

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire ■ 2024

Rapport du Directeur général



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

L'atome pour la paix et le développement

GC(68)/INF/4

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2024

Rapport du Directeur général

GC(68)/INF/4

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Septembre 2024
IAEA/NTR/2024

Table des matières

Résumé	5
Avant-propos du Directeur général	7
Résumé	9
A. Électronucléaire	14
A.1. Projections relatives à l'électronucléaire	14
A.2. Centrales nucléaires en exploitation	15
A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion	17
A.4. Développement de la technologie électronucléaire	21
A.4.1. Réacteurs avancés refroidis par eau	22
A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires et microréacteurs	23
A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides	27
A.4.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire	28
B. Cycle du combustible nucléaire	30
B.1. Partie initiale	30
B.2. Partie terminale	35
C. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs	38
C.1. Déclassement	38
C.2. Remédiation environnementale et gestion des matières radioactives naturelles (NORM)	40
C.3. Gestion des déchets radioactifs	42
D. Recherche et développement de la technologie de la fusion pour la future production d'énergie	47
E. Réacteurs de recherche, accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire	56
E.1. Réacteurs de recherche	56
E.2. Accélérateurs de particules	59
E.3. Instrumentation nucléaire	62
F. Données atomiques et nucléaires	64
G. L'intelligence artificielle au service de l'électronucléaire et du cycle du combustible nucléaire	65
H. Santé humaine	66
H.1. Évaluation non invasive de la fonction digestive de l'intestin au moyen d'un test respiratoire optimisé au saccharose marqué au carbone 13	66
H.2. Assurance de la qualité : Faits nouveaux en curiethérapie	69
H.3. L'intérieur du cœur à nu : le rôle crucial de l'imagerie nucléaire dans la détection de l'amylose cardiaque	73

I.	Alimentation et agriculture.....	76
I.1.	Les techniques d'irradiation au service de la mise au point de vaccins : applications de technologies nucléaires à la prévention des maladies infectieuses du bétail.....	76
I.2.	La technologie nucléaire des humidimètres à neutrons de rayons cosmiques couplée à l'imagerie de télédétection au service de la gestion de l'eau à usage agricole.....	78
J.	Technologie des radio-isotopes et des rayonnements.....	82
J.1.	Nouveaux systèmes d'administration de radiopharmaceutiques ciblant les cellules.....	82
J.2.	Technologie des radiotraceurs et zones humides artificielles pour la récupération des eaux usées provenant de l'industrie minière	85
K.	Hydrologie isotopique	89
K.1.	Suivi du cycle de l'eau : faits nouveaux dans l'analyse du tritium	89
L.	Environnement marin	92
L.1.	Améliorer la surveillance et les recherches concernant la pollution par les microplastiques dans l'océan grâce à l'intelligence artificielle	92
	Annexe.....	96
	Abréviations et sigles.....	99

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 2023.
- Le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2024 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, 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 2024 (document GOV/2024/2). Cette version définitive a été établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.

Avant-propos du Directeur général

Qu'elles soient utilisées pour produire une énergie fiable et à faibles émissions de carbone ou pour résoudre des problèmes relatifs à l'alimentation, à la santé, à l'eau et à l'environnement, les technologies nucléaires jouent un rôle majeur face à nombre de défis mondiaux parmi les plus pressants.

En 2023, l'électronucléaire a continué de susciter un vif intérêt, pour sa capacité à aider à atteindre les objectifs climatiques et à relever le défi d'une énergie sûre et abordable, et plusieurs États Membres ont revu leurs politiques en la matière. À l'occasion de la 28^e session de la Conférence des parties (COP28) à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), qui s'est tenue à Dubaï (Émirats arabes unis), l'Agence a organisé plusieurs événements à son pavillon Atoms4Climate (L'atome pour le climat) pour montrer comment l'énergie nucléaire pouvait sensiblement contribuer à décarboner les secteurs où il est difficile de réduire les émissions et la production d'hydrogène, pour ainsi en accélérer la décarbonation. Dans sa déclaration du 1^{er} décembre 2023 sur l'électronucléaire, avalisée par des dizaines d'États Membres, l'AIEA a souligné que cette source d'énergie était indispensable si l'on voulait atteindre l'objectif zéro émission nette. C'est également ce qu'avait jugé quelques mois plus tôt l'Agence internationale de l'énergie dans sa feuille de route *Net Zero by 2050*, qui prévoit que la capacité nucléaire allait plus que doubler d'ici à 2050, s'alignant ainsi sur les projections hautes de l'AIEA publiées en septembre 2023. En outre, lors de la COP28, plus de 20 pays ont appelé, dans une déclaration commune, à tripler la capacité nucléaire d'ici à 2050 et ont invité les banques régionales de développement et les institutions financières internationales à inclure le nucléaire dans leurs politiques de prêt, tout en soulignant la nécessité de disposer de chaînes d'approvisionnement sûres pour accélérer le déploiement de cette technologie. Pour la première fois depuis le début de l'organisation des sommets annuels sur le climat en 1995, grâce à la collaboration que nous avons nouée avec nos partenaires et aux efforts et à la détermination affichés les années précédentes, la COP28 s'est achevée sur un résultat majeur. Le « nucléaire » a été cité explicitement dans le premier bilan mondial approuvé par les 198 pays signataires de la CCNUCC parmi les technologies à faibles émissions nécessaires pour réduire sensiblement et rapidement les émissions de gaz à effet de serre.

Dans le même temps, de plus en plus de pays recourent aux technologies nucléaires pour des applications non énergétiques, y compris pour améliorer la sécurité alimentaire, lutter contre les effets des changements climatiques, protéger l'environnement contre la pollution et améliorer la prise en charge du cancer et d'autres maladies mortelles. Comme le montre le présent rapport, l'Agence continue d'innover sur ces plans et dans d'autres domaines clés, grâce aux travaux de ses laboratoires des applications nucléaires situés en Autriche et à Monaco et grâce aux projets de recherche coordonnée et aux partenariats noués avec des établissements de recherche de premier plan dans le monde. De nombreux secteurs auxquels touchent ses activités de recherche-développement recourent de plus en plus à l'intelligence artificielle pour stimuler l'innovation, tendance vouée à se poursuivre.

Les recherches et données scientifiques sont essentielles à une prise de décision éclairée, et l'Agence ne cesse de chercher des occasions de mettre ses activités de recherche-développement au service des pays pour les aider à tirer le meilleur parti des sciences et technologies nucléaires en vue de protéger et d'améliorer la santé et le bien-être de leurs populations. Dans le prolongement de ses initiatives ZODIAC (Action intégrée contre les zoonoses), NUTEC Plastics (Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique) et Rayons d'espoir, l'Agence, constatant la progression de l'insécurité alimentaire dans le monde en 2023, a mis sur pied avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) l'initiative Atoms4Food (L'atome pour l'alimentation), dont l'objectif est d'aider les pays à se servir de techniques nucléaires pour améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle, y compris des pratiques agricoles climato-compatibles et des pratiques de gestion des ressources en eau mises au point dans nos laboratoires.



FIG. FW.1. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, prenant la parole à la COP28 à Dubaï (Émirats arabes unis). (Photo : AIEA)

La science et la technologie 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 2023, le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2024* permettra aux États Membres de prendre des décisions éclairées pour relever les défis présents et à venir.

Résumé

1. Pour la troisième année consécutive, l'Agence a revu à la hausse ses projections annuelles concernant la croissance potentielle de l'électronucléaire dans les décennies à venir, confirmant d'une part que cette technologie connaît un regain d'intérêt face à la crise de la sécurité énergétique et aux changements climatiques, et d'autre part que la demande d'électrification augmente et qu'il est nécessaire de trouver d'autres solutions que les combustibles fossiles pour fournir de la chaleur et de l'hydrogène et ainsi décarboner les secteurs de l'industrie et des transports. Dans sa projection basse, l'Agence est passée à 458 gigawatts (GW) en 2050, soit une augmentation majeure de 55 GW par rapport à celle établie en 2022. La projection haute est, quant à elle, passée à 890 GW en 2050, contre 873 GW l'année précédente, soit 175 GW de plus que celle établie en 2020.

2. En décembre 2023, la capacité électronucléaire mondiale des 413 réacteurs en exploitation dans 31 États Membres s'établissait à 371,5 GWe. Cependant, 25 réacteurs officiellement exploitables, représentant une capacité de 21,3 GWe, sont restés à l'arrêt tout au long de l'année. En 2023, 5 réacteurs, apportant une capacité de 5 GWe, ont été couplés au réseau, et deux réacteurs dont l'exploitation avait été précédemment suspendue ont été reconnectés et ont ainsi apporté une capacité supplémentaire de 1,6 GWe. D'après les rapports des États Membres, le parc nucléaire mondial a produit environ 2 515,2 TWh d'électricité bas carbone acheminable¹. Fin 2023, 59 réacteurs d'une capacité totale de 61,1 GWe étaient en construction dans 17 pays. Environ 67 % de la capacité mondiale actuelle provient de réacteurs en exploitation depuis plus de 30 ans. En 2023, 5 réacteurs (6 GWe) ont été définitivement retirés du réseau.

3. À l'heure actuelle, une cinquantaine de pays primo-accédants souhaitent ajouter l'électronucléaire à leur bouquet énergétique. Parmi eux, 27 sont à différents stades du lancement et de la mise en œuvre de leur programme électronucléaire. D'ici à 2035, le nombre de pays exploitants pourrait augmenter de quelque 30 % : 10 à 12 nouveaux pays s'ajouteraient aux 31 pays actuels. Pour répondre à cet intérêt croissant, il est nécessaire de mettre en place une infrastructure nucléaire adéquate.

4. Les réacteurs refroidis par eau sont la technologie nucléaire la plus courante à l'échelle mondiale. L'accent qui est mis au niveau mondial sur le développement de la technologie électronucléaire tient notamment au besoin d'accélérer le déploiement de réacteurs avancés, y compris les petits réacteurs modulaires (PRM). La tendance actuelle est d'en améliorer la rentabilité, les caractéristiques de sûreté et l'adaptabilité. Les États Membres s'intéressent de plus en plus près aux centrales nucléaires flottantes et aux microréacteurs, ainsi qu'à leurs applications, et plusieurs pays entreprennent actuellement de concevoir des RFMP-PRM embarqués ou des centrales nucléaires flottantes.

5. L'électronucléaire a déjà fait ses preuves dans le contexte des applications non électriques, comme le chauffage urbain, le dessalement ou la fourniture directe de chaleur pour divers processus industriels : plusieurs États Membres exploitent quelque 65 réacteurs à ces fins, et nombreux sont ceux qui envisagent de plus en plus sérieusement cette option.

6. En ce qui concerne les réacteurs à neutrons rapides, l'accent a été mis sur 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. À moyen terme, le déploiement des systèmes à neutrons rapides va surtout se concentrer sur les réacteurs refroidis au sodium.

¹ La production totale d'électricité n'inclut pas les réacteurs ukrainiens, car les données d'exploitation n'avaient pas été communiquées pour l'année 2023 au moment de la publication.

7. La recherche-développement dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) a montré que cette dernière pouvait aider efficacement à optimiser le cœur des réacteurs de puissance et des réacteurs nucléaires avancés. L'IA peut aussi améliorer la sûreté, ainsi que l'efficacité et la rentabilité des opérations, tout en facilitant la mise au point de technologies nucléaires avancées.

8. Dans le secteur de l'énergie de fusion, de nombreuses entreprises privées aspirent à concevoir indépendamment leurs propres dispositifs de recherche et de démonstration et attirent donc de plus en plus d'investissements. Dans le même temps, des partenariats public-privé commencent à voir le jour, signe de la hausse générale des investissements dans cette énergie – lesquels ont augmenté en glissement annuel de 6,21 milliards de dollars des États-Unis en 2023 (contre 4,8 milliards en 2022). Le secteur de la fusion gagne également en importance dans le monde et compte maintenant 43 entreprises intervenant dans 12 pays. Les organismes de réglementation et les législateurs commencent, quant à eux, à se pencher sur les enjeux et les possibilités de l'énergie de fusion.

9. Le Conseil ITER, organe directeur de l'Organisation ITER, a poursuivi son examen des plans révisés du projet qui prévoient notamment le remplacement du béryllium par du tungstène en tant que matériau de revêtement de la première paroi. En outre, l'Organisation ITER s'est employée à peaufiner ses stratégies et à parfaire ses contrats avec les fournisseurs pour la réparation de composants clés, toujours en coopérant avec l'Autorité française de sûreté nucléaire. En 2023, les chercheurs du Laboratoire national Lawrence de Livermore aux États-Unis sont parvenus à atteindre le seuil d'ignition de la fusion à au moins trois reprises, reproduisant la réussite spectaculaire qu'avait connue l'Installation nationale d'ignition, en décembre 2022.

10. Selon les prévisions tirées du rapport *Uranium 2022 : ressources, production et demande* (Livre rouge 2022), la demande mondiale d'uranium devrait se situer entre 60 960 tonnes d'uranium (tU) (hypothèse basse) et 76 592 tU (hypothèse haute) d'ici à 2030, et entre 63 040 tU (hypothèse basse) et 108 272 tU (hypothèse haute) d'ici à 2040. Au fur et à mesure de leur mise en service entre 2023 et 2040, les sites d'extraction prévus ou potentiels de 19 pays pourraient contribuer à porter à 77 138 tU par an au total la capacité nominale de production dans le monde. Selon l'édition 2022 du Livre rouge, les dépenses de prospection et d'exploitation minières dans le monde ont légèrement augmenté en 2021, d'environ 2,8 millions de dollars des États-Unis après une baisse de 2 milliards de dollars des États-Unis entre 2014 et 2020.

11. Au cours des dix prochaines années, l'industrie de production de combustible nucléaire devra répondre à une demande croissante concernant tous les types de combustible, du fait de l'augmentation du nombre de programmes de construction – tant dans les pays déjà dotés de réacteurs que dans les pays primo-accédants – et des objectifs ambitieux de mise au point de nouveaux types de combustibles, par exemple pour les RFMP-PRM et les réacteurs avancés. La production d'uranium faiblement enrichi plus (UFE+), et en particulier d'uranium faiblement enrichi à teneur élevée (HALEU), doit tenir compte de questions de sûreté et de sécurité, qu'il s'agisse d'une nouvelle procédure d'autorisation, d'une réglementation actualisée ou d'une infrastructure de la chaîne d'approvisionnement spécialement conçue à cet effet.

12. 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 dotés de programmes nucléaires de longue date qui suivent des stratégies de cycle ouvert, les principales difficultés à surmonter demeurent la nécessité d'augmenter les capacités d'entreposage de ce combustible et l'allongement de la durée d'entreposage avant stockage définitif.

13. Dans le monde, 210 réacteurs nucléaires ont été définitivement mis à l'arrêt. Le nombre d'installations en cours de démantèlement continue d'augmenter, la tendance étant à un démantèlement rapide après leur mise à l'arrêt définitive. Dans ces projets de déclassement nucléaire, les technologies

numériques sont vouées à jouer un rôle toujours plus important – par exemple les robots mobiles qui aident à analyser l'état physique des structures et leur situation au plan radiologique.

14. Les pays sont de plus en plus nombreux à adopter des principes et pratiques de gestion intégrée des déchets radioactifs, qui les aident à en optimiser la manipulation, de leur production à leur stockage définitif. La gestion intégrée des déchets permet de rationaliser les processus, d'atténuer les risques environnementaux et de favoriser une gestion responsable des déchets radioactifs. La tendance croissante à la hiérarchisation des déchets radioactifs vise, quant à elle, à réduire le volume des déchets envoyés aux installations de stockage définitif, pour ainsi préserver ces dernières qui sont un atout précieux pour le long terme.

15. Fin 2023, 234 réacteurs de recherche, y compris 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, dont un système hybride, et 14 États Membres avaient arrêté des plans de construction. Le vieillissement progressif du parc mondial des réacteurs de recherche a poussé les opérateurs et organismes de réglementation à adopter de nouvelles techniques et méthodes pour évaluer les conditions de fonctionnement et veiller à ce qu'elles restent sûres.

16. Pour effectuer des études scientifiques poussées, les chercheurs ont besoin de sources produisant un certain nombre de neutrons. Aussi les scientifiques et ingénieurs poursuivent-ils leurs travaux visant à créer une nouvelle génération de sources de neutrons reposant sur des accélérateurs de particules et la technologie des cibles de spallation, en sus des réacteurs de recherche.

17. Les accélérateurs de particules jouent un rôle clé dans l'imagerie subcellulaire et la radiothérapie des cancers. Des techniques d'imagerie très variées, telles que les ultrasons, la tomographie par émission de positons ou encore l'imagerie par résonance magnétique, sont utilisées à des fins de diagnostic médical. Les techniques faisant appel à des faisceaux d'ions et de rayons X sont désormais si perfectionnées qu'il est possible de focaliser ces derniers au nanomètre près, ce qui ouvre la voie à de nouvelles méthodes d'imagerie multispectrale pour l'imagerie médicale ou la visualisation d'artefacts.

18. Les réseaux de portes programmables par l'utilisateur deviennent une composante à part entière des systèmes d'acquisition de données des détecteurs de rayonnements. Ils sont utilisés à des fins très diverses, qui vont du réglage des paramètres d'acquisition des données des détecteurs et des données de diffusion ou de routage, à des travaux de discrimination avancée des signaux, voire de reconstitution complète d'événements. Les algorithmes de traitement des données employés sont au cœur de la complexification des fonctionnalités, qu'elles soient classiques ou fondées sur l'IA.

19. Divers États Membres consacrent davantage de ressources à l'ITER afin d'obtenir des données de qualité sur les interactions des rayons gamma, essentiellement aux fins de mesures neutroniques actives, d'estimations plus précises de l'échauffement gamma dans le blindage des réacteurs de fission et des dispositifs de fusion, et d'innovations dans les applications spatiales.

20. L'une des questions de santé publique les plus urgentes concernant la nutrition consiste à déterminer pourquoi dans les pays à revenu faible et intermédiaire les enfants souffrent d'un retard de croissance malgré de nombreuses interventions en santé publique. Les cas d'entéropathie environnementale (EE) sont de plus en plus nombreux chez les enfants vivant dans des conditions insalubres dans ces pays. L'Agence a aidé à optimiser un test respiratoire non invasif, adapté à tous les âges, qui sert à mesurer la digestion du saccharose et, partant, à déterminer le fonctionnement de l'intestin grêle en présence d'une EE. Le test peut être combiné à d'autres pour couvrir davantage d'aspects de cette maladie, au-delà de la digestion du saccharose, et donner des résultats plus complets.

21. À l'échelle mondiale, le cancer du col de l'utérus est le quatrième cancer le plus fréquent chez les femmes. La curiethérapie, composante vitale de la radiothérapie qui joue un rôle décisif dans la prise en

charge de cette maladie, doit être méticuleusement optimisée afin d'éviter les effets indésirables dus à un sous-dosage ou à un surdosage. L'Agence met actuellement au point une nouvelle méthode d'audit dosimétrique pour améliorer la qualité des traitements par curiethérapie, et s'efforce de combler le fossé qui se creuse en matière de formation théorique et pratique à cette technologie dans les pays à revenu faible et intermédiaire – fossé d'autant plus grand que cette dernière se complexifie et que le matériel de formation manque. L'Agence se sert d'un outil économiquement rentable de réalité virtuelle qui, en se jouant des contraintes physiques, géographiques et logistiques, permet aux utilisateurs de s'exercer à la curiethérapie. En combinant audits dosimétriques et outils innovants de formation, elle adopte une approche globale pour améliorer les compétences des professionnels de santé intervenant en curiethérapie.

22. Les récentes avancées de la recherche médicale et des stratégies thérapeutiques ont fait entrer les patients atteints d'amylose cardiaque dans une nouvelle ère, placée sous le signe de l'espoir. Grâce à des médicaments innovants capables de cibler les mécanismes sous-jacents de l'accumulation des dépôts amyloïdes et à de meilleurs outils d'imagerie diagnostiques comme la cardiologie nucléaire, les prestataires de santé peuvent intervenir plus tôt et plus efficacement. S'appuyant sur des techniques d'imagerie avancées, la cardiologie nucléaire permet de détecter avec précision les cas d'amylose cardiaque et de les différencier d'autres troubles cardiaques. La nature non invasive de ces techniques les rend particulièrement utiles pour l'étude approfondie de cette maladie, ce qui contribue à une prise en charge plus rapide et plus précise.

23. Les vaccins constituent souvent une solution intéressante du point de vue économique pour prévenir les maladies du bétail, susceptibles d'infliger de lourdes pertes économiques partout dans le monde. Depuis quelque temps, un regain d'intérêt se manifeste pour la production de vaccins irradiés, qui s'explique par l'arrivée de nouveaux irradiateurs capables d'administrer des doses précises de rayonnements en un laps de temps court, et par l'acquisition de nouvelles connaissances sur le système immunitaire permettant de mieux analyser les réactions à la vaccination. Les avancées techniques permettent également d'inactiver des agents pathogènes à l'aide de faisceaux d'électrons et d'autres sources de rayonnements et ainsi de ne plus dépendre de substances radioactives pour la production de vaccins irradiés.

24. Dans les régions agricoles, trois milliards de personnes sont confrontées à de graves, voire très graves, pénuries d'eau, qui ne vont aller qu'en empirant avec les changements climatiques. La technologie des humidimètres à neutrons de rayons cosmiques, aujourd'hui couplée à l'imagerie de télédétection haute résolution, permet de contrôler le taux d'humidité des sols sur de vastes superficies ou au niveau des lignes de partage des eaux. Elle pourrait révolutionner la télédétection, au service d'une irrigation climato-compatible, et, partant, améliorer sensiblement l'accès des décideurs et des agriculteurs à des données de référence. Elle a aussi des applications potentielles en recherche environnementale, par exemple analyse des tendances de l'humidité du sol, modélisation de la productivité de l'eau des cultures, surveillance des variations de la disponibilité de l'eau dans les zones humides et prévision des sécheresses, et fournit des données utiles pour éclairer le choix de politiques d'adaptation aux changements climatiques.

25. Les radiopharmaceutiques constituent un moyen sûr et efficace d'acheminer les radionucléides jusqu'aux organes, tissus ou cellules cibles à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. Ils peuvent être associés à des techniques de préciblage, des combinaisons de chimiothérapies ou des agents radiosensibilisants. Les techniques de préciblage pourraient faire évoluer les stratégies théranostiques grâce à l'utilisation de radionucléides à courte période, et donc réduire le risque de radio-exposition de tissus sains. Les systèmes de nanotransporteurs, y compris ceux de nanothéranostique, qui pourraient aider à améliorer l'innocuité et l'efficacité des médicaments, font l'objet d'études approfondies. L'administration de nanoparticules devrait offrir de nombreux avantages, dont une concentration accrue des radionucléides à visée thérapeutique au niveau de la cible et une atténuation des effets secondaires.

26. Peu gourmandes en énergie et dotées d'une infrastructure mécanique simple, les zones humides artificielles sont une alternative économiquement rationnelle et respectueuse de l'environnement aux stations d'épuration classiques. Elles peuvent traiter tous les types d'eaux usées, y compris celles de l'industrie minière. Néanmoins, il faut encore mieux comprendre leur hydrodynamique complexe avant de pouvoir optimiser les processus de traitement. L'Agence mène des recherches sur les applications de la technologie des radiotraceurs pour établir des protocoles et lignes directrices et valider des modèles d'écoulement de zones humides artificielles ; améliorer la performance du système hydraulique de telles zones pour le traitement des eaux usées du secteur minier ; optimiser l'élimination des polluants dans ces zones ; et prédire la réponse dynamique de ces dernières dans diverses conditions.

27. Le tritium, seul isotope radioactif présent dans les molécules d'eau, est un marqueur précieux des processus à l'œuvre dans le cycle de l'eau. Du fait de sa courte période, il est principalement utilisé pour l'estimation de la recharge en eaux souterraines et du risque de pollution. Sa faible concentration dans les eaux naturelles contemporaines rend les opérations de sa mesure techniquement difficiles. Pour obtenir des résultats exacts et précis se prêtant à des applications hydrologiques, il faut procéder à un enrichissement important en tritium. L'Agence a mis au point à cette fin un système innovant de membrane électrolytique polymère, qu'elle a largement testé et qui promet d'être révolutionnaire : armés d'un tel outil, les pays pourraient déterminer les concentrations de tritium, même extrêmement faibles, dans des échantillons d'eau prélevés dans l'environnement, et ce à des fins de contrôle hydrologique et radiologique.

28. L'IA devient indispensable pour l'identification des microplastiques. Malgré les progrès accomplis dans la compréhension de la pollution par le plastique du milieu marin, il est encore difficile de quantifier et de caractériser les microplastiques. L'utilisation par l'IA d'algorithmes d'apprentissage automatique pour l'étude du caractère complexe de la dégradation des polymères dans l'environnement marin constitue un changement radical. Sa rapidité d'analyse des spectres, couplée à sa capacité de simulation de processus physiques, chimiques et biologiques pour obtenir des spectres de polymères dégradés, font de l'IA un outil essentiel pour améliorer l'identification des microplastiques.

A. Électronucléaire

A.1. Projections relatives à l'électronucléaire

Situation

1. Pour la troisième année consécutive, l'Agence a revu à la hausse ses projections annuelles concernant la croissance potentielle de l'électronucléaire dans les décennies à venir, confirmant d'une part que cette technologie connaît un regain d'intérêt face à la crise de la sécurité énergétique et aux changements climatiques, et d'autre part que la demande d'électrification augmente et qu'il est nécessaire de trouver d'autres solutions que les combustibles fossiles pour fournir de la chaleur et de l'hydrogène et ainsi décarboner les secteurs de l'industrie et des transports.

2. Dans ses nouvelles prévisions sur la capacité nucléaire mondiale aux fins de la production d'électricité, l'Agence a sensiblement rehaussé sa projection basse pour 2050, la portant à 458 gigawatts (GW), soit 55 GW de plus qu'en 2022. La projection haute est, quant à elle, passée à 890 GW en 2050,

890 GW
en **2050**

contre 873 GW l'année précédente, soit 175 GW de plus que dans celle établie en 2020. 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 années de nouvelles centrales capables d'apporter une capacité supplémentaire de plus de 600 GW. Au-delà des ambitieux programmes de construction, l'exploitation à long terme du parc existant est essentielle pour faire de la projection haute une réalité. Les nouvelles solutions technologiques, dont les petits réacteurs modulaires (PRM)

et d'autres types de réacteurs avancés, peuvent venir en complément des grands réacteurs en répondant à des besoins différents et en surmontant les obstacles (par exemple dans les pays qui n'ont pas de réseau, ou qu'un réseau limité, pour leurs applications, ou pour des applications non électriques). Néanmoins, l'essentiel de l'expansion du nucléaire devrait reposer sur les grands réacteurs.

3. Il existe des différences et dynamiques régionales dans la manière dont la capacité nucléaire devrait évoluer, tant dans la projection haute que dans la projection basse. La collaboration internationale est essentielle pour relever les défis associés à la mise au point et au déploiement de réacteurs nucléaires, comme l'harmonisation des prescriptions réglementaires et la normalisation, le stockage définitif des déchets radioactifs, ou encore le financement.

Tendances

4. Les technologies de réacteurs avancés et innovants, notamment les RFMP-PRM et leurs applications, suscitent un intérêt considérable et grandissant. Si les grands réacteurs avancés refroidis par eau devraient couvrir l'essentiel de l'expansion de la capacité nucléaire dans les prochaines décennies, les RFMP-PRM devraient, de leur côté, bien aider à décarboner les secteurs dont les émissions sont difficiles à réduire et fournir une énergie bas carbone aux marchés où ils peuvent remplacer des centrales à combustibles fossiles de puissance similaire. Le secteur nucléaire continuera à relever plusieurs défis, notamment en matière de réduction des coûts, de renforcement des capacités et d'harmonisation et de normalisation dans les domaines réglementaire et industriel, pour améliorer sa compétitivité et accélérer le déploiement de nouvelles capacités électronucléaires. Pour soutenir l'action des États Membres dans ces domaines, le Directeur général a lancé en 2022 l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI), qui offre à tous les acteurs du nucléaire (gouvernements, organismes de réglementation et représentants du secteur industriel) une occasion unique de travailler

en synergie à l'objectif commun du déploiement de réacteurs avancés sûrs et sécurisés partout dans le monde en mettant l'accent sur la technologie des RFMP-PRM.

5. Parallèlement, de nombreux pays qui avaient initialement décidé de sortir progressivement du nucléaire revoient leur position et optent pour une exploitation à long terme imprévue.

A.2. Centrales nucléaires en exploitation²

Situation

6. En décembre 2023, la capacité électronucléaire mondiale des 413 réacteurs en exploitation dans 31 États Membres s'établissait à 371,5 GWe. En parallèle, 25 réacteurs officiellement exploitables, représentant une capacité de 21,3 GWe, sont restés à l'arrêt en 2023. Parmi eux figurent quatre réacteurs en Inde d'une capacité nette totale de 639 MWe et 21 réacteurs au Japon d'une capacité nette totale de 20 633 MWe. Deux réacteurs au Japon (Takahama-1 et Takahama-2), arrêtés depuis 2011, ont été redémarrés.

