contexte de pénurie d'eau et de risque de pollution de systèmes à recharge rapide, une gestion efficace des eaux souterraines exige des approches novatrices pour pouvoir surveiller les transferts rapides entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. Ces connaissances sont indispensables pour pouvoir évaluer la sécurité des sources d'eau, notamment en situation d'urgence, par exemple pour des camps de réfugiés. Les installations de fortune sont souvent dépourvues de systèmes d'assainissement adéquats, ce qui entraîne des risques importants de pollution d'eaux souterraines qui peuvent également servir de sources d'eau potable. À titre d'exemple, les nappes phréatiques et les aquifères fissuraux ou karstiques ont une durée de recharge rapide (souvent moins d'un an) et peuvent être particulièrement exposés à ce type de contamination. Des épidémies de choléra ont par exemple été directement provoquées par la contamination de tels aquifères.

### **Tendances**

199. En dépit de son intérêt, le soufre 35 a été relativement peu utilisé, principalement en raison de sa faible abondance et de la complexité des analyses à effectuer. L'Agence a travaillé sur plusieurs aspects afin de rendre cet isotope plus utilisable pour les États Membres. La première amélioration a consisté à mettre au point une procédure d'échantillonnage et d'expédition qui permet de réduire la taille des échantillons de plus de 20 litres à 10 grammes et de garantir que les échantillons peuvent être stockés sans pertes. L'Agence a diffusé le protocole d'échantillonnage et a formé les participants à un PRC à cette nouvelle méthode. La seconde amélioration a consisté à abaisser le seuil de détection en affinant la préparation des échantillons et le comptage par scintillation liquide à très bas niveau, la méthode restant simple et financièrement abordable afin qu'elle soit applicable dans les laboratoires des États Membres.

200. La collecte et l'envoi d'échantillons préliminaires par les États Membres sont prévus pour 2025 et les échantillons seront analysés au Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA. Par la suite, il est également prévu de poursuivre le transfert des connaissances à destination des laboratoires des États Membres qui sont équipés de compteurs à scintillation liquide à très bas bruit.

201. Le soufre 35 a également été utilisé pour évaluer l'adéquation de sites de recharge artificielle de nappe (RAN). La RAN est considérée comme un outil essentiel pour l'adaptation aux changements climatiques. Elle permet d'atténuer les effets des phénomènes météorologiques extrêmes en captant l'eau excédentaire en période pluvieuse et en la stockant pour l'utiliser en période de sécheresse. Des projets de RAN sont de plus en plus souvent mis en œuvre dans les États Membres, surtout dans les régions qui sont soumises à un stress hydrique. Ils sont conçus pour répondre à des problématiques locales spécifiques, comme la salinisation des zones côtières ou la baisse du niveau des nappes phréatiques dans certaines régions agricoles.



*FIG. L.2. Collecte et concentration du soufre 35 dans des échantillons d'eaux souterraines sur le terrain à l'aide de colonnes de résine portables. (Photo : AIEA)*

202. L'utilisation plus large du soufre 35 permettra de comprendre plus finement et plus rapidement l'évolution des aquifères dans le monde. Cette compréhension est d'autant plus importante que la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes continuent d'augmenter en raison des changements climatiques. Grâce au suivi des transferts d'eau rapides, le soufre 35 permet de détecter et d'atténuer plus efficacement les risques de contamination.

203. L'évaporation en surface et la capacité de l'atmosphère à retenir la vapeur d'eau augmentent à mesure que les températures s'accroissent. Ce processus assèche les sols et réduit la quantité d'eau présente dans les mers, les lacs et les aquifères. Lorsque l'atmosphère est suffisamment chargée d'humidité pour provoquer de la pluie, celle-ci tombe souvent sous forme d'orages intenses et brefs plutôt que sous forme de pluies abondantes et continues. Ces orages sont susceptibles de provoquer des crues soudaines, mais ils peuvent aussi entraîner une recharge rapide de systèmes aquifères qui sont en train de s'assécher.