7. En 2023, 418 réacteurs (d'une capacité totale de 377,6 GWe) étaient opérationnels, mais seuls 403 d'entre eux (capables de produire à eux tous 364,48 GWe) avaient déclaré leur production d'électricité à l'Agence. En tout, la production déclarée cette année-là s'est élevée à 2 515,2 TWh, ce qui représente une légère augmentation de 1 % par rapport à 2022³. Les trois principaux producteurs étaient les États-Unis d'Amérique (30 % de la production totale d'électricité déclarée – 742,4 TWh), qui dispose du plus grand parc au monde, suivi de la Chine (16 % – 406,5 TWh), qui reste depuis quatre ans devant la France (13 % – 323,8 TWh), troisième producteur.



À la fin de 2023, la capacité nucléaire mondiale était de

377,6 GWe,

que produisaient

418 réacteurs de puissance

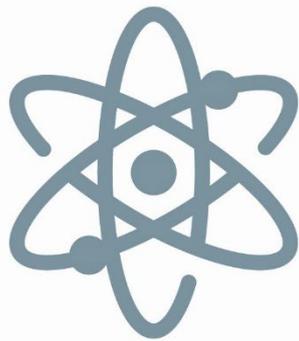
en service dans **31** pays

8. En 2023, cinq réacteurs à eau sous pression (REP), d'une capacité totale de 5 GWe, ont été raccordés au réseau dans cinq États Membres différents. En Chine, Fangchenggang-3 a été couplé au réseau le 10 janvier. Il s'agit du premier des deux nouveaux réacteurs de démonstration Hualong 1 (HPR1000) sur le site de Fangchenggang. En Slovaquie, le réacteur Mochovce-3, un VVER V-213 doté d'une capacité électrique nette de 440 MWe, a été raccordé au réseau le 31 janvier. Aux États-Unis d'Amérique, le réacteur Vogtle-3 AP1000 (1 117 MWe) a quant à lui été couplé le 31 mars. Au Bélarus, un VVER V-491 de 1 110 MWe, le Belarusian-2, a été raccordé le 13 mai. Enfin, en République de Corée, le réacteur APR-1400 Shin-Hanul-2 (1 340 MWe) a été raccordé au réseau le 21 décembre. Pour tous ces réacteurs, à l'exception de Mochovce-3 et de Shin-Hanul-2, l'année 2023 a marqué le début des opérations d'exploitation commerciale.

² Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'Agence (www.iaea.org/pris), d'après les données fournies par les États Membres au 16 juin 2024.

³ La production totale d'électricité n'inclut pas les réacteurs ukrainiens, car les données d'exploitation n'avaient pas été communiquées pour l'année 2023 au moment de la publication.

9. Fin 2023, 59 réacteurs d'une capacité totale de 61,1 GWe étaient en construction dans 17 pays. Au



À la fin de 2023,
59 réacteurs
d'une capacité totale de
61,1 GWe
étaient en construction
dans **17 pays**

cours de l'année, les travaux de construction de six réacteurs nucléaires REP ont débuté en Chine et en Égypte. Leur capacité totale devrait s'élever à 6,8 GWe. En Chine, ce sont quatre réacteurs CAP1000 qui ont commencé à être construits en 2023 – Haiyang-4 (1 161 MWe), Lianjiang-1 (1 224 MWe), Sanmen-4 (1 163 MWe), Xudabu-1 (1 000 MWe) – auxquels s'ajoute un

réacteur HPR1000, Lufeng-6 (1 116 MWe). L'Égypte a quant à elle lancé les travaux d'El Dabaa-3 (1 100 MWe), un VVER-1200, le 3 mai.

10. Environ 67 % de la capacité nucléaire opérationnelle mondiale (261,8 GWe, 295 réacteurs) provient de réacteurs en exploitation depuis plus de 30 ans, plus de 29 % (112,2 GWe, 142 réacteurs) de réacteurs en exploitation depuis plus de 40 ans et 4 % (17,5 GWe, 28 réacteurs) de réacteurs en exploitation depuis plus de 50 ans. 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 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.



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 capacité médian était de 87,74 % à l'échelle mondiale. Les

réacteurs à eau bouillante (REB) et les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus performants depuis 2013. Ils affichent des facteurs de capacité médians de 89,3 % et de 82,7 %, respectivement.

12. En 2023, cinq réacteurs ont été définitivement mis hors service (6 GWe). En Belgique, Tihange-2 (un REP de 1 008 MWe) a été mis à l'arrêt le 1^{er} février. Le 14 mars, ce fut au tour de Kuosheng-2 (un REB de 985 MWe) à Taïwan (Chine). Les trois derniers réacteurs opérationnels de l'Allemagne – à savoir Emsland (un REP de 1 335 MWe), Isar-2 (un REP de 1 410 MWe), et Neckarwestheim-2 (un REP de 1 310 MWe) – ont été mis à l'arrêt le 15 avril, soit douze ans après le lancement de la politique nationale de sortie du nucléaire.

Tendances

13. À la fin de l'année 2023, les 69 années d'expérience d'exploitation accumulées à l'échelle mondiale représentaient plus de 19 751 années-réacteurs, sur 647 réacteurs d'une capacité totale de 497,9 GWe, répartis entre 35 pays. La capacité électronucléaire est restée à un niveau constant pendant ces dix dernières années – seuls 69,8 GWe ont été ajoutés au réseau depuis début 2013. Plus de 79 % de cette augmentation provient d'Asie, où 54 réacteurs (55,4 GWe) ont été couplés au réseau sur cette période. La Chine est en tête de liste, avec 40,02 GWe ajoutés au réseau depuis début 2013.

A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion

Situation

14. À l'heure actuelle, une cinquantaine de pays souhaitent ajouter l'électronucléaire à leur bouquet énergétique pour favoriser leur développement socio-économique. Parmi eux, 27 sont à différents stades du lancement et de la mise en œuvre de leur programme électronucléaire.

15. Dix-sept 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, El Salvador, Estonie, Éthiopie, Indonésie, Kazakhstan, Maroc, Mongolie, Niger, Ouganda, Philippines, Sénégal, Soudan, Sri Lanka, Thaïlande, Tunisie, Zambie). La plupart d'entre eux ont déjà procédé à des études de préfaisabilité 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.

16. Dix en sont à la phase postdécisionnelle, c'est-à-dire qu'ils ont pris leur décision et mettent sur pied l'infrastructure, ou ont signé un contrat et entameront prochainement ou ont déjà entamé les travaux de construction : le Bangladesh, l'Égypte et la Türkiye ont déjà démarré le chantier de leur première centrale nucléaire ; la Pologne a choisi la technologie et signé un contrat avec le vendeur ; et l'Arabie saoudite, le Ghana, la Jordanie, le Kenya, le Nigéria et l'Ouzbékistan travaillent à la préparation ou à l'examen des offres pour leur première centrale nucléaire.



17. Au Bangladesh et en Türkiye, le combustible nucléaire neuf des premières tranches a été livré sur site en octobre et en avril 2023, respectivement. L'exploitation commerciale devrait commencer fin 2024 au Bangladesh et début 2025 en Türkiye. La première coulée de béton de la tranche 3 de la centrale nucléaire égyptienne d'El Dabaa (VVER-1200) a eu lieu en mai 2023. L'Autorité égyptienne de réglementation nucléaire et radiologique a délivré le permis de construire pour la tranche 4 d'El Dabaa en août 2023, et le site est en train d'être préparé pour les travaux. En Pologne, les technologies et les fournisseurs ont été choisis pour la construction de REP d'une capacité nucléaire installée totale de 6 000 à 9 000 MWe d'ici à 2042. Le choix des technologies et fournisseurs pour la centrale nucléaire de l'Arabie saoudite devrait, quant à lui, être arrêté d'ici à 2025, et le premier réacteur être mis en service en 2036.

18. Fin 2023, 59 réacteurs, d'une capacité totale de 61,1 GWe, étaient en construction dans 17 pays. Pour 6 d'entre eux (6,7 GWe), les travaux avaient débuté cette même année. La Chine a entamé la construction de quatre réacteurs CAP1000 (Haiyang-4, Lianjiang-1, Sanmen-4 et Xudabu-1) et de la tranche 6 (HPR1000) de la centrale de Lufeng, pour une capacité totale de 5,7 GWe. En Hongrie, les préparatifs du projet Paks II, visant à construire deux réacteurs VVER V-527, sont en cours. La première coulée de béton du réacteur Paks-5 est prévue pour la fin de l'année 2024.



*FIG. A.1. Le Directeur général, Rafael Mariano Grossi, et Yeafesh Osman, Ministre de la science et de la technologie du Bangladesh, lors d'une réunion bilatérale tenue en marge de la 67^e session ordinaire de la Conférence générale à Vienne, le 25 septembre 2023.
(Source : AIEA)*

19. La Jordanie prévoit de lancer en 2026 un appel d'offres pour un projet de PRM qui servirait à la production d'électricité et au dessalement de l'eau de mer. Le Ghana a élargi son choix de technologie de réacteur aux RFMP-PRM et examine actuellement les propositions de cinq fournisseurs potentiels pour l'établissement d'une capacité d'environ 1 000 MWe. Une mise en service est prévue pour 2029. Le Kenya a annoncé qu'il envisageait de construire un réacteur de recherche ainsi que des RFMP-PRM et de grandes centrales nucléaires. En Ouzbékistan, les procédures de caractérisation des sites et d'autorisation de centrales nucléaires d'une capacité installée totale de 2 400 GWe ont débuté. La première centrale devrait y entrer en service entre 2026 et 2030.

20. L'Estonie envisage exclusivement la technologie des RFMP-PRM pour son programme électronucléaire. Une mission d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) de phase 1 y a été organisée en octobre 2023 pour faire le point sur l'infrastructure. Elle a constaté que le pays avait procédé à une évaluation complète de ses besoins en infrastructure nucléaire pour que le gouvernement puisse décider d'entreprendre ou non un programme électronucléaire. Au cours de cette mission, l'AIEA a visité la salle de Fermi Energia, à Kunda, aménagée pour informer le public et instaurer un dialogue avec les collectivités locales au sujet de l'un des sites potentiels (Fig. A.2). Le gouvernement devrait décider en 2024 si les recherches sur le site peuvent se poursuivre.



FIG. A.2. Salle destinée à l'information du public sur le potentiel de l'énergie nucléaire de Fermi Energia, à Kunda (Estonie). Octobre 2023. (Source : AIEA)

21. Le Kazakhstan a choisi un site pour sa première centrale nucléaire et a annoncé qu'il organiserait un référendum en 2024 pour décider de procéder ou non aux travaux de construction. En mars 2023, il a également accueilli une mission d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) de phase 1 de l'AIEA.

Tendances

22. Le nombre de pays exploitants pourrait augmenter de quelque 30 % d'ici 2035 : 10 à 12 nouveaux pays s'ajouteraient aux 31 pays actuels et devraient donc redoubler d'efforts pour préparer leurs infrastructures, avec l'aide de l'Agence, en vue d'un déploiement responsable. La prise de décisions ou 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'Arménie, l'Argentine, la Bulgarie, la Hongrie, le Pakistan, la République islamique d'Iran, la République tchèque, la Roumanie et la Slovaquie. 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 de production de nouveaux composants.

23. En ce qui concerne les évolutions technologiques, les planificateurs et décideurs de la politique énergétique s'intéressent de près à des modèles inédits de RFMP-PRM qui devraient être disponibles et déployés d'ici à 2030. Un certain nombre de pays ont donc intégré ces réacteurs dans leur réflexion sur les questions d'ordre technologique ou

continuent de suivre la situation – parmi eux des primo-accédants comme l'Arabie saoudite, l'Estonie, le Ghana, l'Indonésie, la Jordanie, le Kenya, l'Ouganda, les Philippines, la Pologne, le Soudan et



la Zambie, ou des pays qui développent leur programme électronucléaire, comme l'Afrique du Sud, la Bulgarie, la République tchèque et la Roumanie. Ils sont motivés par les progrès de la technologie des RFMP-PRM et leurs avantages potentiels par rapport aux grandes centrales nucléaires, tels qu'un investissement initial moins élevé, la possibilité de couplage à des réseaux de faible capacité, les applications non électriques et leur modularité extensible.

24. Pour autant, les États Membres qui entreprennent de développer leur programme électronucléaire à partir de centrales nucléaires évolutives continuent de s'intéresser aux technologies des grandes centrales.

25. Que le programme soit fondé sur de grandes centrales ou des RFMP-PRM, l'infrastructure électronucléaire nationale, qu'il s'agisse de sûreté nucléaire, de sécurité nucléaire ou de garanties, reste indispensable et doit être dûment établie. Les États Membres disent toujours vouloir utiliser des modèles de référence en exploitation et tirent profit de l'expérience acquise par les organismes de réglementation et les exploitants dans le pays d'origine.

A.4. Développement de la technologie électronucléaire

Situation

26. L'accent qui est mis au niveau mondial sur le développement de la technologie électronucléaire tient principalement au besoin d'accélérer le déploiement de réacteurs avancés, dont les RFMP-PRM. Les finalités ne se limitent pas à la production d'électricité mais englobent des applications non électriques, telles que le chauffage urbain, la production d'hydrogène et le dessalement. Des acteurs non traditionnels s'intéressent de plus en plus près à l'électronucléaire, qu'ils souhaitent utiliser pour décarboner des activités industrielles énergivores. La recherche d'applications innovantes, comme la cogénération à l'aide de centrales nucléaires flottantes, l'implantation de microréacteurs dans des zones reculées et les applications dans l'espace de solutions nucléaires, témoigne de l'évolution dynamique de la technologie nucléaire. Les réacteurs avancés, qui peuvent favoriser l'adaptation des réseaux électriques dans un contexte marqué par le développement des énergies renouvelables intermittentes, gagnent du terrain. L'industrie nucléaire profite également de l'intelligence artificielle (IA), et notamment des techniques d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond, en tirant parti des puissants moyens informatiques et outils d'analyse des données qu'elle offre pour révolutionner les systèmes d'exploitation et de maintenance.

27. L'électronucléaire évolue, l'accent étant mis principalement sur le développement de réacteurs avancés et l'élargissement de leurs applications. Grâce à des travaux soutenus de recherche et d'innovation, cette technologie apparaît aujourd'hui indispensable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en réduisant les émissions de carbone. Les efforts déployés pour l'intégrer dans les secteurs non électriques s'inscrivent dans le cadre d'une stratégie visant à exploiter tout son potentiel dans les différentes composantes du paysage énergétique mondial – une évolution qui fait du nucléaire un élément clé d'un avenir énergétique durable et bas carbone.

Tendances

28. Les réacteurs refroidis par 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 du système – et l'optimisation des combustibles pour en augmenter le rendement et réduire le volume des déchets.

29. Compacts et capables d'être déployés dans des zones ou régions reculées mal dotées en infrastructures de réseau, les RFMP-PRM continuent d'être envisagés comme une option sérieuse dans

le monde entier. On s'efforce actuellement d'en améliorer la rentabilité, les caractéristiques de sûreté et l'adaptabilité.

30. 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 mis sur l'amélioration de leur rentabilité, pour réduire les coûts de construction et augmenter le rendement énergétique.

31. Les applications de la chaleur nucléaire à diverses fins suscitent, quant à elles, un intérêt croissant, par exemple pour alimenter les usines de dessalement destinées à remédier aux problèmes de pénurie d'eau dans de nombreuses régions ; pour produire de l'hydrogène par électrolyse à haute température ; ou encore pour alimenter des opérations qui nécessitent une chaleur élevée, comme dans les industries chimique ou manufacturière.

A.4.1. Réacteurs avancés refroidis par eau

Situation

32. Plus de 95 % des centrales nucléaires commerciales en exploitation dans le monde sont dotées de réacteurs refroidis par eau. Forts d'une longue et solide expérience d'exploitation, ceux-ci contribuent pour beaucoup à couvrir les besoins énergétiques mondiaux. Leur fiabilité et leur efficacité les amènent à être largement utilisés pour la production d'électricité. L'industrie nucléaire est en constante évolution et mène des travaux de recherche-développement (R-D) sur des modèles avancés, des améliorations de la sûreté et des technologies de substitution comme les systèmes énergétiques hybrides (énergies renouvelables couplées à des sources nucléaires) pour répondre à la demande croissante d'énergie et aux défis climatiques. Les progrès accomplis en science des matériaux, les modèles de calcul et l'ingénierie de sûreté permettent d'améliorer les technologies avancées des réacteurs refroidis par eau, et notamment de renforcer les systèmes et dispositifs de sûreté passive, les technologies des combustibles et les méthodes de refroidissement, de réduire le volume des déchets radioactifs et de consolider la résistance à la prolifération. À titre d'exemple, plusieurs pays exploitent déjà ou construisent des modèles de réacteurs à eau sous pression – parmi eux l'AP1000, l'APR1400, l'EPR, le HPR1000 et le VVER1200. Sur le site de Barakah aux Émirats arabes unis, l'exploitation commerciale du troisième APR1400 a débuté en février 2023. Aux États-Unis d'Amérique, dans la tranche 3 de la centrale Vogtle, un réacteur AP1000 a commencé à être exploité à des fins commerciales en juillet 2023. En novembre 2023, le Bélarus a débuté l'exploitation commerciale de la tranche 2 de sa centrale nucléaire. En Fédération de Russie, un réacteur VVER-S à régulation spectrale est en cours de développement. Plusieurs pays concentrent leurs efforts sur le développement du concept des réacteurs refroidis par eau supercritique (RESC). Ils explorent des modèles plus petits pour diverses applications et tentent d'optimiser ces réacteurs pour qu'ils puissent fonctionner efficacement avec des spectres de neutrons mixtes. Des études de cas nationales continuent d'être menées aux fins de l'analyse, sur les plans technique et économique, de systèmes énergétiques hybrides nucléaire-renouvelables (utilisant notamment le solaire et l'éolien, deux sources d'énergie intermittentes) dans des centrales nucléaires avancées. L'objectif est de fournir une charge de base, d'améliorer la stabilité du réseau et d'utiliser la chaleur nucléaire à des fins non électriques.



FIG. A.3. Tranche 3 de la centrale Vogtle en Géorgie (États-Unis d'Amérique), après l'achèvement des travaux. (Source : Southern Nuclear Co.)

Tendances

33. On compte 55 réacteurs refroidis par eau en construction dans 17 États Membres, dont 50 REP évolutifs avancés – 1 ACP, 1 AP1000, 3 APR-1400, 6 CAP1000, 1 CAREM, 3 EPR, 11 HPR1000, 1 PRE KONVOI et 23 VVER de différents types – 2 réacteurs avancés à eau bouillante et 3 réacteurs à eau lourde sous pression (RELP). Ces modèles présentent des caractéristiques de sûreté renforcées contre les accidents graves et exigent moins de combustible. Chaque réacteur peut produire entre 25 et 1 630 MWe. La plupart sont regroupés sur un même site.

34. Face aux changements climatiques et à la demande d'énergie, de nombreux pays exploitants s'emploient à prolonger autant que possible la durée de vie utile des centrales, initialement fixée à 40 ans, en essayant avant tout de moderniser et d'améliorer les principaux composants et équipements.

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

Situation

35. Fin 2023, on comptait deux RFMP-PRM de démonstration en fonctionnement. La centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov, en Fédération de Russie, dotée de deux réacteurs KLT-40S de 35 MWe chacun, a été rechargée en combustible pour la première fois. En exploitation commerciale depuis mai 2020, elle fournit de la chaleur et de l'électricité à la ville de Pevek, dans la région de Tchoukokta. En Chine, l'exploitation commerciale du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température sur le site de Shidaowan, préalablement utilisé à des fins de démonstration, a débuté le 6 décembre 2023 : deux réacteurs produisent 200 MWe. Trois RFMP-PRM sont à différents stades de construction en 2023. L'Argentine prévoit maintenant de coupler au réseau en 2028 son réacteur CAREM-25, actuellement en construction. La mise en chantier de la centrale de démonstration ACP100 à Changjiang, dans la province de Haïnan (Chine), a débuté en juillet 2021. Le cœur du réacteur a été installé en août 2023. Ce réacteur à eau sous pression polyvalent, appelé « Linglong One », produira 125 MWe d'électricité d'ici à 2027. Une autorisation a été délivrée pour la construction du modèle RITM-200N sur le site du district d'Ust-Yansky, en Yakoutie (Fédération de Russie), qui devrait produire 55 MWe d'électricité d'ici 2028. La fabrication des pièces forgées pour diverses configurations

de réacteurs RITM-200C a débuté. Une centrale nucléaire flottante sera construite à partir de ce type de réacteur à Tchoukotka (Fédération de Russie), d'ici à 2027.

Conception et autorisation pour un déploiement à court terme

36. Au Canada, les travaux de construction du réacteur BWRX-300 à circulation naturelle devraient commencer en 2025 sur le site de Darlington. Le couplage au réseau est prévu pour fin 2028. Ce modèle de microréacteur modulaire est destiné à une application hors réseau à Chalk River, en Ontario. L'examen du modèle ARC-100 est en cours, tout comme l'examen pour l'autorisation de préparation d'un site. Le premier réacteur sera construit sur le site de Point Lepreau, dans le Nouveau-Brunswick.

37. En Chine, le réacteur modulaire à lit de boulets à haute température refroidi par gaz (HTR-PM) de démonstration de la baie de Shidao (province de Shandong), premier réacteur modulaire à haute température refroidi par gaz au monde, a commencé à être exploité à des fins commerciales le 6 décembre 2023. Ce projet est le fruit des efforts conjugués de l'Université de Tsinghua, responsable technique et responsable de la R-D et de la conception des principaux composants et systèmes ; de l'entreprise China Huaneng Group Co., propriétaire et exploitant de la centrale ; et de l'entreprise China National Nuclear Co. (CNNC), prestataire chargé de l'ingénierie, de l'approvisionnement et de la construction et fabricant du combustible.



FIG. A.4. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi visitant le réacteur modulaire à lit de boulets à haute température refroidi par gaz (HTR-PM) de démonstration dans la baie de Shidao, dans la province de Shandong (Chine). (Source : CAEA)

38. En France, EDF a créé une filiale, détenue à 100 % par le groupe, pour le projet NUWARD qui vise à mettre au point deux REP capables de produire 340 MWe au total. Pour le moment, l'appel à projets « France 2030 » permet de stimuler les travaux relatifs aux réacteurs modulaires avancés. En 2023, huit projets de PRM ont été sélectionnés. Ces projets se fondent sur des technologies de réacteurs de quatrième génération, dont celles des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), des réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb (RNR-Pb), des réacteurs à sels fondus et

des réacteurs à haute température refroidis par gaz (RHTRG). En Europe, trois organismes de réglementation nucléaire (République tchèque, Finlande et France) ont publié leur rapport sur la première phase de l'examen préliminaire conjoint du PRM français NUWARD, et trois autres organismes de réglementation (Royaume des Pays-Bas, Pologne et Suède) sont prêts à participer à la deuxième phase.

39. En Italie, en septembre 2023, le Ministère de l'environnement et de la sécurité énergétique a lancé la Plateforme nationale pour l'énergie nucléaire durable. L'objectif est de rassembler les acteurs italiens du secteur nucléaire afin de concevoir une étude de préfaisabilité pour le déploiement éventuel de l'énergie nucléaire dans le pays, en prenant comme technologies de référence les réacteurs PRM, les réacteurs modulaires avancés et les microréacteurs.

40. Au Japon, plus de dix modèles de RFMP-PRM mis au point par des acteurs du secteur privé sont en cours d'examen. À l'Agence japonaise de l'énergie atomique, le réacteur expérimental à haute température (HTTR), d'une puissance thermique de 30 MW, est opérationnel et est utilisé pour le projet de démonstration de production d'hydrogène.

41. La République de Corée possède deux modèles de RFMP-PRM intéressants. Le premier, appelé SMART, est un REP capable de produire 100 MWe. Un nouveau partenariat avec le Canada a été annoncé, et une demande d'autorisation devrait être soumise en vue de l'éventuelle installation d'un réacteur SMART aux Laboratoires de Chalk River, dans ce pays. Le second, appelé Innovative-SMR, est un REP intégré conçu pour produire 170 MWe, qui est mis au point par un consortium national.

42. En Fédération de Russie, au moins 20 modèles de RFMP-PRM ont été mis au point à partir de différentes filières technologiques pour des centrales nucléaires terrestres et embarquées destinées à la production d'électricité et à la cogénération. Un accord a été signé pour la construction d'un réacteur SHELF-M de 10 MW visant à alimenter les activités minières à Sovinoïe. La construction du réacteur RITM-200N, un PRM refroidi par eau, débutera en Yakoutie en 2024. Deux projets de réacteurs VVER-600 et VVER-C-600 refroidis par eau conçus pour des centrales de taille moyenne sont en cours de développement. Ils visent à remplacer les réacteurs VVER-440 vieillissants à la centrale de Kola. Le projet de réacteur VVER-C-600 permet de réguler le spectre neutronique pour compenser la combustion du combustible et ainsi pouvoir fonctionner en cycle fermé.

43. Au Royaume-Uni, cinq modèles de RFMP-PRM et de réacteurs modulaires avancés (NUWARD, BWRX-300, ARC-100, VOYGR et AP300) ont été sélectionnés pour un examen plus approfondi, les contrats devant être attribués à l'été 2024. L'examen réglementaire du PRM Rolls-Royce de 470 MWe fondé sur la technologie des REP à boucle standard a commencé.

44. De nombreux modèles de RFMP-PRM sont en cours d'élaboration aux États-Unis. L'autorisation et la démonstration du modèle VOYGR de l'entreprise NuScale, qui pourrait comprendre 6 modules de 77 MWe chacun, ne se limitent plus à Idaho Falls. D'autres utilisateurs potentiels s'intéressent maintenant à ce modèle, aux États-Unis et en Europe, y compris en Roumanie. Les deux types de technologies de réacteur de quatrième génération sont les suivants : le RNR-Na Sodium, de l'entreprise TerraPower, et le Xe-100, qui est fondé sur la technologie des réacteurs RHTRG. Parmi les autres modèles avancés figurent le réacteur à haute température refroidi aux sels fluorés de Kairos Power, le microréacteur eVinci et le Holtec SMR-160. Le projet MARVEL, qui se concentre sur les applications des microréacteurs, la recherche, la validation et l'évaluation, se poursuit également.

Tendances

45. Tout au long de 2023, l'intérêt des États Membres pour les centrales nucléaires flottantes et les microréacteurs, ainsi que pour leurs applications, n'a fait que croître. 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 2023, les activités liées à la mise au point d'un sous-ensemble de RFMP-PRM connus sous le nom de « microréacteurs » se sont poursuivies au Canada, aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie, au Japon, en République tchèque et au Royaume-Uni. Conçus pour dégager une puissance faible ne dépassant pas les 20 MWe, les microréacteurs sont considérés comme la solution optimale pour la cogénération de chaleur et d'électricité dans des régions reculées ou de petites îles, ou encore pour remplacer des générateurs diesel. Les réacteurs à haute température, réacteurs à neutrons rapides et caloducs comptent parmi les technologies adoptées pour les microréacteurs.



FIG. A.5. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi à l'ouverture du Colloque international sur le déploiement des centrales nucléaires flottantes, organisé sur le thème « avantages et enjeux » au Siège de l'Agence à Vienne, en novembre 2023. (Source : AIEA)

46. De plus en plus de pays s'emploient actuellement à concevoir des RFMP-PRM embarqués pour des centrales nucléaires flottantes destinées à des applications terrestres et marines. Au Danemark, une jeune entreprise spécialisée dans la conception de réacteurs élabore actuellement un réacteur compact à sels fondus d'une capacité de 100 MWe. La République de Corée poursuit la mise au point du réacteur BANDI-60, unité flottante de production d'électricité de type REP d'une capacité de 60 MWe. La Fédération de Russie a choisi le modèle RITM-200M pour ses prochaines centrales nucléaires flottantes. Les centrales nucléaires flottantes dotées de RFMP-PRM sont destinées à des marchés de niche, notamment l'approvisionnement en électricité et chaleur de populations reculées, le dessalement et les systèmes énergétiques hybrides, dans le cadre de collaborations avec le secteur maritime et les chantiers navals. Les aspects juridiques, réglementaires et institutionnels de ces concepts de PRM sont en cours d'analyse et d'évaluation afin de faciliter le déploiement.

47. Dans ce contexte marqué par une évolution 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 RFMP-PRM, sert de point focal pour les États Membres et autres parties

prenantes qui souhaitent déposer une demande officielle d'assistance concernant des questions d'ordre général liées à ces types de réacteurs et à leurs applications, et sert de mécanisme de réponse pour l'Agence. Parmi toutes les activités de collaboration que la plateforme a rendues possibles en 2023, on retiendra notamment la mission d'experts chargée d'examiner une étude de faisabilité sur l'utilisation de RFMP-PRM aux fins du dessalement en Jordanie et le Colloque international sur les centrales nucléaires flottantes.

A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides

Situation

48. En décembre 2023, on comptait cinq RNR-Na en exploitation dans trois États Membres : trois en Fédération de Russie, un en Chine et un en Inde. En 2023, le réacteur russe BN-800 a été entièrement chargé en combustible MOX, ce qui a marqué la première étape de la fermeture du cycle du combustible nucléaire. Cette dernière met actuellement en service un prototype de surgénérateur à neutrons rapides – un RNR-Na industriel expérimental d'une capacité de 500 MWe, qui devrait être raccordé au réseau en 2024. La Chine construit actuellement deux réacteurs de démonstration CFR-600 identiques, dont l'un est déjà en train d'être mis en service. Le réacteur à neutrons rapides expérimental Joyo redémarrera en 2026 après des travaux d'amélioration. La technologie des caloporteurs utilisant des métaux lourds liquides suscite de plus en plus d'intérêt, en particulier pour les RFMP-PRM à neutrons rapides. La Fédération de Russie construit un réacteur de démonstration RNR-Pb de 300 MWe, BREST-OD-300, et plusieurs modèles sont en gestation en Chine, aux États-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni, ainsi que dans l'Union européenne. Sur les six modèles de réacteurs innovants mis au point par le Forum international Génération IV, trois (refroidis au sodium, par métal lourd liquide ou à l'hélium) sont des systèmes à neutrons rapides, tandis que deux (refroidis par sels fondus ou par eau supercritique) peuvent fonctionner en utilisant des spectres de neutrons rapides ou modérés.



FIG. A.6. La société de combustible TVEL expédie du combustible en Chine pour le chargement du cœur du premier réacteur à neutrons rapides CFR-600. (Source : TVEL)

Tendances

49. Les RNR-Na demeurent la solution privilégiée pour un déploiement à moyen terme de systèmes à neutrons rapides. En plus des trois RNR-Na qui y sont exploités, la Fédération de Russie met au point

le grand réacteur BN-1200, d'une capacité de 1 200 MWe, et construit un réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides (MBIR). La Chine s'emploie de son côté à développer un réacteur de quatrième génération, le CFR-1000, d'une puissance de 1 GWe. Enfin, TerraPower, entreprise basée aux États-Unis, met au point le RNR-Na Natrium, réacteur avancé combiné à un système de stockage (sels fondus), qui peut atteindre une puissance de pointe de 500 MWe – ce qui lui permettrait de remplacer une centrale au charbon classique – et peut être associé à d'autres énergies renouvelables. Autre projet de RNR-Na aux États-Unis : le Versatile Test Reactor, réacteur d'essai polyvalent en attente de l'approbation du Congrès américain. En France, parmi les 15 projets présentés dans le cadre de l'appel à projets « France 2030 », sept entreprises ont été sélectionnées pour le développement de RFMP-PRM à neutrons rapides en 2023. Quatre projets dérivés des RFMP-PRM à neutrons rapides ont été lancés en 2023. 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-300, en Fédération de Russie, qui devrait être mis en service en 2028. Sont également en cours de développement le RNR-Pb Westinghouse (450 MWe), projet commun des États-Unis d'Amérique et du Royaume-Uni, 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 RFMP-PRM en Chine et en France. De jeunes entreprises travaillent au développement du SEALER de 55 MWe en Suède, 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 spectre de neutrons rapides, tels que ceux refroidis par gaz ou à sels fondus, sont en cours d'élaboration dans l'Union européenne et aux États-Unis d'Amérique.

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

Situation

50. L'électronucléaire a déjà fait ses preuves dans le contexte des applications non électriques, comme le chauffage urbain, le dessalement ou la fourniture directe de chaleur pour divers processus industriels : plusieurs États Membres exploitent quelque 70 réacteurs à ces fins, et nombreux sont ceux qui envisagent de plus en plus sérieusement cette option.

51. En 2023, 45 réacteurs nucléaires répartis dans 10 États Membres ont fourni 2 046,0 GWh d'équivalent électrique de chaleur pour des applications non électriques. La majeure partie de cette chaleur (88 %) a été utilisée pour le chauffage urbain, pour un total de 1 799,1 GWh, en Russie, en Chine, en Slovaquie, en République tchèque, en Suisse, en Roumanie, en Hongrie et en Bulgarie. En Inde et en Suisse, 211,8 GWh (10 %) ont été utilisés pour le chauffage industriel, tandis que 35,1 GWh (2 %) ont été utilisés pour le dessalement.

52. Se joignant à d'autres pays utilisateurs, dont la Bulgarie, la Fédération de Russie, la Hongrie, la République tchèque, la Roumanie, la Slovaquie, la Suisse et l'Ukraine, la Chine a récemment entrepris un grand programme de développement du chauffage urbain nucléaire. Après le lancement en 2021 de son projet de démonstration de chauffage urbain à la centrale nucléaire de Qinshan, dans la province du Zhejiang, elle a donné en 2022 le coup d'envoi de son projet Hongyanhe. D'autres pays qui disposent déjà d'un vaste réseau de chauffage urbain, comme la Finlande et la Pologne, envisagent d'utiliser la chaleur nucléaire pour alimenter ces réseaux avec une énergie propre.

53. Soucieux d'assurer un accès essentiel à une eau propre à une part croissante de la population mondiale, de plus en plus de pays ont recours au dessalement, et l'utilisation de l'électronucléaire pour alimenter ce processus suscite un intérêt croissant chez les États Membres. L'Inde prévoit de démultiplier ses capacités de dessalement nucléaire et ambitionne d'installer à Kalpakkam deux unités de distillation à effets multiples capables de traiter 1 000 mètres cubes par jour, qu'elle alimenterait avec de la chaleur nucléaire. D'autres pays, à savoir le Japon et les États-Unis d'Amérique, se servent de

l'électricité d'origine nucléaire pour alimenter leurs installations d'osmose inverse à des fins de dessalement. De leur côté, le Kazakhstan et le Pakistan ont déjà fait l'expérience du dessalement nucléaire thermique, et la Chine prévoit d'installer des unités d'osmose inverse alimentées par le nucléaire.

54. Plusieurs États Membres ont manifesté un intérêt pour la production d'hydrogène à partir d'énergie d'origine nucléaire. C'est notamment le cas du Canada, de la Chine, des États-Unis d'Amérique, de la Fédération de Russie, de la France, du Japon, de la République de Corée, du Royaume-Uni et de la Suède. Aux États-Unis d'Amérique, la station nucléaire de Nine Mile Point a commencé en 2023 à produire de l'hydrogène à partir d'électrolyseurs à basse température, à l'instar de la centrale d'Oskarshamn en Suède, qui a entamé ses opérations de production commerciale d'hydrogène en 2022. En outre, le Royaume-Uni (centrale nucléaire de Heysham) et les États-Unis d'Amérique (centrale nucléaire de Prairie Island) envisagent tous deux d'ajouter des électrolyseurs à haute température dans des centrales nucléaires existantes, de sorte à utiliser la vapeur des boucles secondaires de ces dernières pour augmenter le rendement de la production d'hydrogène. En Fédération de Russie, Rosenergoatom mène actuellement une évaluation de l'impact environnemental pour un projet de construction d'un complexe pilote de production d'hydrogène à la centrale nucléaire de Kola. On compte plusieurs autres projets plus ou moins avancés d'intégration d'électrolyseurs à basse température dans des réacteurs nucléaires aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie et en France.



FIG. A.7. Le Centre pour une énergie propre de Nine Mile Point a commencé ses opérations commerciales de production nucléaire d'hydrogène en 2023. (Source : Constellation)

Tendances

55. Parmi toutes les sources d'énergie bas carbone, l'électronucléaire est unique en son genre : il est capable de fournir sans interruption, à grande échelle, de la chaleur et de l'électricité qui peuvent être acheminées de manière fiable indépendamment des contraintes géographiques. Cette série d'avantages que lui seul peut offrir le rend de plus en plus intéressant aux yeux de ceux qui souhaitent décarboner non seulement le secteur de l'électricité mais également d'autres applications énergétiques responsables de la majorité des émissions mondiales de CO₂, car fondées sur les combustibles fossiles. Parmi ces secteurs figurent le chauffage, les transports et diverses applications industrielles, de la production de ciment à la production de pétrole et de gaz, en passant par la métallurgie, la production d'engrais et

d'une vaste gamme d'autres produits chimiques. L'électronucléaire peut fournir une électricité zéro carbone quand l'électrification est possible, une chaleur zéro carbone directe pour éviter d'avoir à brûler des combustibles fossiles et une énergie décarbonée pour la production d'hydrogène – chose que les États Membres considèrent de plus en plus essentielle à une économie bas carbone. À l'heure où de nombreuses régions du monde se heurtent à des coûts exceptionnellement élevés des combustibles fossiles, où l'approvisionnement énergétique devient une source de préoccupation grandissante de tous et où les États Membres redoublent d'efforts dans la lutte contre les changements climatiques, de telles applications séduisent plus en plus.

B. Cycle du combustible nucléaire

B.1. Partie initiale

Situation

56. Au 30 octobre 2023, le prix au comptant de l'uranium (U) s'établissait à 74,00 \$ É.-U /livre d' U_3O_8 (192,38 \$ É.-U/kg U), atteignant son niveau le plus élevé en 16 ans. Cette hausse d'environ 200 % des prix du marché marque un changement radical par rapport à ceux relativement stables de la période 2016-2021, lesquels se situaient approximativement entre 20 et 30 \$ É.-U /livre d' U_3O_8 (soit 52 à 78 \$ É.-U/kg d'U).

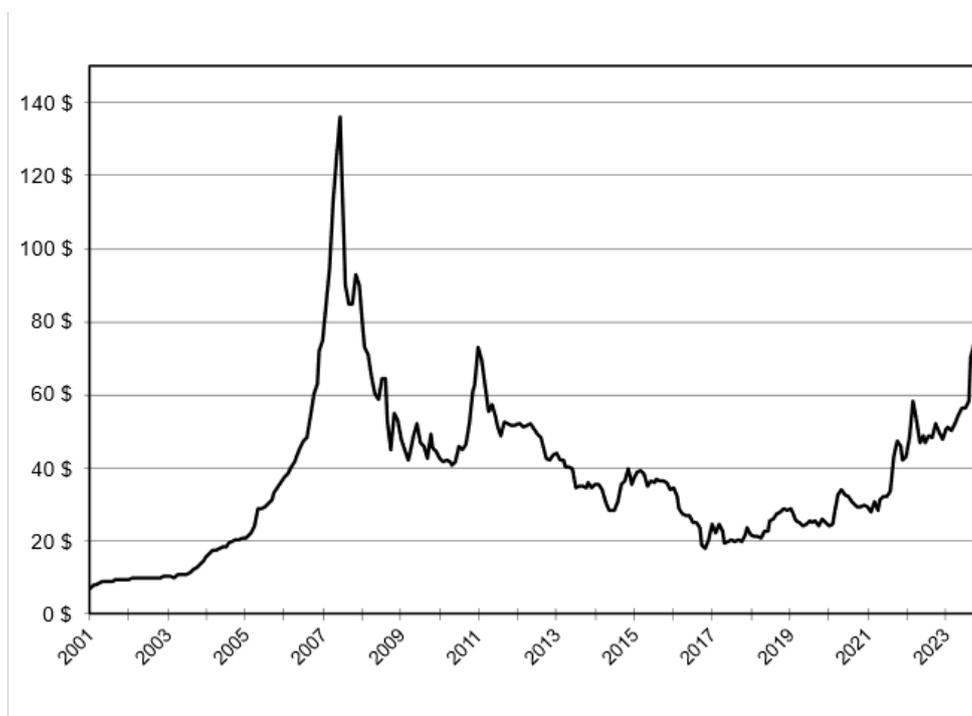
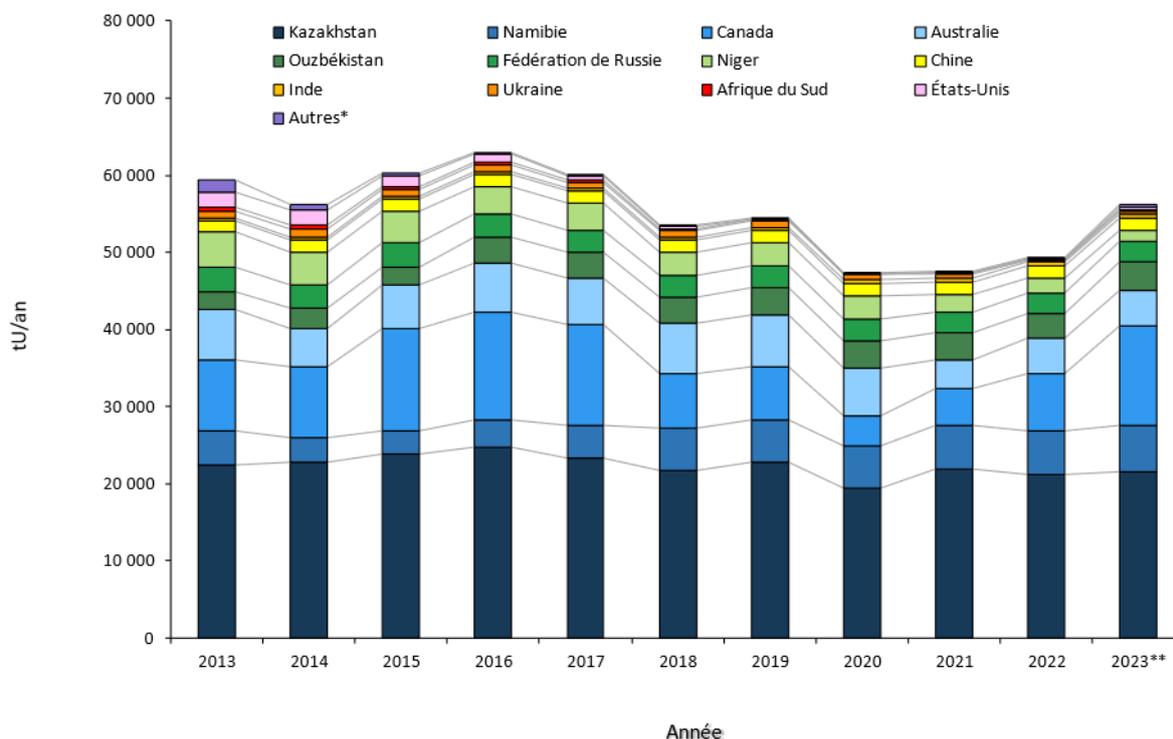


FIG. B.1. Évolution du prix au comptant de l'uranium entre 2001 et 2023
(jusqu'en octobre 2023 ; source : UxC)

57. D'après la publication conjointe de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN) et de l'AIEA intitulée *Uranium 2022 : Ressources, production et demande* (édition 2022 du Livre rouge) consacrée aux années 2019 et 2020, la production des mines d'uranium dans le monde a reculé de 13 %, passant d'une année à l'autre de 54 478 tonnes d'uranium (tU) à 47 342 tU. Ces dernières années, les principaux pays producteurs,

dont le Canada et le Kazakhstan, ont limité leur production totale en raison de la faiblesse des prix du marché qui sont demeurés bas jusqu'à la première moitié de 2021. En outre, l'affaissement de la production a été accentué de manière inopinée par la pandémie mondiale de COVID-19 survenue en 2020 et 2021.

58. Selon l'édition 2022 du Livre rouge, au 1^{er} janvier 2021, la capacité totale de production des mines improductives s'élevait à 29 410 tU supplémentaires par an, et il y avait au moins 335 000 tonnes supplémentaires de réserves d'uranium récupérables dans le sol. Ces installations, qui ont les licences, les permis et les accords nécessaires à leurs activités et dont la production était commercialisée par le passé, pourraient reprendre leurs activités de production relativement rapidement (d'ici un an ou deux). Cependant, d'après les premières données de l'édition 2024 du Livre rouge, il semblerait que la production d'uranium connaisse un rebond et ait quelque peu augmenté pour atteindre 47 504 tU en 2021, 49 336 tU en 2022 et finalement 56 143 tU en 2023, ce qui correspond à la moyenne de production des dix années ayant précédé la pandémie de COVID-19. D'après les estimations, les quatre premiers pays producteurs d'uranium – l'Australie, le Canada, le Kazakhstan et la Namibie – auraient augmenté leur production d'environ 2 %, 76 %, 1 % et 7 %, respectivement, en 2023 par rapport à 2022.



* Les « autres » comprennent les autres petits producteurs.

** Estimations de l'OCDE/AEN-AIEA.

FIG. B.2. Évolution de la production mondiale d'uranium (2013-2023).

59. Les ressources classiques d'uranium récupérable recensées dans le monde (c'est-à-dire celles dont l'existence est certaine ou raisonnablement supposée dans les types de gisements géologiques habituellement exploités) suffisent à soutenir la croissance de la capacité de production d'énergie d'origine nucléaire à court et à moyen terme. L'édition 2022 du Livre rouge indique que, parmi les ressources d'uranium répertoriées, plus de 6 millions de tonnes sont récupérables aux prix du marché actuel, ce qui, compte tenu des besoins mondiaux pour alimenter les réacteurs (60 114 tU en 2020), permettrait de couvrir les besoins sur plus d'une centaine d'années.

60. Par le passé, le déficit de l'offre primaire d'uranium a été comblé par des sources secondaires. Cela étant, il se resserre et devrait continuer à se resserrer jusqu'en 2040. La hausse récente et soutenue du prix au comptant de l'uranium a relancé la production industrielle de ce dernier, et quelques producteurs ont redémarré leurs activités interrompues du fait de la fermeture de sites pour entretien et maintenance en raison de la faiblesse des prix pendant de longues années. Parmi ces producteurs figurent la mine Honeymoon en Australie, la mine McArthur River et l'usine de préparation de minerais Key Lake au Canada et l'exploitation Smith Ranch-Highland aux États-Unis d'Amérique, qui reprennent toutes leurs opérations entre 2022 et 2024, ainsi que la mine de Langer Heinrich en Namibie, qui devrait redémarrer ses activités en 2025.

61. Selon l'édition 2022 du Livre rouge, les dépenses de prospection et d'exploitation minières dans le monde ont légèrement augmenté en 2021, atteignant presque 280 millions de dollars des États-Unis. Cela représente une hausse de 10 % par rapport à 2020, après une baisse de 1,88 milliards de dollars des États-Unis entre 2014 et 2020. D'après les premières données de l'édition 2024 du Livre rouge, la nette augmentation des dépenses devrait s'être poursuivie en 2022 et en 2023. Un programme élargi de prospection a ainsi été annoncé en 2023 par NexGen Energy près du gisement Arrow dans le bassin de l'Athabasca au Canada.

62. Le marché de la production de combustible a toujours été caractérisé par une forte concurrence entre les fabricants et les fournisseurs. À l'heure actuelle, la capacité de production de combustible dépasse la demande, tant au niveau mondial que régional.

63. La production de combustible nucléaire est une technologie éprouvée, qui s'est continuellement améliorée au fil des ans grâce à l'automatisation et à la numérisation du processus de fabrication, à la réduction du volume de déchets issus de l'exploitation et à l'amélioration de la radioprotection des travailleurs. Dans le même temps, il y a eu de nouvelles avancées dans de nombreux pays pour améliorer l'économie des réacteurs nucléaires (augmentation du taux de combustion et prolongation de la durée du cycle du combustible) et la fiabilité opérationnelle des combustibles nucléaires (réduction du nombre de défaillances).

64. Certains États Membres souhaitent accroître l'utilisation de combustibles à base d'uranium retraité et d'uranium-plutonium dans les réacteurs à eau ordinaire (REO) pour optimiser l'utilisation des ressources fissiles naturelles. Plusieurs États Membres, dont la Fédération de Russie, la France, l'Inde et le Japon, ont l'intention d'utiliser du combustible mixte uranium-plutonium dans les réacteurs à neutrons rapides. Certains, qui exploitent des RELP, ont commencé à remplacer l'uranium naturel utilisé dans les cœurs de leurs réacteurs par de l'uranium légèrement enrichi afin d'améliorer la compétitivité de leurs installations.

65. Plusieurs États Membres, dont la Belgique, le Canada, la Chine, l'Espagne, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, le Japon et la République de Corée, mènent actuellement des programmes de recherche, développement et démonstration visant à déployer des combustibles résistant aux accidents (ATF) dans les parcs de réacteurs actuels, ce qui passe par la fabrication de barres et d'assemblages d'essai principal, l'irradiation et des examens après irradiation, l'évaluation de la performance du combustible, la thermohydraulique des systèmes, ou encore l'élaboration et la validation de codes en cas d'accident grave. Les ATF, qui contiennent de nouveaux matériaux, disposent de certaines caractéristiques qui devraient permettre d'exploiter plus longtemps et plus efficacement les réacteurs en allongeant jusqu'à deux ans l'intervalle entre les arrêts pour rechargement, améliorant ainsi l'économie des centrales nucléaires. Certains États Membres mettent au point des technologies de fabrication de pointe, telles que la fabrication additive (à l'aide d'imprimantes tridimensionnelles par exemple), ou recourent à l'IA et à des procédés de fabrication de combustible entièrement automatisés pour mettre sur le marché des combustibles innovants et dopés.

66. Certains modèles de RFPM-PRM utiliseront des combustibles traditionnels (semblables à ceux faiblement enrichis couramment utilisés dans les grands réacteurs). Cela étant, d'autres concepteurs de RFPM-PRM ont opté pour des modèles de combustible plus innovants (en utilisant, par exemple, l'uranium faiblement enrichi à teneur élevée) présentant des avantages supérieurs à ceux qui sont généralement obtenus avec des combustibles classiques. Des travaux de recherche-développement s'intéressent actuellement aux combustibles à dioxyde d'uranium, aux combustibles à mélange d'oxydes (MOX) uranium-plutonium et aux ATF destinés aux RFMP refroidis par eau ordinaire ou lourde, au combustible cermet pour RFMP refroidis par eau ordinaire terrestres et flottants, aux combustibles TRISO pour RFMP à haute température refroidis par gaz ou sels fondus ou à conduites de chaleur, aux combustibles à alliages métalliques ou céramiques pour RFMP à neutrons rapides refroidis par métal liquide ou gaz ou à conduites de chaleur, ainsi qu'aux combustibles à base de sels fondus pour RFMP refroidis par sels fondus. Ces combustibles nécessiteront toutefois des usines de fabrication et des chaînes d'approvisionnement distinctes ou entièrement nouvelles. Il faudra aussi procéder à la qualification de ces combustibles innovants et octroyer les autorisations nécessaires à leur utilisation, en particulier de ceux qui présentent des niveaux d'enrichissement plus élevés (par exemple l'UFE+ et l'HALEU), avant de commencer à les déployer à l'échelle industrielle.

Tendances

67. Lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques de 2023 (COP28), 22 pays ont fait une déclaration pour défendre l'objectif ambitieux de triplement de la capacité de production d'énergie d'origine nucléaire d'ici à 2050. Selon les prévisions de l'édition 2022 du Livre rouge, la demande mondiale annuelle d'uranium devrait se situer entre 60 960 tU (hypothèse basse) et 76 592 tU (hypothèse haute) d'ici 2030, et entre 63 040 tU (hypothèse basse) et 108 272 tU (hypothèse haute) d'ici 2040. Néanmoins, si l'introduction des RFMP-PRM entraîne une augmentation de la demande, comme l'indique le rapport de l'Association nucléaire mondiale sur le combustible nucléaire intitulé *Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023-2040* (Hypothèses mondiales concernant l'offre et la demande pour la période 2023-2040), les besoins mondiaux annuels en uranium pourraient se situer entre 86 914 tU (hypothèse basse) et 184 316 tU (hypothèse haute) d'ici à 2040.

68. Au fur et à mesure de leur mise en service entre 2023 et 2040, les sites d'extraction prévus ou potentiels de 19 pays pourraient contribuer à obtenir une capacité nominale de production mondiale de 77 138 tU par an au total. Pour garantir l'approvisionnement en uranium, il faudra remettre en service les mines improductives et mettre en service les sites d'extraction prévus ou potentiels. En outre, il faudra que les conditions de marché soient durablement favorables pour soutenir la mise au jour de nouveaux gisements. Ce point est particulièrement important pour l'implantation de nouvelles mines d'uranium, laquelle prend en moyenne 10 à 15 ans (de la découverte du gisement aux opérations d'extraction minière). En outre, le cas échéant, il conviendra de mobiliser en temps voulu des investissements importants dans les technologies de prospection et d'extraction/de traitement, notamment pour trouver des techniques d'extraction de l'uranium qui soient rentables afin d'exploiter des types de gisements non classiques (par exemple les gisements de phosphate et de schiste noir uranifères).

Prévisions du Livre rouge 2022



69. Parmi les innovations et les avancées relativement récentes susceptibles de transformer des gisements d'uranium insignifiants et peu rentables en mines productives figurent la récupération in situ d'uranium dans des gisements associés à une discordance, comme le gisement Phoenix dans le bassin de l'Athabasca au Canada ; la biolixiviation in situ des gisements d'uranium de type gréseux, comme le gisement d'uranium 512 en Chine, où des expériences in situ sont actuellement menées ; la valorisation de l'enrichissement de l'uranium à faible teneur, comme cela est actuellement mis en place pour le gisement de caliche de Marenica en Namibie ; et le procédé d'extraction de ressources par trou d'accès à la surface, nouvelle méthode d'extraction innovante et modulable qui permet l'exploitation de gisements à haute teneur relativement petits, qui sont soit trop petits, soit trop profonds pour être exploités de manière économique au moyen de méthodes d'exploitation souterraines ou à ciel ouvert. En outre, les techniques de lixiviation en tas, généralement utilisées pour l'extraction de métaux dans d'autres types de gisements minéraux, semblent prometteuses pour certaines activités liées à l'uranium.

70. Un assemblage combustible n'est pas une marchandise fongible, mais un produit complexe découlant d'activités de conception, de délivrance d'autorisation et de recherche-développement qui 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 l'entreprise des services publics, et les prescriptions régionales ou nationales en matière d'autorisation. Par ailleurs, on peut classer les dernières avancées réalisées dans les technologies de conception et de fabrication du combustible en deux catégories principales : d'une part, les combustibles évolutifs ou révolutionnaires élaborés pour les parcs de réacteurs existants, qui peuvent renforcer la sûreté et améliorer la performance, l'économie des opérations et la gestion des déchets ; et d'autre part, les combustibles évolutifs ou révolutionnaires mis au point pour des réacteurs avancés, dont les RFMP-PRM.

71. Certains États Membres ont déjà envisagé de mettre en place, vers le milieu 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 de rendre possible l'exploitation sûre et économique 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).

72. Cela étant, au cours des dix prochaines années, l'industrie de production de combustible nucléaire devra répondre à une demande croissante concernant tous les types de combustible, du fait de l'augmentation du nombre de programmes de construction – tant dans les pays déjà dotés de réacteurs que dans les pays primo-accédants – et des objectifs ambitieux de mise au point de nouveaux types de combustibles, par exemple pour les RFMP-PRM et les réacteurs avancés. De nombreux modèles d'ATF sont actuellement à l'étude, ce qui donne lieu à un large éventail de solutions présentant différents niveaux de complexité. Certains seront relativement faciles à fabriquer en faisant appel aux chaînes et installations de fabrication existantes, tandis que d'autres en nécessiteront de nouvelles. Les ATF améliorés et les combustibles nucléaires innovants devront être enrichis à plus de 5 % (l'UFE+ et l'HALEU seront nécessaires à la fabrication de nombre de combustibles innovants). Toutes les étapes du développement des technologies 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 RFMP-PRM.

73. Pour utiliser les combustibles UFE+ et HALEU, il est essentiel de mettre au point de nouveaux colis de transport adaptés et certifiés. Actuellement, des programmes de production d'HALEU sont envisagés en Amérique du Nord et dans la Fédération de Russie. La Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom » est techniquement capable de produire de l'UFE+ et de l'HALEU enrichis en ^{235}U jusqu'à 19,75 %, sous différentes formes. Dans la plupart des pays, la réglementation de l'infrastructure actuelle du cycle du combustible nucléaire limite l'enrichissement en ^{235}U à 5 %. Cela étant, dans les dix prochaines années, la demande en HALEU pourrait fortement évoluer en raison du déploiement massif de RFMP-PRM (nombre de ces nouveaux modèles de réacteurs requièrent soit de l'UFE+, soit de l'HALEU). Aux États-Unis d'Amérique, la société Centrus Energy a commencé à faire la démonstration de la production d'HALEU en octobre 2023. Elle augmentera sa production progressivement au fur et à mesure de l'augmentation de la demande. Enfin, URENCO a annoncé être prêt à fournir du combustible UFE+ sur les marchés internationaux, envisage la construction d'une usine dédiée à la production d'HALEU et a signé un accord de consortium avec Orano pour mettre au point des cylindres de transport du combustible UFE+ et HALEU.