204. L'ajout de radionucléides à vie courte comme le soufre 35 à la panoplie des isotopes qui sont utilisés pour gérer les eaux souterraines permettra de mieux comprendre les changements qui touchent les eaux souterraines dans le monde. Cette initiative s'inscrit dans le cadre de l'engagement de l'Agence à atteindre l'objectif de développement durable n° 6, « Eau propre et assainissement ». En intégrant ces méthodes dans les stratégies de gestion des ressources en eau, l'Agence vise à accroître la pérennité et la sécurité des eaux souterraines dans les États Membres.



*FIG. L.3. Deux stagiaires accueillis par l'Agence, Daniela Machado et Stephen Wangari, préparent des échantillons d'eau pour que la concentration de soufre 35 soit mesurée au Laboratoire d'hydrologie isotopique. (Source : AIEA)*

## M. Environnement marin



*FIG. M.1. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, accompagné d'experts scientifiques des Laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA, se rend en Antarctique pour collecter des échantillons à des fins d'analyse dans le cadre de l'initiative NUTEC Plastics (Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique). (Source : AIEA)*

### M.1. Évaluation de l'impact de l'acidification des océans sur les produits de la mer - une approche de portée mondiale

#### Situation

205. L'absorption par l'océan du dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines modifie la chimie des carbonates, ce qui entraîne une acidification des océans. Des études de plus en plus nombreuses montrent que cette acidification – par ses seuls effets ou combinée à d'autres agresseurs environnementaux tels que le réchauffement et la pollution – peut avoir un impact négatif sur les organismes marins. Situés à Monaco, les Laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA mettent au point des techniques nucléaires et isotopiques qu'ils utilisent pour étudier ces effets.

206. L'acidification des océans pourrait avoir de graves conséquences sur la sécurité alimentaire, la santé des populations et la stabilité économique des pays fortement tributaires des ressources marines. Bien qu'elle ne soit que l'un des nombreux facteurs pouvant nuire à la pérennité des produits de la mer, l'acidification des océans risque fort de déstabiliser les industries aquacoles à l'échelle mondiale.

207. Compte tenu de l'importance des produits de la mer sur le plan socio-économique, les préoccupations à l'échelle mondiale que suscitent ces effets ne cessent de croître partout dans le monde. En outre, la question de l'acidification des océans est devenue partie intégrante du Programme de

développement durable à l'horizon 2030 de l'ONU. La cible 14.3 des ODD vise à « [r]éduire au maximum l'acidification des océans et [à] lutter contre ses effets, notamment en renforçant la coopération scientifique à tous les niveaux ». Elle fait également partie intégrante du nouveau Cadre mondial pour la biodiversité Kunming-Montréal au titre de la Convention sur la diversité biologique.



*FIG. M.2. Des chercheuses costaricaines évaluent les effets de l'acidification des océans sur le vivaneau rose (*Lutjanus guttatus*) à taches dans le cadre du PRC dirigé par l'Agence. (Photo : Université du Costa Rica)*

## **Tendances**

208. Malgré les preuves de plus en plus nombreuses des effets néfastes de l'acidification des océans sur les organismes et les écosystèmes marins, on manque encore de données sur les espèces de produits de la mer qui occupent une place centrale sur le plan socio-économique, en particulier dans les pays en développement. Bien que l'acidification des océans concerne l'ensemble du monde, il convient de mener des études localisées pour prévoir et prendre des mesures d'adaptation efficaces et réduire au minimum les effets néfastes qu'elle pourrait avoir sur les populations vulnérables, qui peuvent être touchées de manière disproportionnée.

209. Dans le cadre du PRC intitulé « Évaluation de l'impact de l'acidification des océans sur les produits de la mer - une approche de portée mondiale » (2019 à 2023), des essais menés au moyen d'expériences normalisées ont eu pour objectif d'étudier les effets que pourrait avoir l'acidification des océans sur 13 espèces de crevettes, de poissons et de mollusques (moules, coquilles Saint-Jacques et ormeaux, par exemple). Ces expériences, qui se sont échelonnées sur une période de six mois, ont permis de mesurer un ensemble de paramètres présentant un intérêt commercial (croissance, survie, goût,

texture et autres paramètres) en fonction de la spécialisation de chacun des laboratoires, notamment les modifications du métabolisme, la calcification et la bioaccumulation de contaminants chimiques à l'aide de techniques nucléaires et isotopiques.

210. En outre, d'autres essais menés dans le cadre du PRC ont permis d'étudier la capacité des espèces à se remettre de l'acidification des océans en inversant les conditions chimiques dans des bassins expérimentaux, une stratégie d'adaptation susceptible d'être utilisée en aquaculture. Les participants au projet ont associé des pêcheries locales, des industries aquacoles et la population à des activités de sensibilisation (dégustations de produits de la mer, par exemple) afin de promouvoir des stratégies d'adaptation et d'atténuation dans leurs pays respectifs.

211. La plupart des participants au projet avaient déjà suivi des formations élémentaires ou avancées à l'étude des aspects chimiques et biologiques de l'acidification des océans dispensées par le Centre international de coordination sur l'acidification des océans (OA-ICC) de l'Agence et dans le cadre de projets de coopération technique. Ils ont eu ainsi l'occasion d'appliquer les connaissances acquises tout en travaillant en collaboration, ce qui leur a permis de produire des données essentielles pour faire face à la menace que constitue l'acidification des océans dans leurs pays respectifs.

212. Le PRC a permis de combler d'importantes lacunes dans la compréhension des effets de l'acidification des océans sur les produits de la mer tout en favorisant la collaboration internationale et le renforcement des capacités. Les participants et leurs pays respectifs ont pu, entre autres avantages, renforcer leur capacité à mener des recherches expérimentales dans le milieu marin et à appliquer les meilleures pratiques dans le cadre des expériences et des observations liées à l'acidification des océans, tout en consolidant les collaborations nouées aux niveaux national et international.

213. Le PRC mis en œuvre a constitué une première étape vers une meilleure compréhension des effets de l'acidification des océans sur les produits de la mer. Pour l'avenir, il sera essentiel de poursuivre l'action menée pour lutter, d'une part contre ces effets dans le contexte de différentes variables environnementales et de nombreux agresseurs environnementaux, et d'autre part contre les effets indirects qui surviennent du fait de la boucle de rétroaction écologique. Il importera également de tester des solutions d'adaptation.



*FIG. M.3. Une Argentine participant au PRC effectue un prélèvement d'hémolymphe sur un pétoncle de Patagonie (*Zygochlamys patagonica*) pour étudier les effets de l'acidification des océans sur la réponse immunitaire. [Source : Université nationale de Mar Del Plata (Argentine)]*

214. Le projet a offert une plateforme inédite de coopération aux organismes de recherche de 14 pays répartis sur cinq continents (Afrique, Amérique du Nord, Amérique du Sud, Asie et Europe). Grâce à l'élaboration concertée d'un cadre expérimental complet et à la mise en œuvre de celui-ci, l'AIEA a fourni des données importantes sur la réaction des espèces à l'acidification des océans. Dans le cadre de cette collaboration, une évaluation inédite des effets de l'acidification des océans sur les espèces pertinentes du point de vue socio-économique a été réalisée durant laquelle les participants ont eu l'occasion de participer activement à l'échange de connaissances, de renforcer leurs capacités et de déterminer les meilleures pratiques.