B.2. Partie terminale

Situation

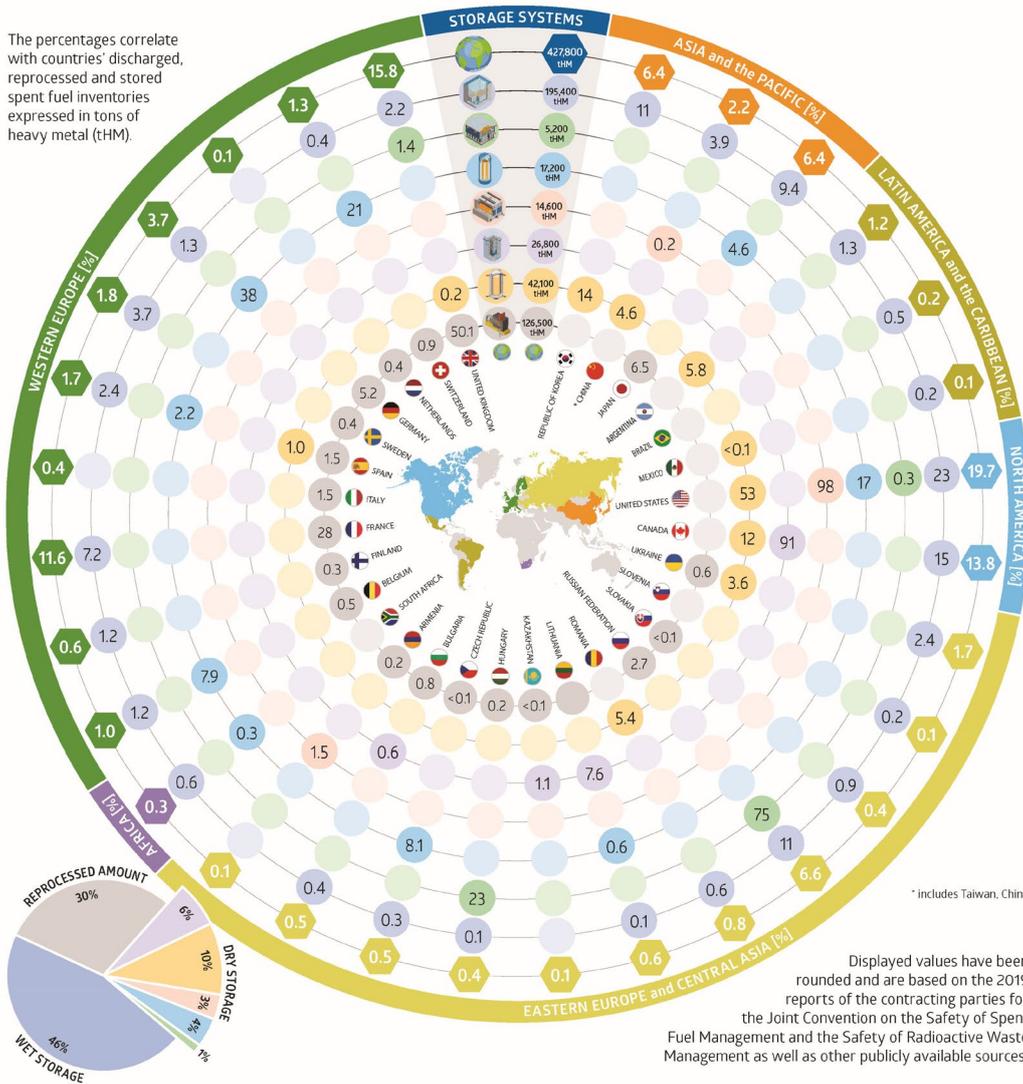
74. Les stocks de combustible nucléaire usé s'accumulent dans le monde au rythme d'environ 7 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, leur volume total dépassant les 300 000 t ML. Pour les pays dotés de programmes nucléaires établis de longue date qui suivent des stratégies de cycle ouvert, les principales difficultés à surmonter demeurent la nécessité d'augmenter les capacités d'entreposage du combustible nucléaire usé et l'allongement de la durée d'entreposage avant stockage définitif. Dans certains 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, en Slovaquie et en Slovénie) ou sont prévues (par exemple au Japon). Le Département de l'énergie des États-Unis a lancé une initiative en faveur d'une approche fondée sur le consentement pour l'implantation d'une ou de plusieurs installations fédérales renforcées d'entreposage provisoire.

75. Les États Membres continuent de procéder à l'enlèvement et à la relocalisation de leur combustible nucléaire usé dans le cadre des projets de déclassement de leurs centrales nucléaires. De nouvelles technologies ont été mises en place pour améliorer les techniques d'inspection. Il s'agit principalement de nouvelles plateformes robotiques, qui sont utilisées pour les outils d'inspection des systèmes d'entreposage du combustible nucléaire usé. Dans certains pays, le transport du combustible nucléaire usé est une opération de routine. Ces dernières années, face à l'augmentation des stocks, de nouveaux colis d'entreposage et de transport ont été mis au point, autorisés et utilisés.

SPENT FUEL MANAGEMENT THE INVENTORY STATUS



The percentages correlate with countries' discharged, reprocessed and stored spent fuel inventories expressed in tons of heavy metal (tHM).



En savoir plus



FIG. B.3. Systèmes d'entreposage du combustible nucléaire utilisé dans le monde.

76. La prolongation de la durée de vie de certaines centrales nucléaires contribue à l'augmentation du volume de combustible nucléaire usé à entreposer. La fermeture d'usines de retraitement au Royaume-Uni a entraîné une nette réduction de la capacité mondiale de retraitement. À l'échelle commerciale, la mise au point de nouvelles technologies de recyclage des combustibles utilisés dans le parc actuel de réacteurs et les réacteurs avancés se poursuit en Fédération de Russie, en France, en Inde et au Japon. Ce dernier prévoit de démarrer l'exploitation commerciale de l'usine de retraitement de Rokkasho en 2024. Aux États-Unis d'Amérique, Oklo a soumis à la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) un plan décrivant les actions préalables à la demande d'autorisation d'une usine de retraitement commerciale. La Fédération de Russie modernise les usines de retraitement RT-1 et ODC du complexe nucléaire Maïak pour améliorer leurs capacités de retraitement du combustible nucléaire usé et leur efficacité.

Tendances

77. La connaissance du comportement des éléments combustibles nucléaires usés dans les différents systèmes d'entreposage et des mécanismes de vieillissement et de dégradation des structures, systèmes et composants des lieux d'entreposage reste essentielle pour continuer à assurer l'entreposage de ces éléments en toute sûreté, puis leur transport vers des installations de stockage définitif ou de retraitement. Les programmes de stockage définitif du combustible usé progressent et approchent de la phase finale de construction dans certains États Membres ; parallèlement, on constate un accroissement du nombre d'activités menées pour préparer cette opération, notamment l'élaboration de programmes de caractérisation. Il est particulièrement important de poursuivre ces efforts dans la mesure où les gains d'efficacité supplémentaires qui ont pu être réalisés dans les réacteurs du fait de la production de combustibles usés ayant des taux de combustion et d'enrichissement initiaux plus élevés ont eu pour effet de générer une puissance thermique plus élevée et d'entraîner des risques accrus de fragilisation des gaines, ce qui peut avoir une incidence sur les étapes suivantes de la gestion du combustible usé.

78. Dès lors que de nouveaux combustibles destinés au parc de réacteurs existant (par exemple des combustibles dopés) et aux modèles de réacteurs avancés (notamment les RFMP-PRM) sont envisagés, et sachant qu'ils pourraient avoir un comportement différent au stade de la gestion du combustible usé, il faudra trouver pour cette dernière des solutions innovantes susceptibles d'être appliquées le moment venu. L'Agence coordonne des activités internationales de recherche dans ce domaine afin de favoriser la mise en commun d'informations, d'améliorer les connaissances et de renforcer les capacités parmi les États Membres, et ce, grâce à la collecte de données sur l'expérience d'exploitation, aux résultats des travaux de recherche et à des approches politiques et stratégiques.

79. Malgré la réduction globale des capacités mondiales de retraitement du combustible usé, la mise au point de technologies de recyclage de pointe suscite un intérêt croissant tant pour ce qui concerne les combustibles actuels que sous l'angle des efforts engagés pour favoriser le déploiement de réacteurs avancés et de RFMP-PRM et en améliorer la viabilité. 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. Certains pays commencent à examiner et à élaborer des initiatives visant à gérer de manière intégrée le combustible usé et les déchets radioactifs. D'autres ont déjà avancé dans ce sens. Le déploiement de nouveaux réacteurs et des cycles du combustible associés constituera un défi majeur et, pour le relever, il sera 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

80. Au total, 210 réacteurs nucléaires ont été retirés définitivement du service dans le monde, dont 23 ont été entièrement déclassés⁴. Ces réacteurs à l'arrêt sont répartis dans 21 pays d'Europe, d'Asie et d'Amérique du Nord. Plus des deux tiers d'entre eux, qu'ils soient déclassés ou en cours de déclassement, se concentrent dans cinq pays, à savoir l'Allemagne (33), les États-Unis d'Amérique (41), la France (14), le Japon (27) et le Royaume-Uni (36). C'est pourquoi les plus grands programmes de déclassement de réacteurs de puissance sont actuellement menés dans ces pays, bien que plusieurs autres, dont la Bulgarie, le Canada, l'Espagne, la Fédération de Russie, l'Italie, la Lituanie, la République de Corée, la Slovaquie et la Suède, ainsi que Taïwan (Chine), aient également des projets de déclassement de réacteurs de puissance en cours de réalisation.



81. Les principaux événements survenus en 2023 en matière de déclassement concernent les mises à l'arrêt définitives de cinq réacteurs de puissance dans le monde, dont les derniers réacteurs de puissance en Allemagne (Emsland, Isar-2 et Neckarwestheim-2), un réacteur de puissance en Belgique (Tihange-2) et un réacteur à eau bouillante à Taïwan, en Chine (Kuosheng-2). Le nombre de ces mises à l'arrêt correspond à celui de la moyenne de ces dix dernières années. Cela étant, les exploitants souhaitent toujours vivement porter à 60 ans ou plus la durée de vie des réacteurs construits dans les années 1980.

réacteurs nucléaires ont été définitivement mis à l'arrêt

82. Le déclassement des réacteurs de recherche, dont environ 450 ont été entièrement déclassés dans le monde, est aussi l'occasion de continuer à acquérir une expérience considérable en la matière. Pour l'heure, 67 réacteurs de recherche sont en cours de déclassement.

83. Des activités de déclassement d'envergure sont également en cours dans des installations du cycle du combustible du monde entier, y compris sur plusieurs sites aux États-Unis d'Amérique, dans la Fédération de Russie, en France et au Royaume-Uni.

84. Des progrès techniques considérables ont été faits dans le cadre de plusieurs projets de déclassement en cours, parmi lesquels figure l'achèvement par Enresa des travaux de restauration sur le site de la centrale nucléaire José Cabrera mise à l'arrêt définitif. Cette centrale est la toute première à avoir été entièrement démantelée en Espagne (Fig. C.1).

⁴ D'après les données disponibles dans la base PRIS [[PRIS – Accueil \(iaea.org\)](https://www.iaea.org/pris)] au 31 décembre 2023. Données extraites le 6 juin 2024.



*FIG. C.1. Ancienne enceinte de confinement du site de la centrale nucléaire José Cabrera.
(Source : Enresa)*

85. En outre, en septembre 2023, l'exploitant de la centrale nucléaire de Brennilis a obtenu du Gouvernement français le décret autorisant le démantèlement total de l'installation. Ce décret ouvre la voie à des travaux de démantèlement complet du bâtiment du réacteur, à la rénovation des ouvrages de génie civil, à la démolition des composants excédentaires restants et à l'assainissement final du site.

86. Par ailleurs, des progrès considérables ont été réalisés dans le cadre du programme de fin de cycle de l'Agence japonaise de l'énergie atomique. C'est ainsi que le réacteur surgénérateur à neutrons rapides Monju est entré dans la deuxième phase de son déclassement, qui comprend les préparatifs du démantèlement du composant lié au sodium (par exemple le blindage neutronique) et du composant de production d'électricité (par exemple la turbine), ainsi que l'agrément de l'organisme de réglementation, lequel a été obtenu en février 2023.

87. En octobre 2023, le Service fédéral de supervision environnementale, technologique et nucléaire a autorisé Rosenergoatom à déclasser les tranches 1 et 2 de la centrale nucléaire de Novovoronezh. Le projet devrait se terminer en 2035.



*FIG. C.2. Démantèlement d'un réchauffeur d'eau d'alimentation à haute pression
dans le cadre du déclassement du surgénérateur Monju. (Source : JAEA)*

Tendances

88. Même si l'on ignore encore à quel rythme les installations seront mises à l'arrêt, le nombre d'opérations de démantèlement en cours d'exécution continue d'augmenter, et l'on observe une tendance à un démantèlement rapide des installations après leur mise à l'arrêt définitive. Cette tendance s'explique notamment par les politiques gouvernementales, par le souhait des propriétaires d'installations de réduire autant que possible les coûts associés à un entretien sur le long terme et par la difficulté à calculer le coût d'un démantèlement à plus ou moins brève échéance et de la gestion des matières qui va de pair avec ces opérations.

89. Par ailleurs, l'application des principes de l'économie circulaire aux projets de déclasserment suscite de plus en plus d'intérêt. Ainsi, le caractère durable du déclasserment se constate à différents niveaux. Il se traduit notamment par une utilisation plus efficace des matériaux de déclasserment pour tenter de réduire au minimum le volume de déchets qui doivent être stockés définitivement et par une meilleure prise en considération de la réutilisation/réaffectation des sites ou des installations à l'appui de futurs projets industriels. Toutefois, avant de pouvoir passer à une économie circulaire, il convient d'obtenir la collaboration de diverses parties prenantes – des responsables politiques aux collectivités en passant par les organismes de réglementation – qui ne partagent pas nécessairement les mêmes idées et les mêmes attentes quant à l'acceptation de la radioactivité dans la vie quotidienne.

90. À l'avenir, les technologies numériques joueront un rôle de plus en plus important dans le cadre du déclasserment nucléaire. Parmi les avantages importants qu'elles présentent, citons l'efficacité et l'utilisation optimale des ressources humaines, financières et technologiques disponibles, la sûreté radiologique qui permet de réduire autant que possible l'exposition de la main-d'œuvre, les processus de réglementation et la participation des parties prenantes qui aident à mieux connaître les activités de déclasserment, et la gestion des connaissances pour un transfert efficace des informations et des données d'expérience entre les personnels actuels et futurs.

91. Parmi les autres évolutions étroitement liées à l'intégration croissante de la numérisation, l'on peut mentionner l'utilisation de robots mobiles qui aident à analyser l'état physique des structures et leur situation au plan radiologique et l'utilisation d'outils télécommandés pour le traitement des déchets, les opérations d'emballage et les opérations dans des zones difficiles d'accès, par exemple en raison de débits de dose élevés.

92. Les technologies numériques présenteront de nombreux autres avantages pour la filière nucléaire dans son ensemble et permettront aux concepteurs d'installations nucléaires, aux exploitants et aux organismes de réglementation, ainsi qu'aux diverses parties prenantes de futurs projets de déclasserment, d'obtenir beaucoup plus facilement les connaissances acquises dans le cadre des projets de déclasserment actuels.

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

Remédiation environnementale

93. Les activités de remédiation environnementale se concentrent principalement sur quatre types de sites contaminés : les sites nucléaires (à terme dans le cadre d'un projet de démantèlement), les anciens sites d'extraction et de traitement de l'uranium, les sites qui ont été le théâtre d'accidents radiologiques et les sites où ont eu lieu des activités non liées à la branche nucléaire ayant laissé sur place des résidus/déchets qui doivent être gérés de façon adéquate (par exemple Fig. C.3).



FIG. C.3. Entreposage temporaire des résidus de matières radioactives naturelles. (Source : AIEA)

94. En 2023, les activités de remédiation se sont poursuivies à un rythme stable dans le monde entier. Au Royaume-Uni, l’Autorité du déclassé nucléaire, chargée au départ de l’assainissement des 17 sites nucléaires civils les plus anciens du pays, a étendu son programme de travail au parc de réacteurs avancés refroidis par gaz. Aux États-Unis d’Amérique, 91 des 107 sites du pays ont traité leurs eaux et sols contaminés. Plus de 179 000 conteneurs de déchets transuraniens ont été stockés définitivement. À la fin de 2023, environ 6 800 hectares avaient été assainis. Dans l’État de Washington, le réacteur B du site de Hanford, qui fait désormais partie du parc national du projet Manhattan mené avec le Laboratoire national d’Oak Ridge et le Laboratoire national de Los Alamos, a terminé d’importantes activités de traitement de l’eau des cuves et a atténué les risques en modernisant et en améliorant les installations. De plus, des activités d’assainissement sont en cours sur 16 sites, bien qu’elles soient relativement difficiles à mener en raison du caractère unique des déchets radioactifs présents.

Gestion des matières radioactives naturelles

95. Outre les déchets radioactifs, de nombreux pays éprouvent également des difficultés à traiter de grandes quantités de résidus contenant des niveaux variables de radionucléides naturels (NORM) qui résultent d’activités menées en dehors du secteur nucléaire.

96. Sous-produit de fabrication d'engrais à base de sulfate de calcium, le phosphogypse est produit en grandes quantités. Son transport et son entreposage à long terme entraînant des coûts en termes d'investissement et d'exploitation, il est abandonné dans bien des cas dans des décharges à ciel ouvert, souvent situées dans des zones dégagées. Ces décharges de phosphogypse ont souvent un effet néfaste sur l'environnement qui se traduit par la contamination des eaux souterraines, des eaux de surface et du sol.

97. Le phosphogypse contient des terres rares, du fer, du titane, du magnésium, de l'aluminium et du manganèse, mais aussi des métaux lourds toxiques. Nombre des terres rares figurent sur la liste des matières premières « critiques » de l'Union européenne. Toutefois, le phosphogypse peut être utilisé de plusieurs manières : pour le soubassement des chaussées, l'avantage étant qu'il est peu onéreux et aussi efficace – si ce n'est plus – que les matériaux de base utilisés à l'heure actuelle ; pour l'amendement des terres agricoles en fournissant au sol le soufre dont il a tant besoin, ainsi que pour le compostage afin d'accélérer la dégradation des déchets et de prolonger la durée de vie d'une décharge ; enfin, pour la fabrication de tuiles en céramique ou de substrats marins, tels que les collecteurs de naissain d'huîtres. Il est possible de valoriser les résidus découlant d'autres activités en adoptant des approches semblables, et la vente de ces matériaux peut permettre de réinvestir dans la remédiation des sites contaminés. Toutes ces possibilités sont autant de solutions éventuelles, en particulier pour les États Membres à faible revenu qui ne disposeraient pas autrement des ressources nécessaires pour assainir ces sites.

Tendances

Remédiation environnementale

98. S'il est vrai que les activités de remédiation des sites contaminés se poursuivent dans le monde entier, la tendance à ne pas seulement se contenter d'atténuer les risques mais à adopter une optique plus large d'agrégation des valeurs, sans compromettre la sûreté, gagne du terrain chez les responsables de ces travaux. Selon les principes de l'économie circulaire, il convient de mettre l'accent sur la revalorisation du site à la fin des opérations aussi bien nucléaires que non nucléaires. S'ils sont bien menés, les travaux de remédiation contribueront largement à faire accepter l'électronucléaire comme source d'énergie susceptible d'aider à atténuer les effets des changements climatiques. Dans cette optique, il convient de trouver des solutions de remédiation durables et résilientes tout en tenant compte des processus décisionnels participatifs en cours.

Gestion des matières radioactives naturelles

99. De nombreux pays ont démontré comment il était possible de réduire au minimum la quantité de résidus de matières radioactives naturelles en adoptant des approches d'économie circulaire (par exemple l'Espagne a utilisé le phosphogypse pour amender des terres agricoles et les Pays-Bas ont utilisé des résidus de matières radioactives naturelles comme stabilisateurs dans des décharges). Il est possible d'extraire des matières critiques à partir de résidus de matières radioactives naturelles mais il faut pour cela recourir à des techniques innovantes. Enfin, il conviendra surtout que les pouvoirs publics suivent des politiques favorables à l'adoption de stratégies de circularité qui seront étayées par une réglementation adaptée à un scénario d'économie circulaire.

C.3. Gestion des déchets radioactifs

Situation

100. Tout au long de 2023, plusieurs pays ont fait de nets progrès en matière de gestion des déchets radioactifs, réaffirmant leur engagement en faveur d'une manipulation et d'un stockage définitif responsables des déchets, ainsi que leur volonté d'adopter des pratiques de gestion plus sûres et plus durables.

101. Les États Membres ayant acquis des dizaines d'années d'expérience dans la mise en œuvre de solutions de gestion des déchets ont continué d'améliorer certains de leurs principaux programmes nationaux. Ainsi, en France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a déposé, en janvier 2023, une demande d'autorisation pour la construction de son installation de stockage géologique dans le cadre du projet Cigéo. En outre, en prévision des déchets qui seront issus du déclassement des centrales nucléaires, elle a présenté une demande de permis environnemental afin d'augmenter sa capacité de stockage définitif des déchets de très faible activité dans son Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES). En Espagne, Enresa a annoncé un accroissement significatif de la capacité de stockage définitif des déchets de faible activité dans l'installation de stockage définitif El Cabril, capacité qui sera jusqu'à quatre fois supérieure. En Suisse, la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) est en attente de l'autorisation de mener des études souterraines à propos du site qu'elle recommande. D'autres États Membres, comme l'Allemagne, le Japon, le Royaume-Uni et l'Ukraine, s'emploient activement à choisir des sites.



*FIG. C.4. Lors de sa visite officielle en France en 2023, le Directeur général Rafael Mariano Grossi s'est rendu à l'installation de l'Andra (Meuse/Haute-Marne), et a notamment assisté à une présentation du Directeur général de l'Andra, Pierre-Marie Abadie, sur le projet Cigéo de stockage définitif des déchets radioactifs en formations géologiques profondes.
(Source : Andra)*

102. En Suède et en Allemagne respectivement, les entreprises Studsvik et Gesellschaft für Nuklear-Service ont signé un accord exclusif pour la mise en œuvre de la technologie « inDRUM » de Studsvik, technologie brevetée pour le traitement des déchets radioactifs problématiques. Dans la Fédération de Russie, l'Université polytechnique de Tomsk et la Société TVEL collaborent à un projet qui utilise des décharges électriques pour accélérer la décontamination du béton radioactif. Cette méthode innovante permet une décontamination plus rapide et plus efficace tout en réduisant au minimum la dispersion des poussières souvent associées aux méthodes traditionnelles de concassage du béton. L'Institut russe de physique et de génie électrique a mis au point une technologie d'oxydation en phase solide du caloporteur sodium des réacteurs à neutrons rapides et a créé une installation industrielle pilote, MINERAL 100/150. Au Royaume-Uni, l'Alliance pour le déclassé – partenariat formé par les sociétés Jacobs, Atkins et Westinghouse Electric Company – met au point une approche innovante permettant de récupérer de manière sûre les débris des piscines de combustible sur un site de l'Autorité du déclassé nucléaire (NDA). L'outil de récupération des boues en vrac, semblable à un aspirateur industriel, a été testé et offre une solution efficace et rentable.



FIG. C.5. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi, en visite officielle en Suède en août 2023, participant à une visite guidée du laboratoire de conteneurs de la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires, devant des fûts destinés à l'entreposage souterrain en profondeur du combustible utilisé. (Source : AIEA)

103. Au cours de la période considérée, plusieurs États Membres à qui il incombe des responsabilités plus récentes et/ou de moindre envergure ont mis en place des structures et des installations nationales. Par exemple, le Bélarus progresse nettement dans la mise en place d'un organisme dédié à la gestion des déchets radioactifs. L'objectif de cet État est de disposer d'une installation d'entreposage à long terme et de stockage définitif qui soit opérationnelle d'ici à 2030, qui accueillerait les déchets produits non seulement par la centrale nucléaire bélarusse, mais aussi par divers secteurs d'activités utilisant des sources de rayonnements ionisants. Les Pays-Bas ont entamé la construction du bâtiment d'entreposage

multifonctions qui est une nouvelle installation destinée à l'entreposage des déchets de faible ou moyenne activité, dont la durée de vie nominale est d'au moins 100 ans. Le Zimbabwe a achevé la construction d'une installation nationale qui centralisera la gestion à long terme des déchets radioactifs et des sources radioactives scellées retirées du service. Enfin, aux Philippines et en République bolivarienne du Venezuela, les conditions de sûreté et de sécurité des installations nationales d'entreposage ont été améliorées, ce qui a permis d'augmenter la capacité d'entreposage disponible à court terme.



*FIG. C.6. L'installation de gestion centralisée des déchets nouvellement construite au Zimbabwe.
(Source : AIEA)*



*FIG. C.7. Amélioration des conditions dans des installations d'entreposage
aux Philippines (à gauche) et en République bolivarienne du Venezuela (à droite).
[Sources : Institut philippin de recherche nucléaire (à gauche)
et Institut vénézuélien de recherche scientifique (à droite)]*

104. En Slovénie, en juillet 2023, l'Agence pour la gestion des déchets radioactifs (ARAO) a commencé à préparer le site choisi en vue de la construction de son installation de stockage définitif des déchets de faible et moyenne activité en établissant les voies d'accès principales, les raccordements nécessaires au réseau public et le contrôle radiologique de référence de l'environnement. En revanche, en Australie, un organe de représentation des propriétaires traditionnels a contesté le choix du site pour une installation de gestion centralisée des déchets radioactifs dans le sud du pays, par suspicion de partialité. Le gouvernement n'a donc pas l'intention de retenir ce site.



FIG. C.8. Préparation du site en vue de la construction d'une installation de stockage définitif des déchets issus de l'exploitation d'une centrale nucléaire en Slovénie. (Source : ARAO)

Tendances

105. La tendance mondiale à l'adoption de principes et de pratiques de gestion intégrée des déchets radioactifs est en train de transformer le secteur nucléaire. Cette approche permet une utilisation durable de la technologie nucléaire grâce à l'optimisation du traitement des déchets, de leur production à leur stockage définitif. Elle exige que les responsables de l'élaboration des politiques et des stratégies se coordonnent pour surmonter les différents obstacles à la définition d'objectifs appropriés, puis pour choisir les bonnes solutions techniques d'intégration de la gestion des déchets radioactifs. La gestion intégrée permet de rationaliser les processus, d'atténuer les risques environnementaux et de favoriser une gestion responsable des déchets radioactifs. La Société de gestion des déchets nucléaires du Canada a adopté une stratégie intégrée de gestion des déchets radioactifs, à l'exception du combustible nucléaire usé. Cette méthode globale comprend le stockage définitif des déchets de moyenne activité et des déchets de haute activité non combustibles dans un dépôt géologique profond ainsi que le stockage définitif des déchets de faible activité dans des installations en surface ou à faible profondeur.

106. L'intérêt que suscite le déploiement des RFPM-PRM parmi les États Membres est appelé à transformer le domaine de l'énergie nucléaire. Cependant, ces réacteurs présentent un défi de taille en matière de gestion des déchets radioactifs. Il convient ainsi d'adapter les politiques et les stratégies relatives à ce type de déchets pour qu'elles englobent les RFPM-PRM au fur et à mesure que les pays adoptent cette technologie innovante. Il faudra non seulement consentir des investissements considérables dans les installations de traitement, d'entreposage et de stockage définitif des déchets, mais aussi assurer la formation d'un personnel qualifié. De ce fait, il est important de prendre des dispositions en matière de financement, en particulier s'agissant des installations de stockage définitif, pour faire face à l'évolution des responsabilités en matière de gestion des déchets radioactifs et, partant, garantir un avenir durable à l'énergie nucléaire.

107. La hiérarchisation des déchets radioactifs, qui met l'accent sur la prévention, la minimisation, le recyclage et la réutilisation des déchets, est une tendance que l'on observe de plus en plus. Elle s'explique par la volonté 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. Par exemple, citons

l'installation Western Clean-Energy Sorting and Recycling construite par Ontario Power Generation, qui réduit au minimum les déchets des centrales nucléaires, limitant ainsi les besoins d'entreposage et les coûts de déclasserment. En outre, le recyclage des résidus radioactifs issus de la production de radio-isotopes médicaux et la récupération d'uranium faiblement enrichi (UFE) par l'installation belge RECUMO témoignent également d'un engagement en faveur de la réduction des déchets. De même, la volonté de limiter la production de déchets tout en encourageant la maîtrise de la gestion du tritium est illustrée par l'installation d'extraction de tritium de la Compagnie coréenne d'énergie hydroélectrique et nucléaire en Roumanie. Au Royaume-Uni, les Services de gestion des déchets nucléaires ont publié leur stratégie en la matière, qui s'aligne sur les principes de hiérarchisation des déchets. Cette stratégie privilégie la réduction des déchets, en fixant un objectif de recyclage de 50 % des déchets issus du déclasserment et en visant une réduction d'environ 70 % des déchets secondaires d'ici 2030.