## M.2. Amélioration des connaissances sur la pollution marine grâce à des systèmes isotopiques non traditionnels

### Situation

215. Les isotopes ont largement contribué aux progrès accomplis dans la compréhension de la pollution marine et des processus environnementaux. Les isotopes stables traditionnels (carbone, azote, soufre, oxygène et hydrogène, par exemple) jouent depuis longtemps un rôle important dans les activités de recherche marine. Mesurés principalement à l'aide de techniques telles que la spectrométrie de masse isotopique (SMI), ces isotopes servent de traceurs essentiels à l'étude de la chimie marine, de la circulation océanique, de la productivité biologique, du transfert des contaminants dans les chaînes alimentaires, ainsi que des sources de pollution et des effets de celle-ci. Par exemple, ceux du plomb jouent un rôle central dans la détection des métaux qui polluent les environnements marins, ce qui permet d'évaluer l'efficacité de la réglementation environnementale visant à réduire cette contamination. De même, l'utilisation du plomb 210 – isotope radioactif – aide à déterminer l'âge des sédiments sur une échelle d'environ un siècle et contribue par conséquent à établir une chronologie des effets anthropiques sur les sols et les sédiments. Utilisés conjointement, les isotopes stables et les isotopes radioactifs du plomb fournissent un historique détaillé de la pollution par cet élément dans une région donnée, qui donne des indications précieuses sur l'évolution de la situation au fil du temps.

216. Jusqu'à récemment encore, l'utilisation des isotopes stables se limitait généralement aux éléments légers tels que le carbone, l'azote, l'hydrogène, l'oxygène et le soufre, en raison des difficultés liées à la résolution des variations naturelles de ces isotopes. Cela étant, grâce aux progrès accomplis en termes d'instruments et de méthodes d'analyse, on peut désormais utiliser des systèmes isotopiques non traditionnels tels que le lithium, le fer, le cuivre, le mercure et le cadmium. L'expression « isotopes non traditionnels » permet d'établir une distinction entre ces systèmes et ceux des isotopes stables traditionnels (carbone, azote et hydrogène, par exemple) et des isotopes radiogéniques (système uranium-plomb, par exemple).



FIG. M.4. Prélèvement d'une carotte de sédiments dans les prairies d'herbes marines, au nord-est du Brésil. [Source : CIENAM, Université fédérale de Bahia, (Brésil)]

217. L'Agence s'emploie à mieux comprendre d'une part les processus environnementaux qui interviennent dans le milieu marin et, d'autre part, la pollution marine à l'aide d'isotopes non traditionnels (zinc, chrome, nickel et cuivre, par exemple). Ces isotopes sont aujourd'hui de plus en plus utilisés dans les activités de recherche marine, en particulier dans des domaines comme l'évaluation du risque, la surveillance de la pollution et l'identification des sources. Ils aident les scientifiques à mieux comprendre les flux des contaminants dans les écosystèmes. Contrairement à d'autres méthodes d'analyse, qui reposent souvent sur la quantification du niveau total de contaminants, les isotopes non traditionnels permettent de mieux comprendre la dynamique des métaux, notamment leur biodisponibilité, leur mobilité, leur transport et leurs sources. Leur utilisation – comme celle du lithium – est particulièrement intéressante puisqu'ils servent d'indicateurs mettant en évidence des processus qui affectent la surface de la Terre, comme les phénomènes de météorisation et d'érosion, ainsi que des processus biologiques, tels que la bioaccumulation du lithium. Ces processus présentent un intérêt particulier dans le contexte des changements climatiques, lesquels influent sur la migration et le devenir des contaminants. Ainsi, grâce aux techniques isotopiques non traditionnelles, les États Membres peuvent améliorer leurs capacités à évaluer les processus environnementaux avec une plus grande précision, ce qui leur permet d'élaborer des stratégies plus efficaces de réduction de la pollution et de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des écosystèmes.