108. Les scientifiques nucléaires réfléchissent à des procédés qui permettraient d'extraire des déchets des matières valorisables pour la fabrication de radio-isotopes destinés à des applications médicales et à l'exploration spatiale. À l'heure actuelle, l'Agence spatiale britannique et le Laboratoire nucléaire national du Royaume-Uni étudient les piles spatiales à l'américium 241. En 2023, 32 sources de haute activité au total ont été enlevées au Chili et en Slovénie. En outre, dans le cadre de l'Initiative mondiale de gestion du radium 226, des sources de radium retirées du service ont été enlevées en Thaïlande. Des échanges ont lieu actuellement dans 17 États Membres, dont la Croatie, El Salvador, l'Espagne, l'Éthiopie, l'Indonésie, la Malaisie et la Slovénie, afin de faire le point sur les sources de radium retirées du service qui seraient disponibles pour la production de radio-isotopes destinés au traitement du cancer.

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

Situation

109. En 2023, les chercheurs du Laboratoire national Lawrence de Livermore aux États-Unis sont parvenus à atteindre le seuil d'ignition de la fusion à au moins trois reprises, reproduisant la réussite spectaculaire qu'avait connue l'Installation nationale d'ignition, en décembre 2022.

110. En février 2023, la société Commonwealth Fusion Systems (CFS) et le Centre de la science des plasmas et de la fusion (PSFC) de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), premier centre collaborateur de l'Agence dans le domaine de l'énergie de fusion, ont fêté l'ouverture officielle du chantier de construction du réacteur SPARC – un tokamak qui devrait permettre de réaliser un gain net d'énergie scientifique. Le SPARC, dont la mise en service est prévue en 2025, devrait atteindre le seuil de l'énergie nette de fusion par la suite. Son successeur, l'ARC, qui devrait être achevé d'ici 2035, pourrait produire de l'électricité à titre de démonstration.

111. En octobre 2023, le tokamak japonais JT-60SA a produit son premier plasma. Haut de quatre étages, il est conçu pour confiner du plasma chauffé à 200 millions de degrés Celsius pendant une centaine de secondes, soit beaucoup plus longtemps que les grands tokamaks précédents. Ses plasmas, très semblables à ceux prévus pour l'ITER, devraient permettre aux physiciens d'étudier la stabilité du plasma et la manière dont elle affecte la production d'énergie de fusion sur un long laps de temps, puis d'en tirer des enseignements qui pourront être appliqués au tokamak de plus grande taille. Par ailleurs, en 2023, l'accélérateur linéaire prototype IFMIF a été installé à Rokkasho (Japon).



*FIG. D.1. Le Directeur général Rafael Mariano Grossi visitant la salle du tokamak SPARC.
(Source : AIEA)*

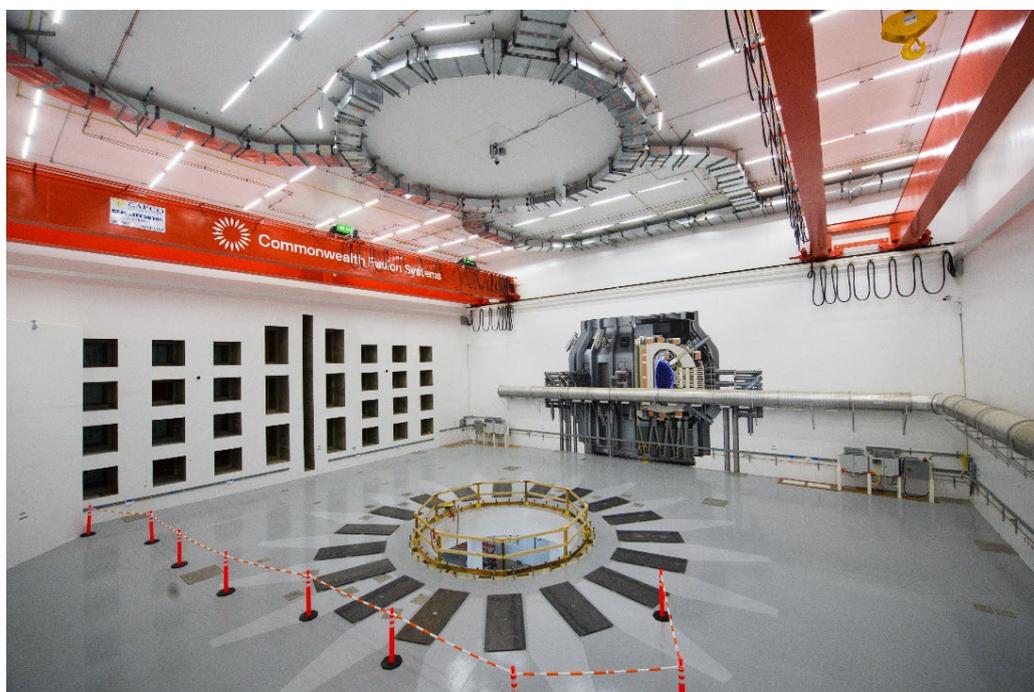
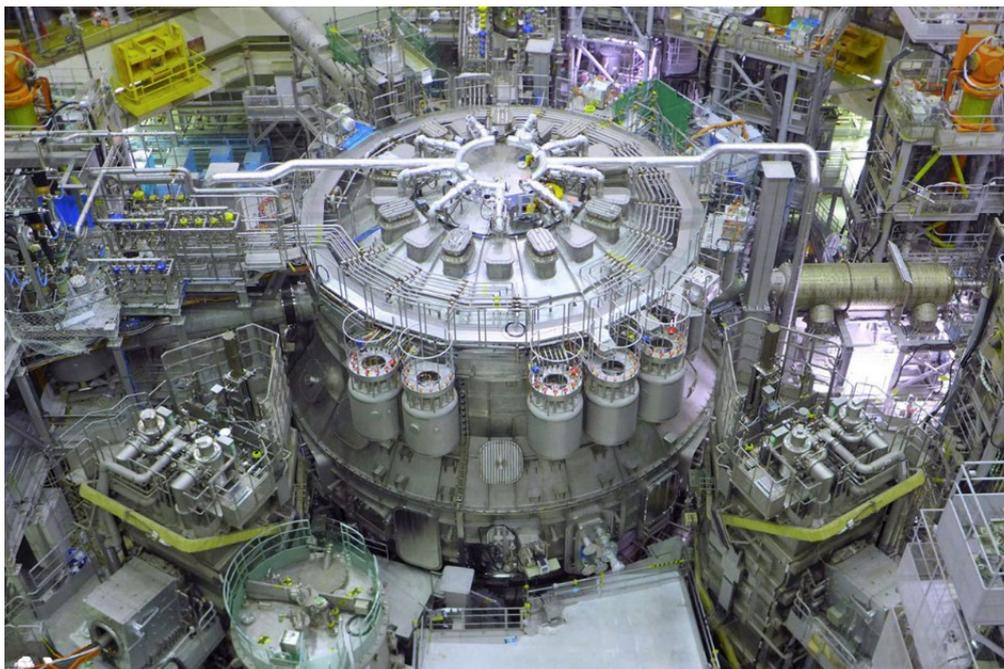
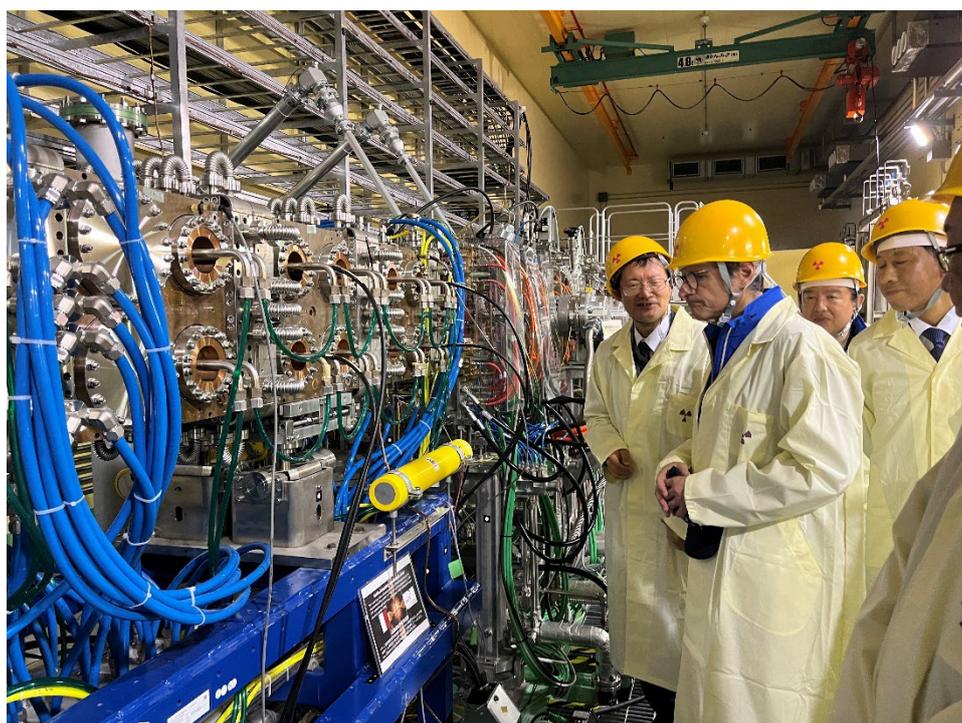


FIG. D.2. La salle du tokamak SPARC prête pour l'assemblage de la machine. (Source : CFS)



*FIG. D.3. Le JT-60SA, conçu et construit conjointement par le Japon et l'Union européenne, est le plus grand tokamak actuellement en service.
(Source : Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques).*



*FIG. D.4. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, visitant l'accélérateur linéaire prototype IFMIF à l'Institut de fusion de Rokkasho lors de sa visite officielle au Japon.
(Source : Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques).*

112. En Chine, le tokamak supraconducteur expérimental avancé (EAST) a réussi à produire un plasma stable en mode de confinement élevé pendant 403 secondes. Cette percée lui a permis d'améliorer son record initial de 101 secondes qu'il avait établi en 2017. Les particules ont été portées à des niveaux de température et de densité très élevés pendant la production de plasma en mode de confinement élevé. Cette avancée permettra d'augmenter l'efficacité de la production d'énergie des futures centrales à

fusion. Toujours en Chine, le tokamak HL-3 a fonctionné pour la première fois en mode de confinement élevé et généré un courant dans le plasma d'un million d'ampères grâce à l'amélioration des systèmes de chauffage, de production, de contrôle, de diagnostic et d'alimentation électrique.

113. En 2023, la France a mis en service le divertor en tungstène du tokamak WEST. Une première campagne expérimentale a été menée. L'idée était de procéder à une série de tirs de plasma d'une minute environ pour produire une fluence neutronique élevée et ainsi prouver la résistance et la performance de ce nouveau composant.

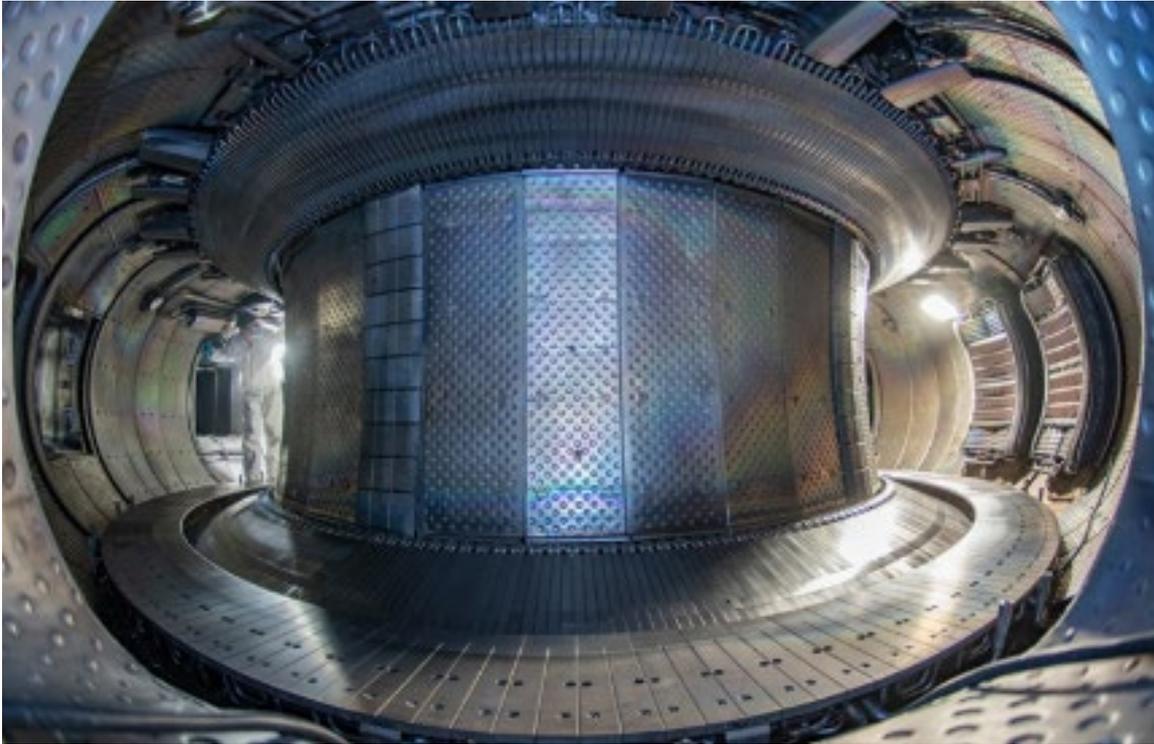


FIG. D.5 Le tokamak WEST équipé de son divertor en tungstène activement refroidi. (Source : CEA)

114. Le déclassement du Tore européen commun (JET) a commencé au terme de 40 ans d'opérations et à l'issue des dernières expériences menées avec le mélange de combustible deutérium-tritium jusqu'à la fin de 2023, et il se poursuivra jusqu'en 2040 environ. Il 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.

115. En Allemagne, les chercheurs travaillant sur le Wendelstein 7-X, le plus grand stellarator du monde, ont réussi à produire une énergie de 1,3 gigajoule (GJ). À l'avenir, ils essaieront d'atteindre une production d'énergie de 18 GJ en maintenant le plasma stable pendant une demi-heure.

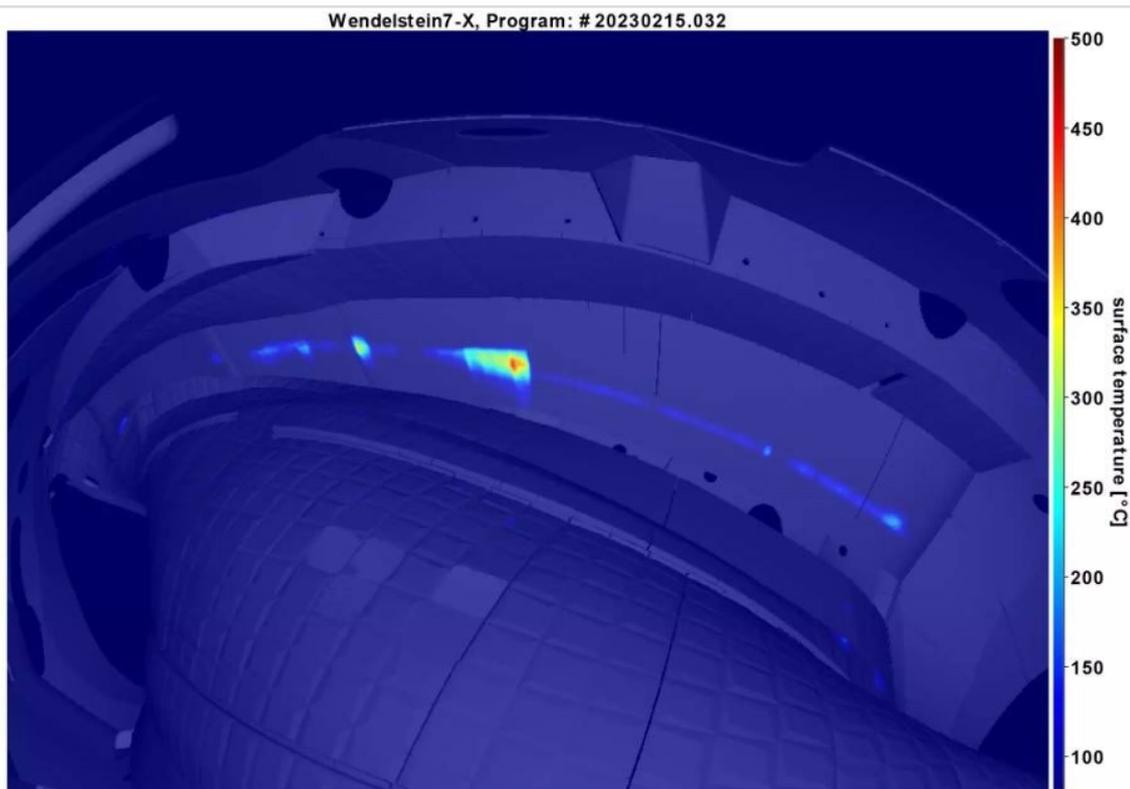


FIG. D.6. Image infrarouge de l'intérieur de la chambre à vide du Wendelstein 7-X montrant la répartition de la température sur les plaques de déviation du diverteur refroidies par eau.

On y voit clairement une ligne définie au centre : c'est à cet endroit que le plasma entre en contact avec le diverteur et que la température est la plus élevée. Dans certaines zones, les températures peuvent atteindre jusqu'à 600 degrés Celsius (zones rouges). Les plaques du diverteur peuvent résister à des températures allant jusqu'à 1 200 degrés Celsius.

(Source : Institut Max Planck de physique des plasmas)

116. En 2023, l'Organisation ITER et ses organismes nationaux ont poursuivi leurs efforts de conception d'un état de référence optimisé pour ITER. Il s'agira notamment de remplacer le matériau de revêtement de la première paroi, à savoir le béryllium, par du tungstène – ce qui devrait améliorer la résilience des composants de la cuve tout en réduisant au minimum la quantité de tritium contenue dans la machine. Des progrès ont été faits sur le plan des réparations des composants clés, ainsi qu'au point de vue de la fabrication, de l'assemblage et de l'installation. L'Organisation ITER a également poursuivi sa coopération avec l'Autorité française de sûreté nucléaire en ce qui concerne l'adoption d'une approche progressive pour l'autorisation, constituée de trois phases opérationnelles expérimentales, chacune devant correspondre à des étapes et à des prescriptions de sûreté particulières pour mener à bien le projet. Les membres du Conseil ont souligné toute l'importance du projet ITER et de sa mission.

117. En Italie, les travaux de construction du DTT (Divertor Tokamak Test), nouveau tokamak supraconducteur consacré à l'étude de solutions avancées de diverteur pour les centrales de démonstration à fusion (DEMO), se sont poursuivis. Composé de nombreux instituts de recherche italiens et partenaires internationaux, dont l'une des plus grandes entreprises énergétiques du monde, le consortium chargé de la mise en œuvre du projet a réuni près de 500 millions d'euros pour la construction de l'installation. Le DTT servira principalement à étudier les phénomènes physiques et à tester la technologie des concepts de dissipation de puissance dégagée par le plasma qui pourraient être utilisés dans la centrale européenne DEMO.

118. Les centrales DEMO ont pour vocation de démontrer le gain net d'énergie électrique obtenu par la fusion. On compte actuellement au moins 12 projets à ce sujet dans le monde (Chine, États-Unis

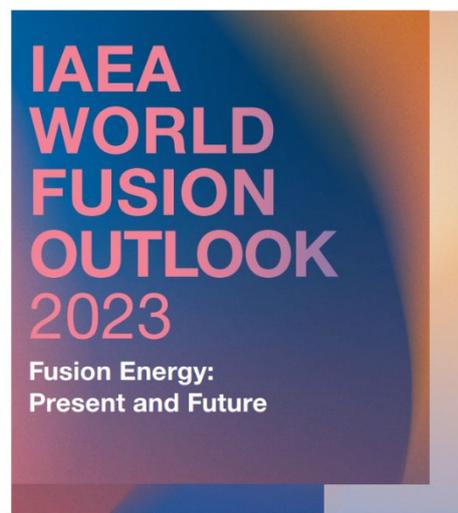
d'Amérique, Fédération de Russie, Japon, République de Corée, Royaume-Uni et Union européenne), plus ou moins avancés, qui devraient s'achever entre 2030 et 2050. Ces projets sont élaborés par des gouvernements, des entreprises privées et certaines coentreprises public-privé (figure D.4).



FIG. D.7. Plus de 140 dispositifs de fusion publics et privés à usage expérimental sont en service, en construction ou à l'étude, et plusieurs organismes envisagent de mettre au point des modèles destinés à des centrales de démonstration à fusion.
(Source : Système d'information sur les dispositifs de fusion, AIEA)

Tendances

119. Lors de la 29^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, organisée à Londres, en octobre 2023, par l'Agence et le Gouvernement britannique, le Directeur général a présenté le premier numéro des « Perspectives de l'AIEA sur la fusion dans le monde », source d'informations de référence au niveau mondial sur les dernières évolutions dans le domaine de l'énergie de fusion, et a annoncé que la première réunion du Groupe mondial de l'énergie de fusion se tiendrait en 2024. Au cours de la conférence, le Royaume-Uni a présenté son programme Fusion du futur (Fusion Futures Programme), qui prévoit l'octroi de 650 millions de livres sterling supplémentaires (793 millions de dollars des États-Unis) dans les cinq prochaines années pour financer un ensemble de programmes de recherche-développement, englobant la création de 2 200 places de formation, une nouvelle installation d'essai du cycle du combustible et la mise en place d'infrastructures pour les entreprises privées du secteur de l'énergie de fusion, notamment sur le campus de Culham de l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni (UKAEA). Cette annonce a fait suite à la décision du pays de quitter le Programme de recherche et de formation d'Euratom. Quelques semaines plus tard, soucieux de faire progresser leurs stratégies nationales en matière d'énergie de fusion, le Ministère



En savoir plus



britannique de la sécurité énergétique et de la neutralité carbone et le Département de l'énergie des États-Unis ont annoncé la formation d'un nouveau partenariat stratégique visant à accélérer la démonstration et la commercialisation de l'énergie de fusion.

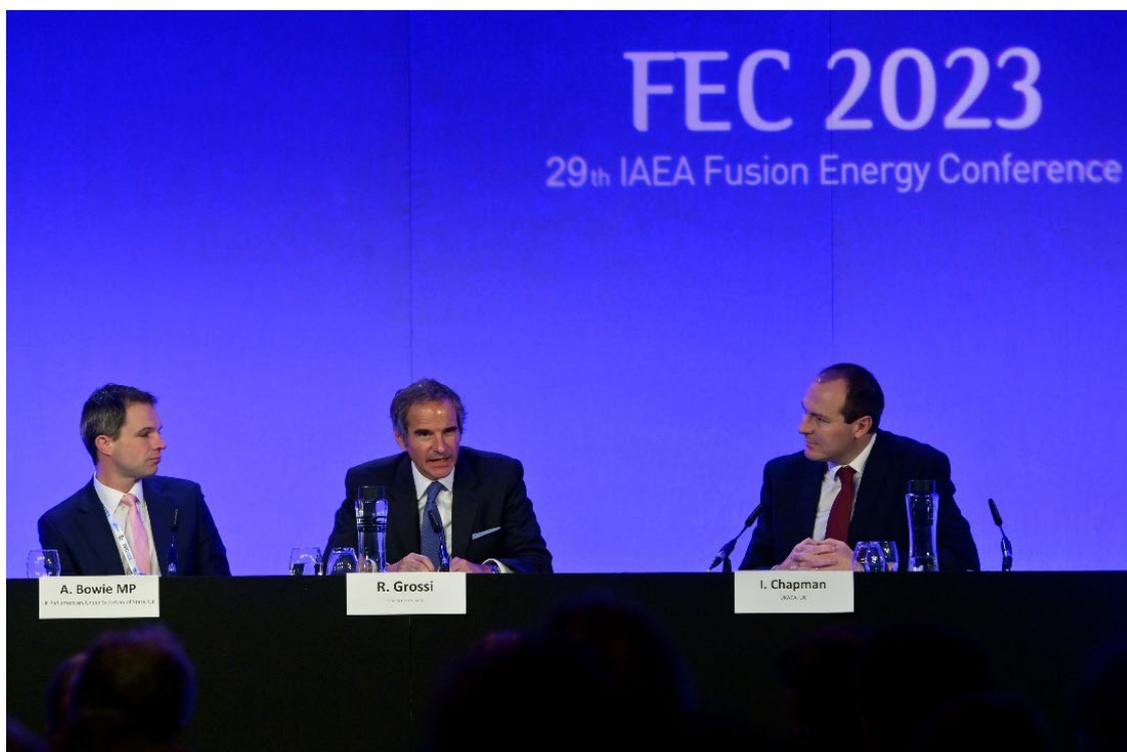


FIG. D.8. Cérémonie d'ouverture de la 29^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion à Londres. De gauche à droite : Andrew Bowie, député, sous-secrétaire d'État (Ministre du nucléaire et des réseaux) au Ministère de la sécurité énergétique et de la neutralité carbone ; Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA ; et Ian Chapman, Directeur général de l'UKAEA. (Source : AIEA)

120. Dans le même temps, en Allemagne, le Ministère fédéral de l'éducation et de la recherche a annoncé qu'il consacrerait plus d'un milliard d'euros à la recherche sur la fusion d'ici à 2028, en plus des 370 millions d'euros (396 millions de dollars des États-Unis) qu'il versera aux instituts de recherche dans les cinq prochaines années.

121. Le Japon a adopté sa première stratégie nationale sur l'énergie de fusion, soulignant la nécessité de créer une industrie dans ce secteur qui accorde une place plus importante à la participation du secteur privé dans la recherche-développement. Le Gouvernement japonais a également annoncé qu'il créerait un conseil de l'industrie de l'énergie de fusion qui sera chargé de mettre sur pied les entreprises connexes et d'élaborer des lignes directrices aux fins de la réglementation de la technologie de l'énergie de fusion. En outre, il érigera en priorité l'enseignement de l'énergie de fusion dans les universités.

122. Le service du Département de l'énergie des États-Unis (DOE) chargé de l'énergie de fusion a publié un document intitulé « Building Bridges », dans lequel il expose sa vision et met en lumière trois objectifs : 1) développer et maintenir la main-d'œuvre – en assurant la mise en place de voies durables pour les talents exceptionnels divers ; 2) combler les lacunes – en créant des moteurs d'innovation avec les laboratoires nationaux, les universités et l'industrie au profit de la R-D et des chaînes d'approvisionnement nationales de l'énergie de fusion ; et 3) appuyer la science transformationnelle – en aidant à progresser dans les domaines de la science et de la technologie du plasma pour faciliter l'innovation. Cette vision s'inscrit dans le cadre d'une stratégie globale en matière de fusion qui vise à faire converger les activités de R-D des secteurs privé et public dans ce domaine.

123. Dans ce secteur de l'énergie de fusion, de nombreuses entreprises privées aspirent à concevoir indépendamment leurs propres dispositifs de recherche et de démonstration et attirent donc de plus en plus d'attention et d'investissements. Ainsi, aux États-Unis, la société privée américaine Helion a annoncé qu'elle avait conclu un accord avec Microsoft pour fournir à cette dernière de l'électricité à partir de sa première centrale à fusion, qui devrait entrer en service d'ici 2028 et produire jusqu'à 50 MW. Helion a également indiqué qu'elle collaborerait avec la société Nucor pour concevoir une centrale à fusion capable de produire, après sa mise en service prévue en 2030, 500 MW destinés à alimenter une aciérie de Nucor.

124. Dans ce contexte de l'énergie de fusion en pleine évolution, des partenariats public-privé commencent à se nouer. En mai 2023, dans le cadre de son programme de développement par étapes de la fusion, le Département de l'énergie des États-Unis a annoncé l'octroi de 46 millions de dollars des États-Unis à huit entreprises pour financer les 18 premiers mois de leurs activités de conception et de recherche-développement relatives aux centrales à fusion. Les entreprises retenues font partie de celles, nombreuses, qui avaient soumis leurs propositions en exposant en détail leurs projets de commercialisation de l'énergie de fusion. Ce n'est que lorsque certaines étapes de commercialisation préalablement établies auront été atteintes et validées par le Département de l'énergie qu'elles recevront ces fonds. Dans le cadre de l'appel à projets « France 2030 », une entreprise s'est vu confier le développement d'un réacteur à fusion stellarator.

125. Chaque année, le secteur de l'énergie de fusion dans son ensemble voit sa part de financement augmenter. Le rapport annuel sur l'industrie de la fusion publié par l'Association de l'industrie de la fusion, intitulé « *The global fusion industry in 2023* » (L'industrie de la fusion dans le monde en 2023), qui est le troisième rapport du genre, montre que l'industrie de l'énergie de fusion attire désormais 6,21 milliards de dollars des États-Unis d'investissement au total (contre 4,8 milliards de dollars des États-Unis en 2022). Il examine un ensemble de 43 entreprises privées spécialisées dans l'énergie de fusion, des entreprises bien établies aux nouvelles venues. Même si les États-Unis d'Amérique continuent d'être aux avant-postes et comptent 25 entreprises en activité dans le domaine de l'énergie de fusion (dont plusieurs des plus grosses), le secteur gagne en importance dans le monde et l'on compte au moins une entreprise d'énergie de fusion pour 12 pays.