*FIG. M.5. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et le Directeur général de la branche Europe centrale, Moyen-Orient et Türkiye de Warner Bros. Discovery, Jamie Cooke, signent l'accord entre l'Agence internationale de l'énergie atomique et Discovery Channel au Siège de l'Agence à Vienne (Autriche), le 12 décembre 2024, afin de promouvoir davantage les solutions que l'AIEA peut proposer aux États Membres en matière de sciences et d'applications nucléaires.  
(Source : AIEA)*

## Tendances

218. Ces dernières années, l'étude des isotopes stables non traditionnels a été métamorphosée par de nouvelles technologies telles que le spectromètre de masse multicollecteur à source plasma à couplage inductif. Cet outil de pointe a apporté une solution à de nombreux problèmes qui se posaient auparavant et permet aux scientifiques d'analyser les isotopes avec une précision et une efficacité accrues. Les progrès accomplis permettent d'approfondir notre compréhension du comportement des isotopes de métaux, ce qui est essentiel pour résoudre les problèmes que posent notamment la pollution marine et les changements climatiques. Pour relever ces défis mondiaux et tirer pleinement parti du potentiel de la recherche isotopique, il sera indispensable de combiner les expériences réalisées en laboratoire et les études menées sur le terrain.

219. L'un des résultats prometteurs qui a été obtenu concerne l'élaboration de nouvelles méthodes pour mesurer les isotopes dans des environnements où les métaux sont présents en de très faibles concentrations, comme l'eau de mer ou les organismes marins. De telles améliorations sont cruciales si l'on veut étendre les possibilités d'utiliser des isotopes non traditionnels à divers domaines de recherche. Les méthodes élaborées permettent aux scientifiques de suivre les mouvements des contaminants dans les écosystèmes, d'évaluer leurs effets sur l'environnement et d'étudier la manière dont les changements climatiques sont susceptibles d'influer sur cette dynamique.

220. L'un des domaines de recherche qui présentent un intérêt particulier porte sur l'utilisation d'isotopes non traditionnels pour évaluer la sécurité alimentaire et la santé des océans. En analysant les signatures isotopiques des organismes marins, les chercheurs peuvent en apprendre plus sur les conditions environnementales, les voies d'exposition potentielles aux contaminants et les risques qui y sont associés pour les services écosystémiques et la santé humaine. Ces organismes agissent comme des indicateurs de l'environnement marin au sens large et fournissent des données précieuses sur les niveaux et les tendances de la pollution.

221. L'intégration des données isotopiques dans les études sur les écosystèmes marins s'avère également prometteuse pour faire progresser les pratiques de gestion durable. En comprenant d'où viennent les contaminants et les voies qu'ils empruntent, les scientifiques et les décideurs peuvent mieux cibler leurs interventions en vue d'atténuer la contamination et les effets de celle-ci sur la vie marine.

222. À l'avenir, les recherches se concentreront vraisemblablement sur la mise au point d'indicateurs spécifiques qui serviront au suivi des processus intervenant dans l'environnement. Par exemple, les isotopes du zinc et du cuivre peuvent être utilisés pour suivre la migration des métaux dans les systèmes aquatiques, tandis que ceux du lithium permettent de mieux comprendre les processus de météorisation sur lesquels agit la variabilité du climat. Ces progrès auront une importance capitale dans la lutte contre les problèmes environnementaux les plus pressants, notamment les effets des changements climatiques sur les écosystèmes marins.

223. Tandis que la demande de sources alimentaires durables ne cesse de croître, le rôle joué par les isotopes est de plus en plus déterminant pour assurer la sécurité sanitaire des aliments et la sécurité alimentaire. Dans ce contexte, la collaboration de l'Agence avec les États Membres devient encore plus importante pour faire face efficacement à ces défis. Les organismes marins comme les poissons et les crustacés font partie intégrante de la chaîne alimentaire humaine, mais peuvent eux-mêmes accumuler des contaminants. Grâce à l'analyse isotopique, il est possible d'identifier les sources de contamination, de suivre le cheminement des contaminants et d'évaluer les risques pour la santé humaine. Ces informations sont indispensables à l'élaboration de stratégies visant à réduire l'exposition aux substances nocives tout en préservant l'intégrité des systèmes alimentaires marins. En tirant parti de ces techniques isotopiques avancées, les États Membres soutiennent les pêcheries et l'aquaculture durables, qui occupent une place importante dans la préservation à long terme de la santé des écosystèmes marins et des communautés qui en dépendent.