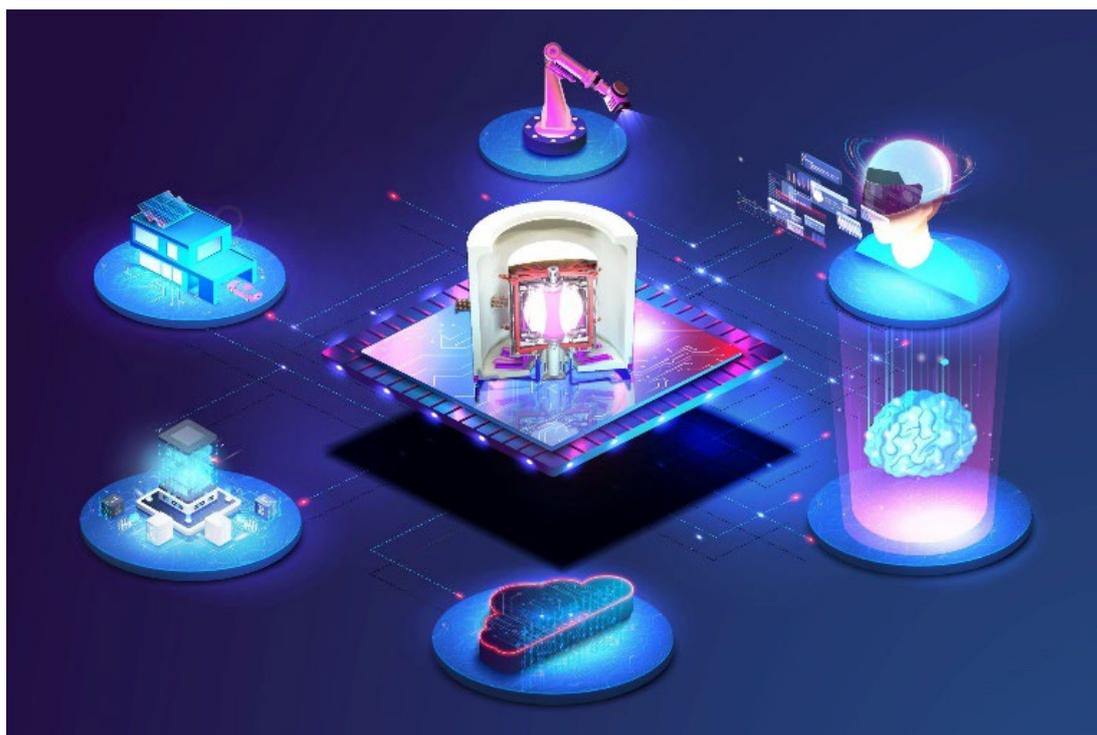
126. Les organismes de réglementation et les législateurs commencent, quant à eux, à se pencher sur les enjeux et les possibilités de l'énergie de fusion. En 2023, la Californie a été le premier État des États-Unis d'Amérique à reconnaître l'énergie de fusion comme étant une technologie distincte de l'énergie de fission. Dans sa législation, elle en a souligné les avantages en termes de sûreté et d'environnement et a jeté les bases des futurs règlements nationaux. La législation ainsi établie fait suite au vote à l'unanimité de la NRC sur la séparation de la réglementation de l'énergie de fusion de celle régissant l'énergie de fission et sur la réglementation des systèmes d'énergie de fusion pour le court terme dans le cadre des sous-produits (comme ceux issus d'accélérateurs de particules).

127. 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.

128. 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. Il a également présenté les avantages qu'il y a à coordonner les efforts en faveur d'une réglementation de l'énergie de fusion adoptée par plusieurs pays et a prôné la clarté d'un cadre réglementaire, 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.

129. Par ailleurs, les supercalculateurs, l'IA et le « métavers industriel » ont également suscité un regain d'intérêt. En 2023, l'UKAEA, Dell Technologies, Intel et l'Université de Cambridge ont annoncé leur collaboration en vue d'étudier les possibilités de créer un jumeau numérique du Tokamak sphérique pour la production d'énergie (STEP) – prototype de centrale à fusion du Royaume-Uni – en utilisant des supercalculateurs et des technologies faisant appel à l'IA dotées de capacités prédictives avancées. En outre, le Département de l'énergie des États-Unis a annoncé qu'il débloquerait 29 millions de dollars des États-Unis pour financer sept équipes de chercheurs dans les domaines de l'apprentissage automatique, de l'IA et des sources de données appliqués aux sciences de l'énergie de fusion. Le PSFC du MIT, l'un de ces sept bénéficiaires, a obtenu 5 millions de dollars des États-Unis dans le cadre d'un projet soutenu par l'Agence intitulé « *Open and FAIR Fusion for Machine Learning Applications* » [pour des données de recherche sur la fusion ouvertes conformes aux principes FAIR (Facilement trouvable, Accessible, Interopérable et Réutilisable) aux fins de l'apprentissage automatique]. Le projet s'inscrit dans le cadre de l'accord de désignation d'un centre collaborateur conclu entre l'AIEA et le PSFC et du projet de recherche coordonnée de l'Agence intitulé « Accélération de la recherche-développement sur la fusion à l'aide de l'intelligence artificielle », dont le PSFC est le coordonnateur technique.



*FIG. D.9. Les supercalculateurs, l'IA et le « métavers industriel » feront progresser la mise au point du STEP, le prototype de centrale à fusion du Royaume-Uni.
(Source : Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni)*

E. Réacteurs de recherche, accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire

E.1. Réacteurs de recherche

Situation

130. À la fin de 2023, 234 réacteurs de recherche, y compris 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.

131. Plusieurs projets visant à mettre en place de nouveaux réacteurs de recherche polyvalents de forte puissance sont nés du constat que l'approvisionnement de la majeure partie du marché mondial en radio-isotopes médicaux importants, tels que le technétium 99m, l'iode 131, le lutécium 177 ou l'holmium 166, et les essais de combustible nucléaire et de matériaux structurels pour les futurs réacteurs de puissance avancés sont actuellement assurés par moins de 10 % de l'ensemble des réacteurs de recherche dans le monde. On peut citer à cet égard la construction du réacteur de recherche RA-10 qui est presque achevée en Argentine, les chantiers en cours du réacteur de recherche Ki-Jang en République de Corée, du réacteur Jules Horowitz en France, pour lequel la poursuite des investissements a été approuvée jusqu'à la fin de la construction, et du réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides en Fédération de Russie, l'annonce du financement intégral et du lancement des travaux préparatoires à la construction du réacteur PALLAS aux Pays-Bas, le renouvellement de l'engagement des pouvoirs publics brésiliens en faveur du réacteur polyvalent brésilien et l'approbation récente par les pouvoirs publics sud-africains du remplacement de leur réacteur SAFARI-1, vieux de 58 ans.

132. Au total, ce sont 11 nouveaux réacteurs de recherche, dont un système hybride, qui sont en construction dans 10 pays : Arabie saoudite, Argentine, Bolivie (État plurinational de), Brésil, Chine, Fédération de Russie, France, République de Corée, République islamique d'Iran, et Ukraine. En outre, en 2023, une nouvelle installation nucléaire sous-critique, VR-2, est entrée en service en République tchèque.





*FIG. E.1 a. Construction du réacteur de recherche RA-10 qui touche à sa fin en Argentine.
(Source : Commission nationale de l'énergie atomique de l'Argentine)*



*FIG. E.1 b. Entrée en service de l'installation nucléaire sous-critique VR-2
en République tchèque en 2023. (Source : Université technique tchèque)*

133. À la fin de 2023, 14 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, les Pays-Bas, les Philippines, 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'Inde, l'Iraq, le Kenya, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Niger, l'Ouganda, les Philippines, la République-Unie de Tanzanie, le Rwanda, le Sénégal, le Soudan et la Tunisie.

134. Les initiatives internationales visant à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur civil se sont poursuivies. Depuis que la Belgique a entièrement remplacé l'UHE par de l'UFE pour produire du molybdène 99, ce radio-isotope très demandé en médecine est produit selon des méthodes de production sans UHE par tous les grands producteurs mondiaux depuis avril 2023. À ce jour, au total, 109 réacteurs de recherche et grandes installations de production d'isotopes médicaux qui fonctionnaient à l'UHE l'ont remplacé par de l'UFE, ou leur mise à l'arrêt a été confirmée, et 6 925 kilogrammes d'UHE ont été rapatriés dans leur pays d'origine ou évacués d'une autre manière de 48 pays [et de Taïwan (Chine)].

Tendances

135. Les États Membres se tournent de plus en plus vers les réacteurs de recherche en service pour soutenir la transition énergétique et la décarbonation dans le cadre de l'ODD 7 (une énergie propre à un coût abordable). Il est fait appel à des techniques neutroniques, telles que l'imagerie neutronique et l'analyse de profil par neutrons, pour caractériser les piles à hydrogène et les batteries au lithium-ion. De plus, un certain nombre de réacteurs de recherche sont utilisés pour l'irradiation et les essais de matériaux structurels et de combustibles, activités essentielles à la mise au point de nouveaux concepts d'énergie de fusion et de fission nucléaires et soutenant le regain d'intérêt pour les travaux de recherche, de développement et de démonstration dans le domaine nucléaire qui s'est manifesté dans plusieurs pays, dont les États-Unis d'Amérique. Le réacteur de neutronographie du Laboratoire national de l'Idaho est doté de capacités expérimentales uniques permettant d'analyser régulièrement des échantillons hautement radioactifs, ce qui offre la possibilité au personnel de mener des recherches sur les combustibles nucléaires irradiés et les matériaux structurels et de contribuer ainsi à la mise au point de solutions innovantes dans le domaine de l'énergie nucléaire. Le Laboratoire national de l'Idaho a révisé sa stratégie en 2023 afin d'en étendre et d'en poursuivre activement l'utilisation pour contribuer à l'élaboration de solutions nucléaires innovantes.

136. Le réacteur de recherche du MIT se dote aussi de moyens accrus pour élargir ses activités menées dans le domaine de l'irradiation des matériaux en rapport avec la fission et la fusion nucléaires à l'appui des travaux du Laboratoire national de l'Idaho et d'autres installations de recherche nucléaire des États-Unis. L'Agence a épaulé les projets d'expansion des deux institutions en effectuant des missions d'examen intégré de l'utilisation des réacteurs de recherche à la mi-2023.

137. Les tests des technologies de réacteur avancées restent l'une des principales applications des réacteurs de recherche. La Fédération de Russie s'apprête à construire son premier réacteur de recherche à sels fondus, d'une puissance de 10 MW, pour démontrer la faisabilité pratique de la technologie des combustibles à sels fondus et de la combustion des actinides mineurs. L'autorisation de construction devrait être délivrée en 2027.

138. Le vieillissement progressif des réacteurs de recherche dans le monde a poussé les opérateurs et les organismes de réglementation à adopter de nouvelles techniques et méthodes pour en évaluer les conditions de fonctionnement et veiller à ce qu'elles restent sûres. L'une de ces méthodes, l'analyse du vieillissement à durée limitée, vise à évaluer les conditions de fonctionnement et la durée de vie restante des systèmes, structures et composants, en particulier ceux dont l'inspection et le remplacement entraînent des coûts élevés et qui affectent le fonctionnement du réacteur. Elle a été appliquée avec succès au profit de l'exploitation à long terme des centrales nucléaires. Plusieurs opérateurs de réacteurs de recherche ont déjà commencé à l'utiliser pour faire prolonger leurs licences. Compte tenu des différences qui existent avec les réacteurs de puissance, son application aux réacteurs de recherche

nécessite d'adopter une approche graduelle propre à ces derniers. À l'heure actuelle, il est envisagé de mener collectivement une initiative en faveur d'une méthodologie commune, applicable à tous les États Membres.

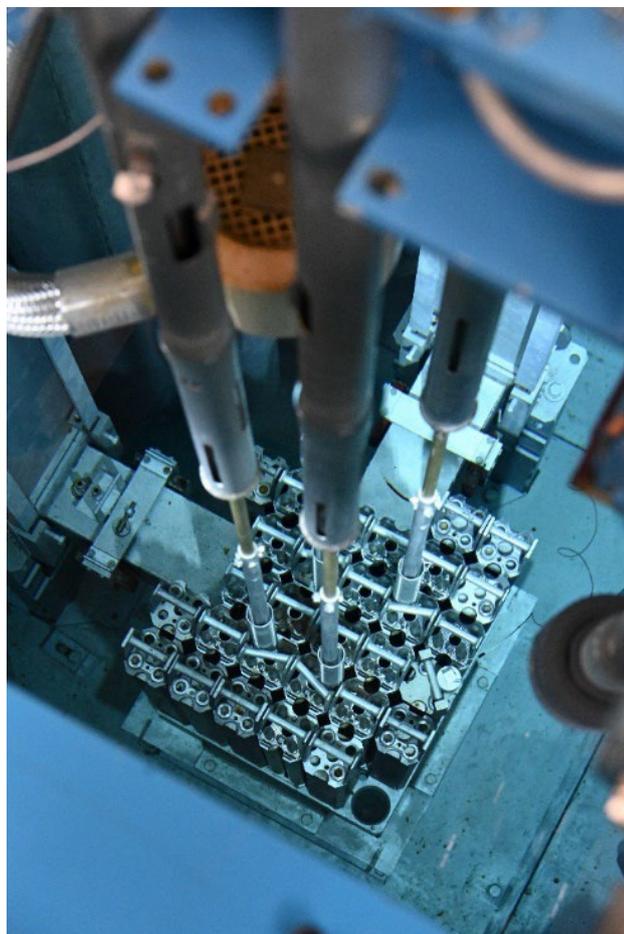


FIG. E.2. Vue du cœur et des internes du réacteur de neutronographie utilisé dans les recherches sur les matériaux au Laboratoire national de l'Idaho. (Source : Laboratoire national de l'Idaho)

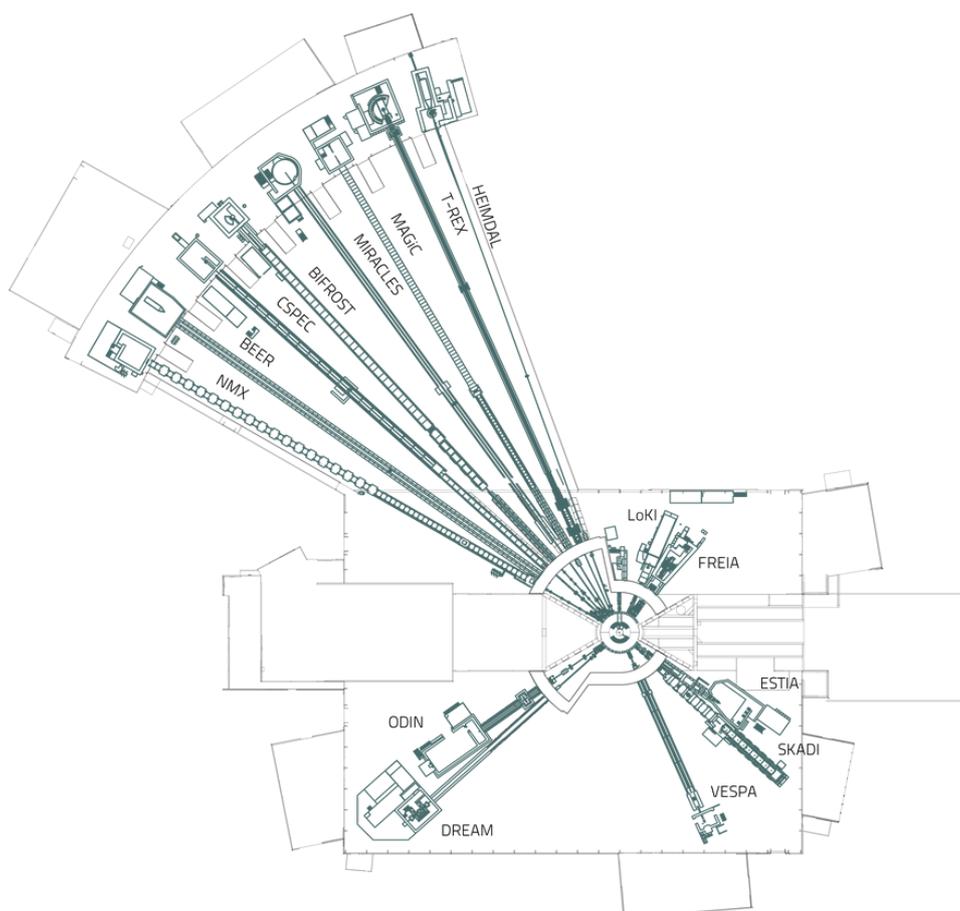
139. De nombreux pays profitent des possibilités d'accès aux réacteurs de recherche que leur offrent des initiatives de collaboration internationales et régionales, notamment dans le cadre du Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche. Il existe actuellement sept centres de ce type répartis sur quatre continents, le dernier ayant été désigné au Maroc en 2023.

E.2. Accélérateurs de particules

Situation

140. Dans tout domaine de recherche (moteurs, médicaments, plastiques, protéines, etc.), les chercheurs qui mènent des études scientifiques poussées ont besoin que les sources de neutrons à leur disposition en produisent un certain nombre. Aussi les scientifiques et ingénieurs poursuivent-ils leurs travaux visant à créer une nouvelle génération de sources de neutrons reposant sur des accélérateurs de particules et la technologie des cibles de spallation, en sus des réacteurs de recherche. Ainsi, en 2023, les travaux de construction de la source de spallation européenne (ESS), l'un des plus grands projets d'infrastructure scientifique et technologique au monde, se sont poursuivis à une cadence soutenue. Grâce à la collaboration des États Membres et à de nombreuses contributions en nature, des progrès considérables

ont été accomplis sur place en vue de la mise en service de l'accélérateur linéaire de protons le plus puissant jamais construit (la cible étant une roue en tungstène modérée par cryogénie à l'hélium), ainsi que des instruments neutroniques de pointe connexes. L'ESS a été marquée par certaines grandes étapes récemment franchies, parmi lesquelles la mise en service complète de l'accélérateur de protons et l'installation du blindage permanent de la cuve monolithique de la cible, ainsi que du modérateur et de la roue cible rotative qui produira les neutrons. Dans le même temps, des progrès significatifs ont été réalisés dans l'installation de dispositifs expérimentaux complexes pour les 15 lignes de faisceaux de neutrons et instruments de diffusion neutronique de pointe sélectionnés (parties terminales des faisceaux de neutrons)⁵.



*FIG. E.3. Ensemble d'instruments de spectroscopie et de diffusion neutronique qui seront disposés dans la source de neutrons alimentée par l'accélérateur de prochaine génération à l'ESS.
(Source : ESS)*

141. L'annonce officielle du début de la construction de l'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion pour des essais de type DEMO (IFMIF-DONES)⁶ à Escúzar, Grenade (Espagne) est survenue au début de 2023 lors de la première réunion de son comité directeur, l'organe directeur du programme IFMIF-DONES. La construction de l'installation est une étape importante du programme international de fusion, qui s'articule autour de trois piliers fondamentaux : ITER, DEMO et IFMIF-DONES⁷. L'installation, composée d'un accélérateur de pointe, d'une cible au lithium liquide

⁵ Page web d'ESS consacrée aux instruments : <https://europeanspallationsource.se/instruments>

⁶ <https://fusion.bsc.es/index.php/2023/04/13/ifmif-dones-starts-construction-phase/>

⁷ Page d'accueil IFMIF-DONES : <https://ifmif-dones.es/>

et d'un module d'essai d'irradiation, fournira au futur modèle DEMO les données expérimentales nécessaires à l'irradiation des matériaux et des capacités d'essai dans des conditions d'irradiation comparables. Outre la construction de ces infrastructures, des activités visant à promouvoir des projets de recherche-développement et d'innovation dans le domaine de la fusion et d'autres domaines scientifiques et technologiques connexes, tels que la production de radio-isotopes et les mesures de données nucléaires, et à susciter des collaborations ont été menées.

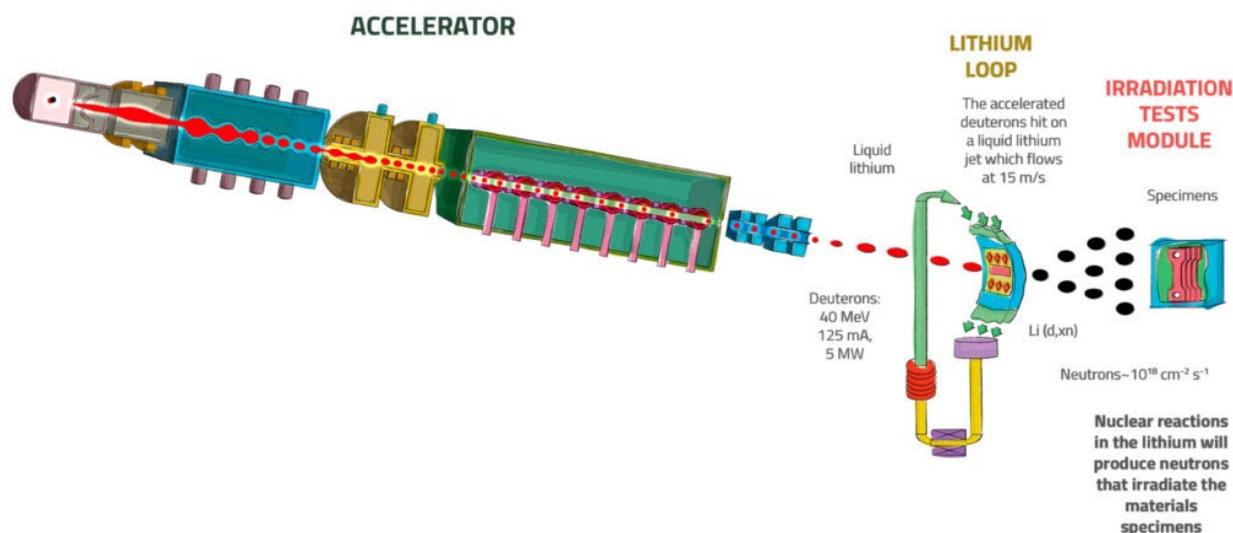


FIG. E.4. Schéma de l'installation IFMIF-DONES constituée d'un accélérateur de deutérons de forte puissance, d'une cible en forme d'un rideau de lithium liquide pour la production de neutrons à haute énergie et d'un module d'essai d'irradiation des matériaux. (Source : IFMIF-DONES)

Tendances

142. Les accélérateurs de particules jouent un rôle clé dans l'imagerie subcellulaire et la radiothérapie des cancers. Des techniques d'imagerie très variées, telles que les ultrasons, la tomodensitométrie ou encore l'imagerie par résonance magnétique, sont utilisées à des fins de diagnostic médical. Les techniques faisant appel à des faisceaux d'ions et de rayons X sont désormais si perfectionnées qu'il est possible de focaliser ces derniers au nanomètre près. Lorsqu'on balaye un artefact avec un rayon aussi fin combiné à différents systèmes de détection, on obtient non seulement des données d'analyse, mais aussi une image de plus en plus précise de la constitution de l'objet. L'identification des pigments, la découverte d'esquisses cachées sous une peinture ou encore la mise au jour de la structure fibreuse d'anciens manuscrits sont désormais possibles grâce à l'émergence de nouvelles méthodes d'imagerie multispectrale. En outre, comme pour l'imagerie médicale utilisée à des fins de diagnostic, on met actuellement au point des méthodes perfectionnées de traitement des images fondées sur l'apprentissage automatique qui permettront de mieux visualiser les différentes parties d'un artefact, voire d'en révéler les éléments manquants.

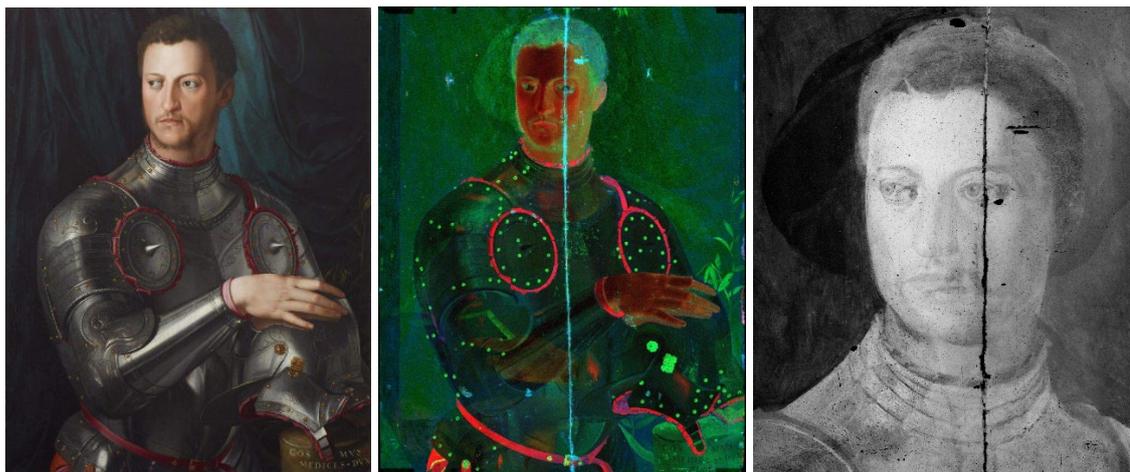


FIG. E.5. Image d'un tableau de Bronzino du XVI^e siècle représentant le duc Cosme de Médicis (à gauche), obtenue par microscopie par fluorescence X à rayonnement synchrotron de haute définition (Australie), qui a révélé un portrait dans les sous-couches de peinture et a permis de déterminer de manière non invasive les métaux qui sont présents dans les pigments de peinture (à droite). La carte de la répartition du plomb (Pb) fait clairement apparaître la peinture originale, par exemple autour de la tête et de l'épaule (ainsi que l'œil d'une autre personne en dessous). [Source : Galerie d'art de Nouvelle-Galles du Sud (à gauche), Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (au centre et à droite)]

143. La tendance récente en matière d'imagerie du patrimoine consiste à associer l'imagerie multimodale au traitement des images. Là encore, il existe des points communs avec l'imagerie médicale : par exemple, compte tenu de la fragilité des patients et des artefacts, il convient d'administrer la dose de rayonnement appropriée, que ce soit à des fins d'irradiation ou d'analyse, en vue de réduire au minimum les dommages susceptibles d'être causés par les rayonnements et d'optimiser l'effet de la radiothérapie ou de recueillir les données d'analyse indispensables. Ainsi, dans le milieu de la recherche scientifique et technologique menée à l'aide d'accélérateurs, l'idée de pouvoir administrer la dose exacte de particules/rayons X dans le cadre d'applications médicales est source de motivation pour les chercheurs⁸. Les capacités de l'imagerie du patrimoine bénéficient ainsi des progrès enregistrés dans le milieu médical et en matière d'imagerie multispectrale⁹.

E.3. Instrumentation nucléaire

Situation

144. Dans le domaine de la cartographie des rayonnements, outre les traditionnels sacs à dos et drones équipés, le déploiement de véhicules terrestres sans équipage offre une multitude d'avantages. Ces plateformes terrestres se présentent sous diverses formes – les robots à roues, à pattes et à chenilles étant les plus répandus. Aujourd'hui, il est possible de concevoir des véhicules terrestres sans équipage capables de résister à des débits de dose élevés pour effectuer des tâches telles que le démantèlement ou le déclassement d'installations nucléaires. Grâce à des capteurs bien adaptés et à des algorithmes sophistiqués, ces robots peuvent agir selon deux modes de fonctionnement : en commande à distance (télérobot) ou en autonomie. Dans certains environnements extérieurs, la navigation par satellite entre

⁸ Bertrand, L. et al. Practical advances towards safer analysis of heritage samples and objects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Volume 164 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117078>

⁹ Gibson, AP. Medical imaging applied to heritage. *The British Journal of Radiology* 96, No 1152 (2023). <https://doi.org/10.1259/bjr.20230611>

en jeu, bien que la tendance prédominante soit à la localisation et à la cartographie simultanées basées sur la détection et la télémétrie par la lumière (Lidar), que l'on peut aussi utiliser à l'intérieur. À l'heure actuelle, on peut utiliser des piles de localisation prêtes à l'emploi pour assurer une navigation autonome. Parmi les capteurs communs dans ce domaine figurent ceux de type Lidar, les radars, les capteurs RVB, les caméras de profondeur et les imageurs thermiques, ainsi que divers débitmètres de dose, de spectromètres et d'autres systèmes de détection des rayonnements. La tendance actuelle est à la fusion de données sur l'environnement local (technique multisources qui permet d'enrichir les mesures des rayonnements avec des informations contextuelles). Les données peuvent être traitées en temps réel par des ordinateurs embarqués ou des stations à distance, ce qui nécessite la transmission des données pertinentes aux stations locales de contrôle au sol ou au nuage informatique, mais l'on peut également recourir à des enregistreurs de données qui retiennent les informations en vue d'un traitement ultérieur.

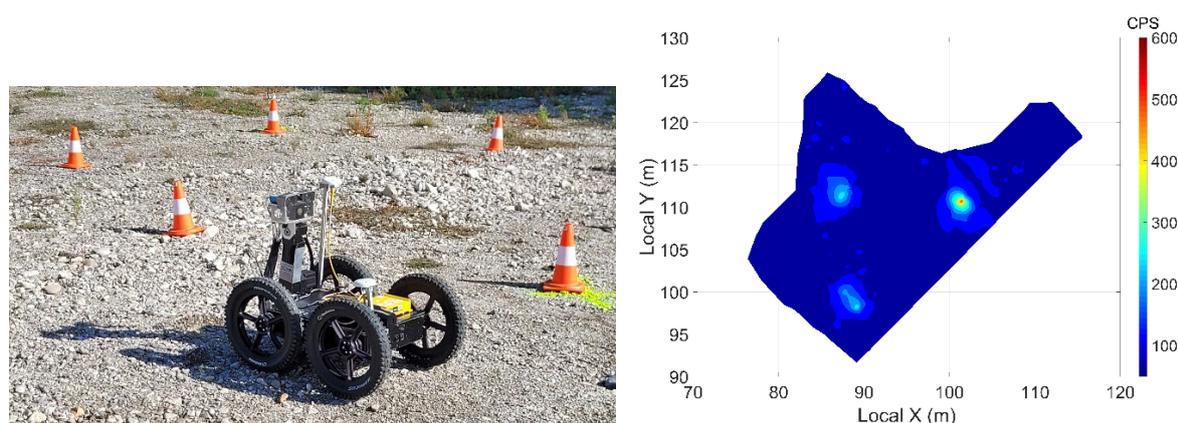


FIG. E.6. Véhicule terrestre sans équipage utilisé lors d'un atelier de formation au Laboratoire des sciences et de l'instrumentation nucléaires de Seibersdorf en Autriche (à gauche) et carte de rayonnements montrant les « points chauds d'activité » (à droite). CPS est l'abréviation de « coups par seconde ». (Source : AIEA)

Tendances

145. Les réseaux de portes programmables par l'utilisateur (FGPA) deviennent une composante à part entière des systèmes d'acquisition de données des détecteurs de rayonnements. Ils sont utilisés à des fins très diverses, qui vont du réglage des paramètres d'acquisition des données des détecteurs et des données de diffusion ou de routage, à des travaux de discrimination avancée des signaux, voire de reconstitution complète d'événements. Les algorithmes de traitement des données employés sont au cœur de la complexification des fonctionnalités, qu'elles soient classiques ou fondées sur l'IA. À ce titre, on peut notamment citer les algorithmes de discrimination neutron-gamma utilisés dans des applications de systèmes intégrés des FGPA. Les champs de rayonnement mixtes sont monnaie courante dans nombre d'applications pratiques des rayonnements ionisants, dans lesquelles les détecteurs dédiés à la discrimination sont indispensables. Par exemple, au lieu d'appliquer la méthode traditionnelle de la discrimination de la forme d'impulsion dans le domaine temporel, il est possible de recourir à des algorithmes utilisables dans le domaine fréquentiel. En définissant soigneusement un facteur de mérite approprié, il est possible d'accélérer l'analyse donnant lieu à la discrimination de la forme de l'impulsion (et du champ de rayonnement) (voir figure E.7). Cette évolution mène aux applications en temps réel des algorithmes et, ces dernières années, on observe qu'elles tendent à être utilisées par des systèmes modernes d'acquisition de données des détecteurs de rayonnements, dans des domaines aussi variés que la science nucléaire, la sécurité nucléaire, la radioprotection et la physique médicale. En outre, la synthèse de haut niveau qui a vu le jour, c'est-à-dire la possibilité de coder la carte des FGPA dans un langage élaboré, a rendu ces derniers accessibles à un plus grand nombre de développeurs.

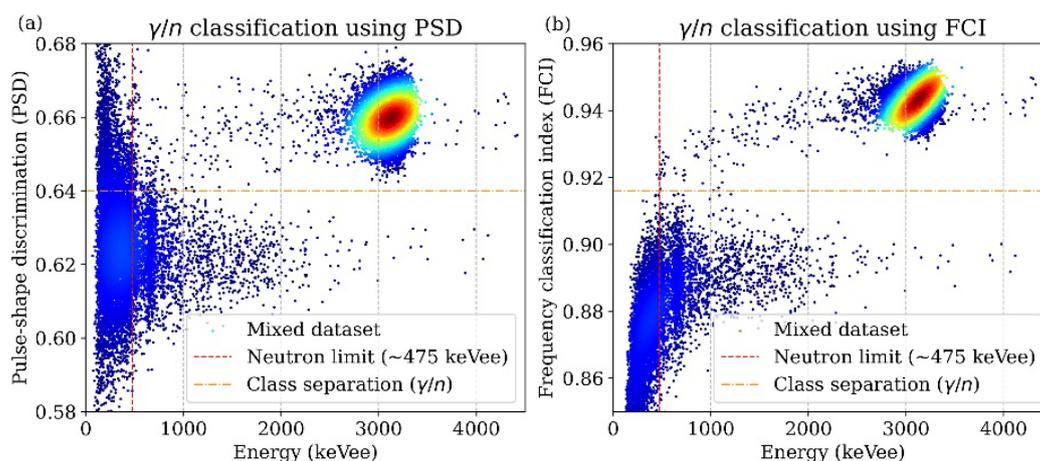


FIG. E.7. Comparaison de la séparation γ/n au moyen de la discrimination traditionnelle de la forme d'impulsion (à gauche) et d'un indice de grandeur des fréquences (à droite), le deuxième graphique montrant qualitativement des résultats de discrimination supérieurs sur l'ensemble de la gamme d'énergie. Les données expérimentales ont été obtenues par l'installation de neutronique de l'Agence à Seibersdorf (en Autriche).
(Source : Morales, I. R. et al., Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications¹⁰)

F. Données atomiques et nucléaires

Situation

146. Les travaux relatifs à l'ITER doivent s'appuyer davantage sur des bases de données nucléaires et atomiques numériques, d'autant que les codes de simulations nucléaires sont de plus en plus pointus. Dans le domaine de la neutronique et de l'activation des matériaux, c'est la Bibliothèque de données neutroniques sur l'énergie de fusion qui est sollicitée, tandis que pour les interactions entre atomes dans le plasma de fusion, on utilise la base de données CollisionDB.

Tendances

147. Divers États Membres consacrent davantage de temps et de ressources à l'ITER afin d'obtenir des données de qualité sur les interactions des rayons gamma, essentiellement aux fins de mesures neutroniques actives, d'estimations plus précises de l'échauffement gamma dans le blindage des réacteurs de fission et des dispositifs de fusion, et d'innovations dans les applications spatiales. Pour obtenir des données de qualité sur les interactions gamma, il faut mettre à jour les anciennes bases contenant des données sur les réactions gamma en y incorporant des données expérimentales et théoriques plus récentes. De nouvelles activités d'évaluation des données nucléaires sont en cours à cette fin.

148. Par ailleurs, l'augmentation rapide de la demande mondiale de radio-isotopes médicaux, tant à des fins diagnostiques que thérapeutiques, a des incidences marquées sur les données nucléaires. Des sections efficaces de production bien plus exactes sont nécessaires, en particulier pour l'optimisation des circuits de production d'isotopes contenant un minimum d'impuretés. Pour en obtenir, les physiciens

¹⁰ Morales, I. R. et al. Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications. Nuclear Engineering and Technology (2023). <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.11.013>

chargés d'expériences nucléaires et les modélisateurs de réactions nucléaires théoriques doivent intensifier leurs activités.

G. L'intelligence artificielle au service de l'électronucléaire et du cycle du combustible nucléaire

Situation

149. L'intelligence artificielle (IA) est un terme générique qui englobe diverses technologies développées au fil des décennies. Pour la production d'énergie nucléaire, les systèmes d'IA sophistiqués, qui reproduisent la logique humaine pour résoudre des problèmes et prendre des décisions, sont des outils prometteurs. Grâce à sa capacité à améliorer l'efficacité, l'automatisation, la sûreté et la maintenance prédictive, ainsi qu'à optimiser les processus, l'IA permet déjà de progresser à grands pas dans certains domaines du secteur nucléaire.

150. Des applications de l'IA sont en cours dans des centrales nucléaires et des installations du cycle du combustible en service. Pour l'instant, elles sont indépendantes des systèmes, processus ou fonctions liés à la sûreté. Dans les examens non destructifs, par exemple, elles permettent de procéder plus rapidement à des inspections plus fiables, d'informer les décideurs sur les meilleurs plans de chargement du cœur et de rationaliser les calendriers complexes des arrêts pour maintenance. On peut également citer à leur actif l'amélioration de l'évaluation et l'optimisation de modèles avancés de réacteurs nucléaires grâce à des codes et à des modèles mathématiques assistés par l'IA.

151. Les travaux d'IA actuels menés dans les domaines de la sûreté, la sécurité et la fiabilité sont principalement axés sur l'identification des risques et les conséquences des défaillances, l'« explicabilité », la crédibilité de l'IA et les considérations éthiques associées à son utilisation continue. À l'avenir, les procédés ou systèmes numériques reposant sur l'IA qui pourraient être mis en place pourraient avoir des conséquences sur la sûreté ou la sécurité nucléaires. En outre, comme c'est le cas pour tout système numérique, des mesures appropriées en matière de validation et de cybersécurité sont élaborées parallèlement à divers scénarios d'application. Les organismes compétents s'emploient à concevoir des stratégies pour régir la technologie de l'IA dans les installations nucléaires et de radioprotection.

Tendances

152. L'IA est de plus en plus souvent mise à contribution dans la conception et l'exploitation des réacteurs nucléaires commerciaux et des installations du cycle du combustible nucléaire. Elle peut améliorer la sûreté, ainsi que l'efficacité et la rentabilité des opérations tout en facilitant la mise au point de technologies nucléaires avancées. Les systèmes fondés sur l'IA aident à analyser les mégadonnées recueillies pendant les opérations afin d'améliorer la fiabilité et de prévenir les accidents du personnel. Ces progrès contribuent à la viabilité et à la compétitivité du nucléaire dans le contexte énergétique moderne.

153. L'IA concourt de diverses manières à améliorer la sûreté, l'efficacité et la rentabilité dans le secteur nucléaire. En ce qui concerne la sûreté et la maintenance, elle aide à prévoir les défaillances du matériel, à analyser les données des capteurs et à optimiser les programmes de maintenance, afin de réduire les temps d'arrêt et d'améliorer la sûreté. Par exemple, certains algorithmes d'apprentissage automatique peuvent actuellement détecter des anomalies et perfectionner les systèmes d'alerte rapide. Dans l'analyse des sources de données non structurées et des documents, l'IA est également de plus en plus

souvent utilisée pour relever les liens difficilement visibles entre les événements (y compris les événements récurrents). Cela permet de repérer les événements récurrents systémiques pour lesquels aucune mesure corrective n'a été prise, ainsi que de gagner du temps dans la recherche d'événements notables par ordre d'importance (enquête sur les violations, les déviations, les défauts significatifs, etc.).

154. La R-D dans le domaine de l'IA a montré que cette dernière pouvait aider à optimiser efficacement le cœur des réacteurs de puissance et des réacteurs nucléaires avancés. Elle pourrait permettre de perfectionner les méthodes de chargement en combustible et de prolonger la durée du cycle du combustible, ce qui pourrait se traduire par une hausse de la production d'électricité et une réduction de la production de déchets et des coûts d'exploitation. En outre, par ses simulations de processus physiques complexes, elle pourrait faciliter la conception de réacteurs nucléaires et d'installations du cycle du combustible avancés, ce qui permettrait d'améliorer les modèles tout en raccourcissant la période de développement. L'élaboration et le déploiement de solutions faisant appel à l'IA dans les centrales électronucléaires commerciales et les installations du cycle du combustible devraient accélérer à mesure que l'on gagnera en expérience et que les incertitudes seront levées.

155. Le personnel d'exploitation se sert de plus en plus de l'IA pour analyser les données vidéo en vue d'assurer la sûreté dans les installations de production et d'exploitation. On l'utilise à la fois pour contrôler les équipements de protection individuels et pour garantir la sûreté du personnel sur le site.

H. Santé humaine

H.1. Évaluation non invasive de la fonction digestive de l'intestin au moyen d'un test respiratoire optimisé au saccharose marqué au carbone 13

Situation

156. L'une des questions de santé publique les plus urgentes concernant la nutrition consiste à déterminer pourquoi dans les pays à revenu faible et intermédiaire les enfants souffrent d'un retard de croissance malgré de nombreuses interventions de santé publique, notamment une supplémentation alimentaire et un meilleur assainissement de l'eau. Selon le dernier rapport conjoint d'instances du système des Nations Unies sur la sécurité alimentaire et la nutrition, quelque 150 millions d'enfants de moins de cinq ans sont trop petits pour leur âge, ce qui a des conséquences désastreuses sur leur développement psychomoteur et les expose au risque de maladies chroniques ultérieurement¹¹. Si les facteurs liés au retard de croissance sont complexes et insuffisamment connus, l'entéropathie environnementale (EE) - caractérisée par une perturbation systémique et chronique de l'intégrité structurelle et de la fonction des intestins - est de plus en plus associée à ce trouble de la croissance observé chez des enfants vivant dans un environnement insalubre dans les pays à faible et moyen revenu¹². L'EE peut y contribuer de différentes manières, en occasionnant une perméabilité intestinale accrue, des processus inflammatoires et une mauvaise absorption des nutriments². Les critères de son diagnostic sont peu développés, et l'approche la plus efficace pour diagnostiquer les lésions de l'intestin

¹¹ Fonds international de développement agricole, Fonds des Nations Unies pour l'enfance, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Organisation mondiale de la santé et Programme alimentaire mondial. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023 : Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum, FAO, Rome (2023).

¹² Owino, V., et al., Environmental Enteric Dysfunction and Growth Failure/Stunting in Global Child Health, Pediatrics. 138 6 (2016).

consiste à procéder à une biopsie invasive. Dans la plupart des pays à revenu faible et intermédiaire où l'EE est répandue, cette option n'est ni viable ni justifiable d'un point de vue déontologique.

157. Les tests respiratoires, auxquels on a recours dans des applications de santé humaine comme la gastro-entérologie, ne sont pas invasifs et peuvent être utilisés dans toutes les tranches d'âge, y compris chez les enfants¹³. Les plus courants font appel à l'hydrogène (H₂), au méthane (CH₄) et au dioxyde de carbone marqué au carbone 13 (¹³C). Les tests respiratoires à l'H₂ et au CH₄ sont principalement effectués pour l'évaluation de la malabsorption des glucides en général^{3,14}. En revanche, ceux au ¹³C permettent d'évaluer un grand nombre de symptômes en gastro-entérologie, car ils utilisent diverses molécules marquées au ¹³C pour cibler des fonctions spécifiques et mesurer le ¹³CO₂ dans l'haleine en tant que produit final du métabolisme. Celui à l'urée marquée au ¹³C pour la détection d'*Helicobacter pylori* est bien établi dans la pratique clinique¹⁵. Cela dit, les applications des tests respiratoires sont largement cantonnées au cadre clinique et n'ont qu'une utilisation limitée dans le domaine de la nutrition en santé publique.

158. Le test respiratoire au saccharose marqué au ¹³C (¹³C-SBT) sert déjà à étudier la digestion des glucides dans le contexte d'un déficit congénital en saccharase-isomaltase¹⁶. L'enrichissement en ¹³CO₂ de l'air expiré après ingestion orale de saccharose marqué au ¹³C révèle une détérioration de la capacité de l'intestin à digérer le saccharose, signe d'une activité réduite au niveau du duodénum de l'enzyme saccharase-isomaltase, qui doit décomposer le saccharose en glucose et fructose dans l'intestin avant qu'ils puissent être absorbés et métabolisés (figures H.1 et H.2). Le test ¹³C-SBT a également été utilisé comme marqueur de la consommation accrue de sucre alimentaire chez le rat¹⁷. Ritchie et ses collègues ont été les premiers à y avoir recours pour analyser l'EE chez des enfants australiens souffrant de diarrhée¹⁸. Dans l'étude qu'ils ont menée, des enfants aborigènes atteints ou non de diarrhée aiguë et un groupe témoin d'enfants non aborigènes en bonne santé ont reçu une dose orale de saccharose naturellement enrichi (sucre issu du maïs, qui est légèrement enrichi en ¹³C par rapport à celui de la betterave). Après 90 minutes, le ¹³CO₂ était moins présent chez les enfants aborigènes souffrant de diarrhée que chez ceux qui n'en souffraient pas ; les enfants non aborigènes en bonne santé en avaient bien plus. Toutefois, ce test n'est pas révélateur, principalement parce que le signal du ¹³C du saccharose de maïs n'est pas suffisamment fort par rapport au bruit de fond naturel et variable du ¹³C présent (environ 1,1 %), même avec des doses très importantes de saccharose^{19,20}.

¹³ Broekaert, I.J., et al., An ESPGHAN Position Paper on the Use of Breath Testing in Paediatric Gastroenterology, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 74 1 (2022) 123–37.

¹⁴ Hammer, H.F., et al., European guideline on indications, performance, and clinical impact of hydrogen and methane breath tests in adult and pediatric patients: European Association for Gastroenterology, Endoscopy and Nutrition, European Society of Neurogastroenterology and Motility, and European Society for Paediatric Gastroenterology Hepatology and Nutrition consensus, *United European Gastroenterology Journal*. 10 1 (2022) 15–40.

¹⁵ Keller, J., et al., European guideline on indications, performance and clinical impact of ¹³C-breath tests in adult and pediatric patients: An EAGEN, ESNM, and ESPGHAN consensus, supported by EPC, *United European Gastroenterology Journal*. 9 5 (2021) 598–625.

¹⁶ Robayo-Torres, C.C., et al., ¹³C-breath tests for sucrose digestion in congenital sucrose isomaltase-deficient and sacrosidase-supplemented patients, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 48 4 (2009) 412–8.

¹⁷ Yazbeck, R., et al., Breath ¹³CO₂-evidence for a noninvasive biomarker to measure added refined sugar uptake, *Journal of Applied Physiology*. 130 4 (2021) 1025–32.

¹⁸ Ritchie, B.K., et al., ¹³C-Sucrose Breath Test: Novel Use of a Noninvasive Biomarker of Environmental Gut Health, *Pediatrics*. 124 2 (2009) 620–6.

¹⁹ International Atomic Energy Agency, New approaches for stable isotope ratio measurements, *Proceedings of an Advisory Group meeting held in Vienna, 20–23 September 1999, IAEA-TECDOC-1247, IAEA, Vienna (2001)*.

²⁰ Butler, R.N., et al., Stable Isotope Techniques for the Assessment of Host and Microbiota Response During Gastrointestinal Dysfunction, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 64 1 (2017) 8–14.

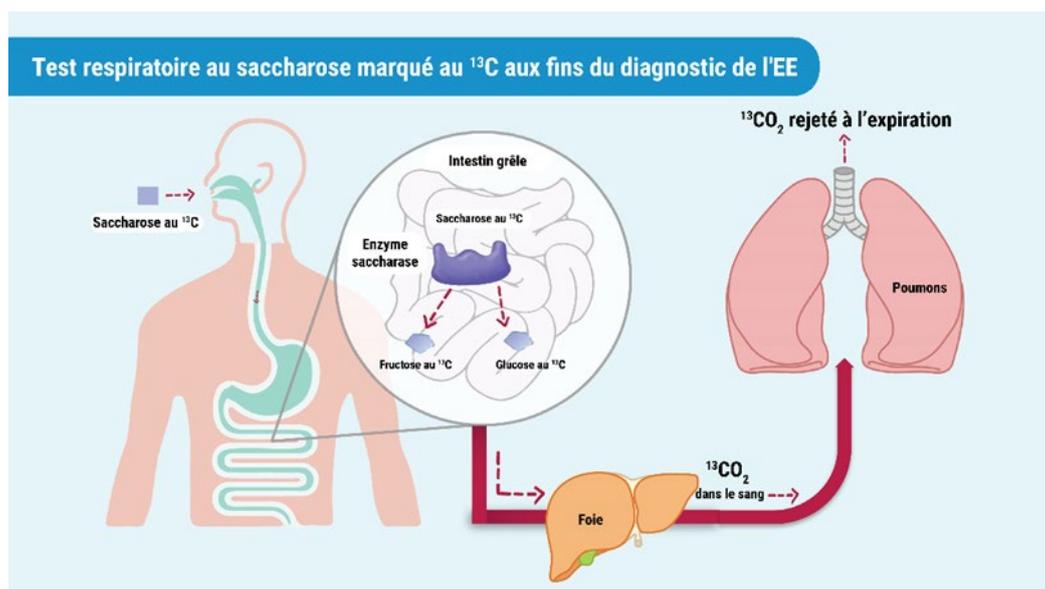


FIG. H.1. Du saccharose marqué au ^{13}C est administré à un individu en quantité bien déterminée dans un peu d'eau. Alors qu'il transite par l'épithélium intestinal jusqu'à la bordure en brosse, l'enzyme saccharase-isomaltase catalyse l'hydrolyse de ce saccharose en fructose ^{13}C et en glucose ^{13}C , qui sont absorbés dans le sang et transportés vers le foie, où ils se décomposent plus ou moins vite pour produire de l'énergie ainsi que du $^{13}\text{CO}_2$, que l'on retrouve dans l'air expiré. Le pourcentage de ^{13}C présent dans le $^{13}\text{CO}_2$ par rapport au ^{13}C original présent dans le saccharose marqué est une indication de la capacité d'absorption intestinale et est corrélé à l'activité de la saccharase-isomaltase. (Illustration : AIEA)



FIG. H.2. On recueille l'haleine des enfants plus âgés et des adultes en les faisant souffler dans un sac prévu à cet effet, comme indiqué. Chez les nourrissons et les jeunes enfants, on fixe un masque sur ce sac pour recueillir l'air qu'ils expirent. (Illustration : AIEA)

159. On peut utiliser du saccharose hautement enrichi (99 %) pour améliorer la sensibilité du test ^{13}C -SBT²¹. Un projet de recherche coordonnée (PRC) de l'Agence sur l'application de techniques faisant appel aux isotopes stables pour l'étude de l'entéropathie environnementale et de ses incidences sur la

²¹ Schillinger, R.J., et al., ^{13}C -sucrose breath test for the non-invasive assessment of environmental enteropathy in Zambian adults, *Frontiers in Medicine*. 9 (2022).

croissance de l'enfant a aidé neuf pays à perfectionner et à appliquer le test ^{13}C -SBT à ces fins. Durant la première phase du projet²², le test a été optimisé et validé par comparaison des résultats obtenus avec des traceurs de saccharose hautement enrichi à ceux obtenus avec du saccharose naturellement enrichi au Royaume-Uni. Ainsi optimisé, il a été utilisé sur des enfants australiens souffrant de maladie cœliaque, et ses résultats ont été comparés à ceux obtenus par biopsie chez des adultes zambiens et après des tests de perméabilité intestinale effectués chez des enfants péruviens. Dans la deuxième phase du projet, il a été utilisé dans des études transversales au Bangladesh, en Inde, en Jamaïque, au Kenya, au Pérou et en Zambie visant à détecter l'EE chez des enfants âgés de 12 à 15 mois.

Tendances

160. Le test ^{13}C -SBT est un test respiratoire non invasif destiné à mesurer les lésions de l'intestin grêle causées par l'EE après absorption d'une dose orale de saccharose marqué au ^{13}C . Selon des études de validation menées au Royaume-Uni et en Zambie, l'utilisation d'une petite dose de saccharose hautement enrichi en ^{13}C a permis d'évaluer avec exactitude l'activité des enzymes au niveau de la bordure en brosse, en particulier celle de la saccharase-isomaltase présente dans l'intestin¹¹. Toutefois, le test a montré ses limites, car les résultats n'étaient pas directement reliés aux processus biologiques sous-jacents intervenant dans l'intestin. C'est pourquoi les chercheurs travaillent à l'élaboration de nouveaux modèles mécanistes pour mieux comprendre la dynamique du métabolisme intestinal²³. Ces modèles ont mis en évidence l'importance de distinguer le métabolisme du fructose de celui du glucose présent dans le saccharose marqué au ^{13}C . Pour assurer une meilleure adéquation avec les mécanismes biologiques impliqués dans le test ^{13}C -SBT, il est recommandé d'utiliser du saccharose marqué au glucose ^{13}C . Pour des résultats plus complets, il est possible de combiner ce test à d'autres afin de couvrir des domaines de recherche sur l'EE distincts de l'étude sur la digestion du saccharose.

H.2. Assurance de la qualité : Faits nouveaux en curiethérapie

Situation

161. Le cancer du col de l'utérus, quatrième cancer le plus fréquent chez les femmes dans le monde, est toujours un problème majeur. En 2020, environ 90 % des nouveaux cas et des décès sont survenus dans les pays à revenu faible et intermédiaire²⁴. L'initiative Rayons d'espoir de l'AIEA vise à rendre plus accessibles les soins anticancéreux, en particulier en Afrique, où 70 % de la population ne peut bénéficier d'une radiothérapie. Au cours de la première phase, elle se concentre sur sept pays – Bénin, Kenya, Malawi, Niger, République démocratique du Congo, Sénégal et Tchad – où le cancer du col de l'utérus est le premier ou le deuxième cancer le plus fréquent chez les femmes. Elle essaiera d'aplanir les obstacles associés à son traitement par des actions de sensibilisation, des formations et un renforcement des capacités, et en améliorant l'accès aux thérapies et aux soins.

²² Lee, G.O., et al., Optimisation, validation and field applicability of a ^{13}C -sucrose breath test to assess intestinal function in environmental enteropathy among children in resource poor settings: study protocol for a prospective study in Bangladesh, India, Kenya, Jamaica, Peru and Zambia, *BMJ Open*. 10 11 (2020).

²³ Brouwer, A.F., et al., Mechanistic inference of the metabolic rates underlying ^{13}C breath test curves, *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*. 50 3 (2023) 203–14.

²⁴ Sung, H., et al., Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, *CA Cancer Journal for Clinicians*. 71 (2021) 209–49.



FIG. H.3. Cinq premiers centres d'excellence ont été officiellement créés lors d'une manifestation parallèle sur l'initiative Rayons d'espoir de l'AIEA, tenue en marge de la 67^e Conférence générale de cette dernière. (Photo : AIEA)

162. Le traitement du cancer du col de l'utérus combine chirurgie, chimiothérapie et radiothérapie. La curiethérapie, composante essentielle de la radiothérapie, joue un rôle central dans la prise en charge de cette maladie. À l'heure actuelle, elle s'appuie sur des données prouvant qu'il existe bien un lien entre la dose administrée et son effet clinique. Cependant, comme les doses administrées y sont nettement plus élevées qu'en téléthérapie, la procédure à suivre en matière de traitement est très spécifique : il faut qu'elle soit méticuleusement optimisée afin d'éviter les effets cliniques indésirables dus à un sous-dosage ou à un surdosage.

163. L'administration méthodique des doses est essentielle pour assurer la qualité et la sûreté de cette option thérapeutique. Cela peut aussi lui rallier la confiance du public, qui a été ébranlée par des incidents signalés dans le passé, dont un mortel, qui étaient dus à des erreurs humaines. Les contrôles dosimétriques permettent de prévenir les incidents catastrophiques et de réduire les variations systématiques de dose.

164. Depuis sa création en 1969, le Service postal d'audit de la qualité des doses assuré par l'Agence procède, par l'intermédiaire du Laboratoire de dosimétrie de cette dernière, au contrôle de diverses technologies de radiothérapie dans les États Membres qui n'ont pas les moyens de le faire au niveau national. Ce service essentiel a largement contribué à la sûreté des pratiques de radiothérapie dans le monde, pour le bien de millions de patients atteints de cancer.

165. Par ailleurs, s'agissant de la curiethérapie, un fossé se creuse en matière de formation théorique et pratique — fossé d'autant plus grand que la technologie se complexifie et que le matériel de formation manque. Les pays à revenu faible et intermédiaire n'ont guère de possibilités de former les ressources humaines nécessaires à une utilisation sûre et efficace de cette technique.