*FIG. M.6. Préparation d'une carotte de sédiments pour analyse radiochimique. [Photo : CIENAM, Université fédérale de Bahia, (Brésil)]*





*FIG. M.7. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, à la séance d'ouverture de la Conférence ministérielle de l'AIEA sur la science, les technologies et les applications nucléaires et sur le programme de coopération technique, qui s'est tenue au Siège de l'Agence, à Vienne (Autriche), le 26 novembre 2024. Cette conférence a rassemblé des décideurs de premier plan qui ont examiné ensemble comment la science et la technologie nucléaires permettent de faire face à des défis mondiaux, notamment les changements climatiques, la thérapie contre le cancer, la sécurité alimentaire, la pénurie d'eau et la pollution par le plastique. « Depuis des dizaines d'années, l'AIEA montre la voie en aidant les pays à exploiter l'immense potentiel de la science et de la technologie nucléaires », a déclaré le Directeur général de l'AIEA, Rafael Marino Grossi. « Ensemble, nous avons réussi à améliorer la vie de nombreuses personnes dans le monde, mais nous devons faire plus vu l'ampleur des défis à relever. » (Source : AIEA)*

## Annexes

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde <sup>a</sup>

Pays	Réacteurs en service		Réacteurs temporairement à l'arrêt		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2024	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TWeh	Part du nucléaire en %
AFRIQUE DU SUD	2	1 854					7,8	3,9
ARGENTINE	3	1 641			1	25	10,4	7,4
ARMÉNIE	1	416					2,6	30,8
BANGLADESH					2	2 160		
BÉLARUS	2	2 220					14,7	36,3
BELGIQUE	5	3 908					29,7	42,2
BRÉSIL	2	1 884			1	1 340	14,9	2,3
BULGARIE	2	2 006					15,1	41,6
CANADA	17	12 714					81,2	13,4
CHINE	57	55 320			28	29 638	417,5	4,7
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	26	25 609			2	2 680	179,4	31,5
ÉGYPTE					4	4 400		
ÉMIRATS ARABES UNIS	4	5 348					36,5	21,8
ESPAGNE	7	7 123					52,1	19,9
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	94	96 952					781,9	18,2
FINLANDE	5	4 369					31,1	39,1
FRANCE	57	63 000					364,4	67,3
HONGRIE	4	1 916					15,2	47,1
INDE	20	6 920	4	639	7	5 398	49,9	3,3
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			1	974	6,4	1,7
JAPON	14	12 631	19	19 048	2	2 653	84,9	n.d.
MEXIQUE	2	1 552					12,0	4,8
PAKISTAN	6	3 262			1	1 117	22,8	16,7
PAYS-BAS, ROYAUME DES	1	482					3,4	2,8
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 963					28,0	40,2
ROUMANIE	2	1 300					10,0	19,8
ROYAUME-UNI	9	5 883			2	3 260	37,3	12,3
RUSSIE	36	26 802			4	3 850	202,1	17,8
SLOVAQUIE	5	2 302			1	440	17,0	60,6
SLOVÉNIE	1	696					5,6	35,0
SUÈDE	6	7 008					48,7	29,1
SUISSE	4	2 973					23,0	28,6
TÜRKİYE					4	4 456		
UKRAINE	15	13 107			2	2 070	n.d.	n.d.
<b>Monde <sup>b</sup></b>	<b>417</b>	<b>377 014</b>	<b>23</b>	<b>19 687</b>	<b>62</b>	<b>64 461</b>	<b>2 617,3 <sup>c</sup></b>	<b>s.o.</b>

**Note :** n.d. – non disponible, s.o. – sans objet.

- <sup>a</sup> Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'Agence ([www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris)), d'après les données fournies par les États Membres au 20 juin 2025.
- <sup>b</sup> Le total inclut les chiffres suivants pour Taïwan (Chine) : 1 tranche, 938 MWe en service et 11,7 TW·h d'électricité fournie en 2024, soit 4,6 % du bouquet énergétique.
- <sup>c</sup> La production totale d'électricité n'inclut pas les réacteurs ukrainiens, car les données d'exploitation n'ont pas été communiquées pour l'année 2024.

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

Type d'application <sup>a</sup>	Nombre de réacteurs de recherche concernés <sup>b</sup>	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Formation théorique/pratique	162	52
Analyse par activation neutronique	118	51
Production de radio-isotopes	83	41
Neutronographie	68	35
Irradiation de matériaux / du combustible	67	26
Diffusion neutronique	44	28
Géochronologie	24	21
Transmutation (dopage de silicium)	23	14
Transmutation (gemmes)	21	12
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	17	13
Mesure de données nucléaires	18	12
Autres <sup>c</sup>	117	35

<sup>a</sup> 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.

<sup>b</sup> Sur les 234 réacteurs de recherche considérés (227 en service, 7 provisoirement à l'arrêt, en décembre 2024).

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

## Abréviations et sigles

AE	analyseur élémentaire
ARAO	Agence pour la gestion des déchets radioactifs (Slovénie)
ASN	Autorité de sûreté nucléaire (France)
ATF	combustible tolérant aux accidents ou de technologie avancée
CEFR	réacteur rapide expérimental chinois
CIAS	circuit intégré à application spécifique
CLLBC	chlorure de césium-lanthane-lithium-brome
CND	essais non destructifs
Combustible MOX	combustible à mélange d'oxydes
COP 28	Vingt-huitième session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
COP 29	Vingt-neuvième session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
COVID-19	maladie à coronavirus 2019
DETECTR	clivage en trans d'un ADN rapporteur par une endonucléase Cas
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FAST-IRMS	authentification des aliments par la mesure des transformations au stade de la synthèse combinée à la spectrométrie de masse à rapport isotopique
<i>Foc TR4</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> race tropicale 4
GW	gigawatt
GWe	gigawatt électrique
HALEU	uranium faiblement enrichi à teneur élevée
HTR-PM	réacteur modulaire à lit de boulets à haute température
IA	intelligence artificielle
IG	indication géographique
INIR	Examen intégré de l'infrastructure nucléaire
JET	Tore européen commun
keV	kiloélectronvolt
LMR	limite maximale de résidus
MeV	mégaélectronvolt
MWe	mégawatt électrique
NHSI	Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires
OCDE/AEN	Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	objectif de développement durable
PATHY	irradiation d'une zone tumorale hypoxique
PCR	réaction de polymérisation en chaîne

PRC	projet de recherche coordonnée
PSMA	antigène membranaire prostatique spécifique
RAN	recharge artificielle de nappe
R-D	recherche-développement
REL P	réacteur à eau lourde pressurisée
REO	réacteur à eau ordinaire
REP	réacteur à eau pressurisée
RHTRG	réacteur à haute température refroidi au gaz
RNR-Na	réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
RNR-Pb	réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb
RSCE	radiothérapie stéréotaxique corps entier
SMR	Petit réacteur modulaire
système ROSSPAD	détecteur compact à scintillation de rayons gamma et de neutrons destiné à des applications terrestres et spatiales
t ML	tonnes de métaux lourds
TLE	transfert linéique d'énergie
tU	tonnes d'uranium
TWh	térawatt-heure
UFE	uranium faiblement enrichi
UHE	uranium hautement enrichi
VMAT	arcthérapie volumétrique modulée



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