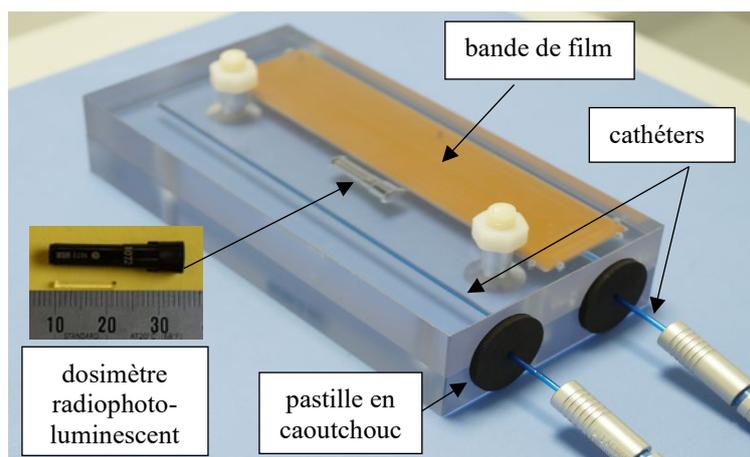
166. L'Agence utilise la réalité virtuelle comme outil innovant pour combler ce déficit de compétences à moindre coût. Elle a mis au point des supports de formation en ligne aux procédures de curiethérapie en gynécologie qui font appel à un environnement tridimensionnel basé sur la réalité virtuelle (figure H.4). Cette technologie permet de s'entraîner à la curiethérapie en l'absence de vrais malades, contribuant ainsi à améliorer le traitement et la prise en charge des patientes atteintes d'un cancer du col de l'utérus, en particulier dans les pays à ressources limitées.



FIG. H.4 Nouveau module de formation en ligne aux procédures de curiethérapie en gynécologie de l'Agence à suivre à l'aide d'un casque de réalité virtuelle. (Photo : AIEA)

Tendances

167. En 2021, l'Agence a entrepris un PRC visant à mettre au point une méthodologie pour les contrôles de la qualité des doses en curiethérapie qui comprend trois niveaux de complexité pour l'audit des pratiques cliniques. Cette méthodologie profitera aux pays en garantissant un traitement sûr et efficace des cancers gynécologiques. À ce jour, un niveau de contrôle basique permettant d'évaluer l'exactitude d'un paramètre dosimétrique crucial - le débit de kerma à l'air de référence - a été mis au point. Un fantôme simple, léger et économique se prêtant aux audits de la qualité des doses assurés à distance par voie postale a également été créé (figure H.5).



*FIG. H.5. Fantôme simple, léger et économique mis au point par le Laboratoire de dosimétrie de l'Agence qui est utilisé pour les audits en curiethérapie (dosimètre radiophotoluminescent).
(Photo : AIEA)*

168. La méthodologie a été testée dans dix pays participants (Afrique du Sud, Brésil, Chine, Croatie, Fédération de Russie, Grèce, Inde, Mexique, République islamique d'Iran et Royaume-Uni) qui proposent autant de cadres cliniques différents, gage de solidité de la méthodologie. Compte tenu des résultats expérimentaux très prometteurs, un service d'audit de la curiethérapie sera bientôt disponible dans le cadre du Service postal d'audit de la qualité des doses de l'Agence.

169. Les recherches en cours dans le cadre du PRC visent également à mettre au point une méthodologie pour un contrôle plus complexe. Moyennant un audit complet, les hôpitaux pourront utiliser leurs propres applicateurs pour mener à terme toutes les étapes du processus thérapeutique. En retour, cette évolution renforcera la confiance dans la pratique clinique de la curiethérapie, garantissant l'innocuité des soins de santé et la qualité des traitements.

170. Les avantages du nouvel outil de réalité virtuelle de l'Agence pour la formation théorique et pratique en curiethérapie ont été démontrés lors d'un atelier organisé par l'Agence au Mozambique, en juillet 2023. Des spécialistes du pays ont pu s'entraîner à l'exécution de diverses procédures de curiethérapie en gynécologie avant d'appliquer la technique dans leur pratique clinique (figure H.6). Plus de 150 radio-oncologues, physiciens médicaux, dosimétristes et radiothérapeutes de toute l'Afrique ont également pu se former à cet outil lors de l'atelier consacré au contournage électronique que l'Agence a organisé dans le cadre de la 14^e Conférence internationale sur le cancer en Afrique de l'Organisation africaine pour la recherche et l'enseignement sur le cancer, qui s'est tenue au Sénégal, en novembre 2023.



*FIG. H.6. Professionnels de santé (en physique médicale et en radio-oncologie) au Mozambique se formant à la curiethérapie à l'aide du nouvel outil de réalité virtuelle de l'Agence.
(Photos : AIEA)*

171. L'outil de réalité virtuelle de l'Agence est précieux pour améliorer l'accès des professionnels de santé à des formations de qualité en vue de l'acquisition interactive de compétences. Il peut aider à surmonter les contraintes physiques, géographiques et logistiques et favorise l'émergence d'un personnel médical très qualifié et compétent en cancérologie, contribuant à terme à la santé et au bien-être dans le monde.

H.3. L'intérieur du cœur à nu : le rôle crucial de l'imagerie nucléaire dans la détection de l'amylose cardiaque

Situation

172. Une défaillance cardiaque survient lorsque le cœur a du mal à pomper efficacement le sang, privant en partie les tissus et les organes du corps d'oxygène et de nutriments. Elle peut se manifester par des symptômes comme la fatigue, la dyspnée et la rétention d'eau. Dans les cas graves, elle peut entraîner des complications potentiellement mortelles. Une détection précoce et une bonne prise en charge sont primordiales pour améliorer les résultats et atténuer le risque de complications.

173. L'insuffisance cardiaque est généralement classée en deux grandes catégories selon la fraction d'éjection (FE), qui indique le pourcentage de sang éjecté du cœur à chaque battement. Par exemple, une FE de 60 % signifie que le cœur expulse 60 % du sang à chaque contraction. Bien qu'une FE normale se situe d'ordinaire entre 50 % et 70 %, cette valeur peut varier légèrement en fonction du protocole suivi et de la modalité d'imagerie utilisée pour la mesure. Une FE inférieure à la normale indique une capacité réduite du cœur à bien pomper le sang, caractéristique habituelle de l'insuffisance cardiaque.

174. En cas d'insuffisance cardiaque avec réduction de la fraction d'éjection (ICrFE), le muscle cardiaque est affaibli et le cœur pompe le sang moins efficacement. Les personnes qui en souffrent ont généralement une FE inférieure à 40 %. En cas d'insuffisance cardiaque avec préservation de la fraction d'éjection (ICpFE), le cœur pompe normalement, mais le muscle est rigide et ne se dilate pas comme il le devrait entre les battements. La FE est normale ou quasi normale, généralement égale ou supérieure à 50 %. Comme les causes de l'insuffisance cardiaque et les stratégies de prise en charge sont diverses, ces classifications aident à déterminer les méthodes thérapeutiques. Il convient de noter que l'insuffisance cardiaque est un trouble complexe dont les causes sous-jacentes ou les facteurs contributifs peuvent varier d'un cas à l'autre.

175. L'ICpFE résulte souvent d'une combinaison de facteurs, les plus courants étant l'hypertension artérielle, qui peut entraîner l'épaississement et la raideur du muscle cardiaque ; le vieillissement, qui peut affecter la structure et la fonction du cœur ; le diabète, qui peut contribuer à la rigidité du muscle cardiaque ; l'obésité, en particulier l'excès de poids au niveau de l'abdomen ; et une coronopathie, rétrécissement ou obstruction d'une artère coronaire, qui réduit le flux de sang vers le muscle cardiaque. La cardiomyopathie amyloïde ou amylose cardiaque à transthyrétine (ATTR-CM), maladie caractérisée par l'accumulation de dépôts anormaux de protéines (dépôts amyloïdes) dans le tissu cardiaque, est un facteur contributif important qui fait l'objet d'une attention accrue depuis cinq ans. On estime qu'elle touche 13 à 18 % des adultes de plus de 65 ans souffrant d'insuffisance cardiaque et que l'espérance de vie moyenne de ceux qui en sont atteints est de 25 à 41 mois.

176. Les récents progrès de la recherche médicale et des stratégies thérapeutiques ont fait entrer les patients atteints d'amylose cardiaque dans une nouvelle ère, placée sous le signe de l'espoir. Grâce à des médicaments innovants ciblant les mécanismes sous-jacents de l'accumulation de dépôts amyloïdes, mis sur le marché au début de 2019, et à de meilleurs outils d'imagerie diagnostique comme la cardiologie nucléaire, les prestataires de soins peuvent intervenir plus tôt et bien mieux. Ce tournant radical, dû à l'évolution des connaissances sur l'amylose cardiaque et à la disponibilité des traitements, constitue un progrès décisif, car il offre aux patients des raisons d'espérer. Malgré ces points positifs, l'errance diagnostique concernant l'ATTR-CM empêche de profiter pleinement de ces avancées thérapeutiques.

Tendances

177. La cardiologie nucléaire joue un rôle essentiel dans l'évaluation de l'amylose cardiaque. Des techniques d'imagerie avancées comme la scintigraphie au pyrophosphate marqué au technétium 99m (^{99m}Tc-PYP) permettent de poser un diagnostic d'amylose cardiaque avec une bonne spécificité et de la distinguer d'autres troubles cardiaques. Ces modalités d'imagerie donnent des informations précieuses sur les affections du myocarde, facilitant leur diagnostic précoce et la stratification du risque (figures H.7 et H.8). En leur permettant de déterminer l'étendue et la gravité de l'accumulation des dépôts amyloïdes, la cardiologie nucléaire aide les cliniciens à mettre sur pied des interventions thérapeutiques appropriées et à surveiller la progression de la maladie. En outre, le caractère non invasif de ces techniques les rend particulièrement utiles pour la caractérisation approfondie de l'amylose cardiaque, ce qui en retour contribue à une prise en charge plus rapide et plus ciblée.

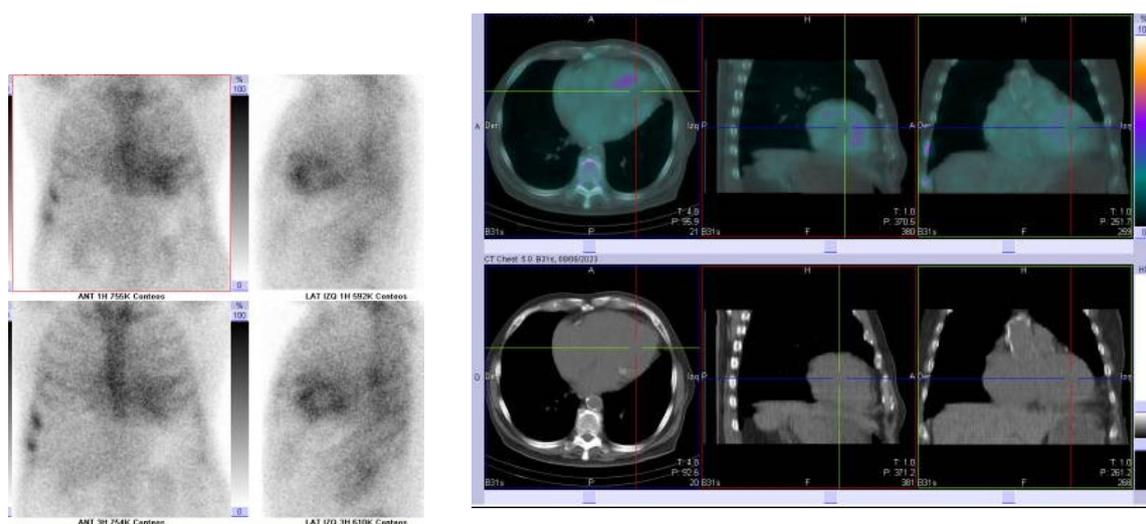


FIG. H.7. Images statiques de face et de côté (à gauche) et images de tomographie d'émission monophotonique-tomodensitométrie (SPECT-CT) (à droite) d'un patient présentant une forte absorption focale anormale de ^{99m}Tc -PYP dans le myocarde, révélatrice de l'ATTR-CM.
(Photos : A. Jiménez-Hefferman/Hôpital Juan Ramón Jiménez)

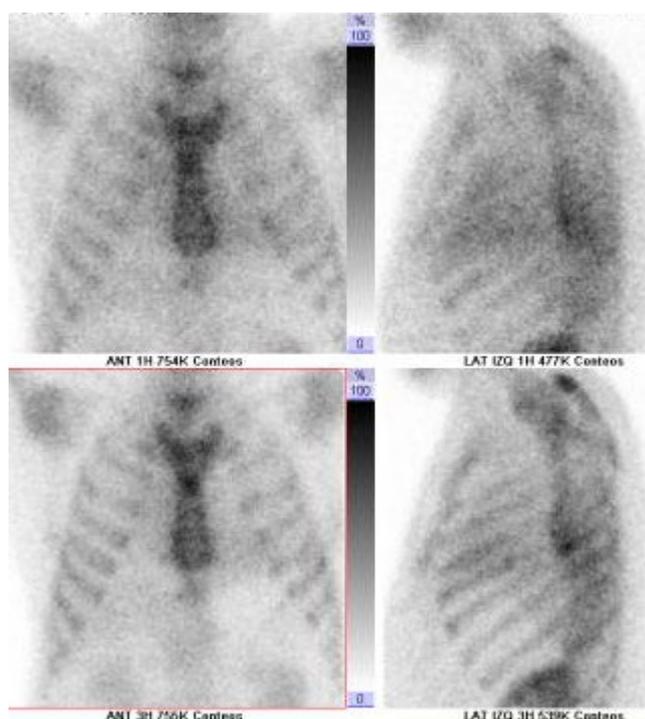


FIG. H.8. Images statiques de face et de côté d'un patient ne présentant aucune absorption anormale de ^{99m}Tc -PYP dans le myocarde : l'ATTR-CM n'est pas la cause de son insuffisance cardiaque.
(Photos : A. Jiménez-Hefferman/Hôpital Juan Ramón Jiménez)

178. Bien que la technologie et les compétences en SPECT au ^{99m}Tc -PYP existent, cette dernière est peu pratiquée pour le diagnostic de l'ATTR-CM dans de nombreux pays. Les critères actuels d'établissement du diagnostic de la maladie ayant été élaborés par des experts en Europe et aux États-Unis d'Amérique, on ne sait pas s'ils sont applicables à des populations ethniquement et socio-économiquement différentes dans le monde.

179. L'Agence exécute un PRC dans le cadre duquel elle mène une étude sur la cardiomyopathie amyloïde à transthyrétine, en vue d'établir durablement dans le monde des compétences affûtées en imagerie au pyrophosphate qui permettront de bien diagnostiquer ce trouble. Elle contribuera ainsi à améliorer le diagnostic et le traitement de l'ICpFE dans le monde entier. Dans le souci constant de proposer un dépistage précoce et des traitements salvateurs, la cardiologie nucléaire commence à donner une lueur espoir aux personnes atteintes d'amylose cardiaque à travers le monde.

I. Alimentation et agriculture

I.1. Les techniques d'irradiation au service de la mise au point de vaccins : applications de technologies nucléaires à la prévention des maladies infectieuses du bétail

Situation

180. Les maladies infectieuses dans le secteur de l'élevage peuvent causer des pertes économiques considérables dans le monde entier. Ainsi, les épidémies de peste bovine ont entraîné la mort de nombreux animaux d'élevage dans le monde entier pendant des siècles, provoquant de longues périodes de pénurie alimentaire et des famines généralisées en milieu rural, en particulier en Afrique et en Asie. En 2011, le monde a été déclaré exempt de cette maladie dévastatrice grâce à la mise au point d'un vaccin efficace et à l'exécution de programmes de vaccination à grande échelle.

181. Les vaccins constituent souvent une solution à moindre coût pour prévenir les maladies. Il est indispensable d'en accélérer la mise au point et la production, car les agents pathogènes nouveaux et réémergents ciblés, contre lesquels il est difficile de lutter, peuvent déclencher des épidémies dévastatrices. Cette demande croissante de vaccins sûrs pour lutter contre les maladies prioritaires souligne l'importance d'évaluer de nouveaux pôles de production de vaccins nécessitant des infrastructures peu onéreuses mais efficaces. L'inactivation des agents pathogènes, approche traditionnelle de la fabrication d'un vaccin, reste un moyen efficace et rapide d'en produire de nouveaux.

182. Actuellement, l'inactivation chimique est la principale technique utilisée pour la production de vaccins. Cependant, l'inactivation induite par les rayonnements offre comparativement de nombreux avantages potentiellement intéressants. Les produits chimiques utilisés pour l'inactivation sont susceptibles de modifier des protéines pathogènes essentielles qui déclenchent des réponses immunitaires. L'inactivation par irradiation, en revanche, préserve ces protéines ainsi que la structure de l'agent pathogène, ce qui contribue à provoquer une réponse immunitaire chez la personne vaccinée lorsqu'elle est exposée à ce dernier. En revanche, elle endommage le matériel génétique de l'agent pathogène, de sorte qu'il n'a plus la capacité de se reproduire et de provoquer une infection. Même si cette technologie est appliquée depuis plus de 50 ans, ce n'est que récemment qu'un regain d'intérêt se manifeste pour la production de vaccins irradiés, qui s'explique par l'arrivée de nouveaux irradiateurs capables d'administrer des doses précises de rayonnements en un laps de temps court, et par l'acquisition de nouvelles connaissances sur le système immunitaire permettant de mieux analyser les réactions à la vaccination.

183. Au cours des dix dernières années, l'Agence a accompli, par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, d'importants progrès dans ce domaine, en menant des activités de recherche-développement sur l'inactivation par irradiation de vaccins contre plus de 20 agents pathogènes des animaux et des zoonoses. Ces travaux consistent notamment à déterminer la bonne dose de rayonnement à appliquer pour tuer les agents pathogènes, à définir les paramètres des vaccinations et à assurer un suivi après la vaccination²⁵. Ainsi, un prototype de vaccin irradié contre la grippe aviaire a donné des résultats prometteurs lors d'essais²⁶.

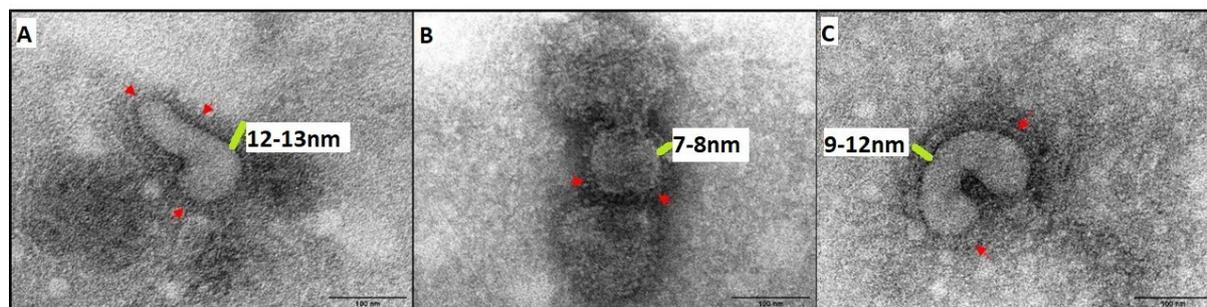


FIG. 1.1. Caractéristiques des vaccins irradiés par rapport aux vaccins traditionnels inactivés par voie chimique : A : virus de la grippe vivant ; B : virus de la grippe à la structure endommagée après inactivation chimique ; et C : virus de la grippe inactivé par irradiation dont la structure est identique à celle du virus vivant de sorte que, lorsqu'il est inoculé, une réplique parfaite de l'agent pathogène est créée chez l'individu vacciné pour lui permettre de s'en protéger lorsqu'il y sera exposé. Les flèches rouges indiquent les molécules induisant l'immunité dans le candidat vaccin et les lignes vertes en indiquent la longueur.

(Source : F. Bonfante/IZSVE, Italie et Frontiers in Veterinary Science, 11 juillet 2022).

Tendances

184. Outre la production de vaccins inactivés, l'irradiation peut servir à la production d'organismes métaboliquement actifs mais ne se reproduisant pas, qui peuvent servir de candidats vaccins, en particulier contre les maladies bactériennes et parasitaires. La dose de rayonnement peut être adaptée pour faire en sorte que les microbes qui y sont exposés ne puissent pas se reproduire (et ne puissent donc pas provoquer d'infection), tout en conservant leur fonction métabolique. Cette méthode présente l'avantage de créer une mémoire immunitaire non seulement contre la structure mais aussi contre les fonctions de l'agent pathogène. Après avoir servi à la production d'un vaccin contre un nématode de l'appareil pulmonaire des bovins, elle a été mise sur le marché. Elle est actuellement envisagée au Sri Lanka dans le cadre d'un PRC visant à produire un vaccin irradié contre un nématode qui infeste les ovins et les caprins dans le monde entier.

185. De récentes avancées techniques permettent également d'inactiver des agents pathogènes à l'aide de faisceaux d'électrons et d'autres sources de rayonnements et ainsi de ne plus dépendre de substances radioactives pour la production de vaccins irradiés aux rayons gamma.

²⁵ Cattoli, G., Ulbert, S. and Wijewardana, V., Editorial: Irradiation Technologies for Vaccine Development, Frontiers in Immunology, 9 January 2023.

²⁶ Alessio Bortolami, et al., Protective Efficacy of H9N2 Avian Influenza Vaccines Inactivated by Ionizing Radiation Methods Administered by the Parenteral or Mucosal Routes, Frontiers in Veterinary Science, Vol. 9, 11 July 2022.

186. En outre, l'utilisation de nouvelles substances radioprotectrices telles que les ions manganèse (Mn^{2+}) et le tréhalose a permis de mieux préserver les molécules des agents pathogènes induisant l'immunité pendant l'inactivation par irradiation.

187. L'innovation technologique a aussi permis d'améliorer les procédures de production de vaccins irradiés. À titre d'exemple, on peut citer l'utilisation en continu d'une fine couche de liquide lors de la production du vaccin inactivé par faisceau d'électrons mis au point par l'Institut Fraunhofer (Allemagne), qui est actuellement envisagé en Tunisie dans le cadre d'un CRP visant à produire un vaccin irradié contre un nodavirus qui menace le bar.



*FIG. I.2. Scientifiques du Sri Lanka évaluant la réponse immunitaire d'une chèvre vaccinée avec un vaccin irradié contre *Haemonchus contortus*, nématode qui peut anéantir les troupeaux d'ovins et de caprins, causant des pertes économiques considérables.
(Photo : T. Anupama/Université de Peradeniya, Sri Lanka)*

I.2. La technologie nucléaire des humidimètres à neutrons de rayons cosmiques couplée à l'imagerie de télédétection au service de la gestion de l'eau à usage agricole

Situation

188. Trois milliards de personnes vivant dans des régions agricoles sont aux prises à de graves, voire très graves, pénuries d'eau. Selon les projections actuelles de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), d'ici à 2050, environ 57 % de la population mondiale pourrait être confrontée à de telles pénuries au moins un mois par an. Les changements climatiques exacerberont ce phénomène, car les conditions météorologiques extrêmes affecteront la disponibilité de l'eau destinée à la production agricole en provoquant sécheresses ou inondations. Il est donc essentiel de disposer d'informations exactes et précises concernant les incidences de ces effets extrêmes sur l'humidité des sols et la productivité de l'eau pour les cultures.

189. Le contrôle de l'humidité du sol est essentiel non seulement pour la gestion de l'irrigation, mais aussi pour la modélisation hydrologique, la réalimentation des eaux souterraines et la prévision des inondations et des sécheresses. Les méthodes traditionnelles et nucléaires permettent de déterminer précisément l'humidité du sol localement (par exemple à un endroit précis dans un champ), tandis que la technologie de la télédétection fournit des données complètes à plus grande échelle.

190. Ces dix dernières années, des progrès importants ont été accomplis dans la mise au point de l'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques. L'Agence, agissant par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, a été le fer de lance de cette innovation grâce au PRC sur l'amélioration de la résilience des systèmes agricoles et de la sécurité hydrique à l'aide d'un humidimètre à neutrons de rayons cosmiques. Ce PRC a pour objectif exigeant de mesurer avec exactitude l'humidité du sol en faisant la soudure entre les nombreuses images satellitaires et les capteurs terrestres localisés pour une gestion efficace de l'utilisation de l'eau à usage agricole. L'humidimètre détecte les neutrons de faible énergie près de la surface du sol, ce qui permet de contrôler l'humidité de ce dernier sur de vastes superficies pouvant aller jusqu'à 40 hectares. Les perfectionnements qui y ont été apportés en ont amélioré la disponibilité et la rentabilité pour les décideurs et les agriculteurs, accélérant son adoption par les différentes parties prenantes.

191. Pour optimiser les retombées de l'assistance fournie par l'AIEA aux États Membres par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, l'initiative Atoms4Food a été lancée par le Directeur général de l'AIEA, M. Grossi, et le Directeur général de la FAO, M. Qu Dongyu, lors du Forum mondial de l'alimentation qui s'est tenu à Rome en octobre 2023 (figure I.3). Couplée à de nouvelles activités de recherche-développement, elle vise à relever les défis posés par les besoins croissants en matière de sécurité alimentaire et à renforcer la résistance aux changements climatiques dans le monde entier.



FIG. I.3. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, et QU Dongyu, Directeur général de la FAO, ont lancé l'initiative Atoms4Food le 18 octobre 2023 lors du Forum mondial de l'alimentation qui s'est tenu à Rome. (Photo : AIEA)

Tendances

192. Jusqu'à récemment, la plupart des humidimètres à neutrons de rayons cosmiques comportaient des compteurs cylindriques proportionnels à gaz (généralement de l'hélium 3 ou du trifluorure de bore 10). Bien que ces cylindres soient très sensibles aux neutrons (indicateurs indirects de l'humidité du sol), ils sont relativement coûteux, ce qui nuit au transfert de cette technologie à l'échelle mondiale. Toutefois, à l'heure actuelle, des instituts de recherche et des entreprises commerciales utilisent ou testent des détecteurs à base de lithium et de matériaux plastiques et métalliques spécifiques, ce qui a entraîné une nette baisse des prix depuis la mise au point de ces appareils au début du XXI^e siècle.

193. La technologie des humidimètres à neutrons de rayons cosmiques est désormais utilisée conjointement avec des images de télédétection à haute résolution. La combinaison de techniques nucléaires et numériques permet de contrôler chaque semaine l'humidité des sols sur de vastes superficies ou au niveau des lignes de partage des eaux. Cette technologie d'avant-garde pourrait révolutionner la télédétection et permettre d'instituer une irrigation intelligente face au climat et, partant, d'améliorer sensiblement l'accès des décideurs et agriculteurs aux données de référence. Cela permettrait aussi d'améliorer l'utilisation durable des ressources en eau dans l'agriculture et de satisfaire à la cible 4 de l'ODD 6, qui consiste à augmenter l'utilisation rationnelle des ressources en eau et l'approvisionnement en eau douce.

194. Cette combinaison de techniques nucléaires et numériques est mise en œuvre maintenant, pour la première fois, dans des pays du monde entier afin de contribuer à la conservation des ressources en eau aux fins d'une production alimentaire durable. En Afrique, la technologie a été implantée dans 23 pays couvrant les principales formes d'utilisation des terres et zones climatiques du continent, en particulier celles qui souffrent de sécheresse. Ces travaux ouvrent aussi la voie à un ensemble d'applications potentielles pour la recherche environnementale : validation de données de télédétection, analyse des tendances de l'humidité du sol, modélisation de la productivité de l'eau pour les cultures, surveillance des variations de la disponibilité de l'eau dans les zones humides, etc.



*FIG. I.4 : Humidimètre à neutrons de rayons cosmiques installé à haute altitude dans des zones humides des Andes boliviennes pour l'étude de leur capacité de régulation hydrique en période de changements climatiques.
(Photo : T. Franz, Université de Nebraska-Lincoln)*

195. Dans l'État plurinational de Bolivie, un humidimètre à neutrons de rayons cosmiques a été installé dans des zones humides situées à environ 4 500 mètres au-dessus du niveau de la mer (figure I.4). Ces zones humides se trouvent à proximité des neiges éternelles du Huayna Potosi (6 088 mètres) dans la

cordillère Royale, qui a perdu plus d'un tiers de ses glaciers sous l'effet des changements climatiques, affectant l'approvisionnement en eau de millions de Boliviens. Cet appareil aidera les scientifiques à estimer la capacité de régulation hydrique des zones humides, à prévoir l'ampleur et la probabilité des sécheresses, facilitant ainsi la prise de décisions lors de l'élaboration de politiques d'adaptation aux changements climatiques.



FIG. I.5 : Cours sur l'utilisation des humidimètres à neutrons de rayons cosmiques organisé à Seibersdorf (Autriche) dans le cadre du projet régional de coopération technique RAF5086 [Promotion d'une agriculture durable face à l'évolution des conditions climatiques grâce à la technologie nucléaire (AFRA)]. (Photo : AIEA)

196. Grâce à des formations et à des transferts de technologie, l'Agence vise, par l'intermédiaire du Centre mixte FAO/AIEA, à optimiser et à renforcer les capacités des pays à appliquer cette technique nucléaire aux fins d'une utilisation durable de leurs ressources en eau pour la sécurité alimentaire (figure I.5).

197. Le 29 décembre 2023, l'AIEA et l'Argentine ont signé un mémorandum d'accord visant à renforcer la coopération dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture dans le cadre de l'initiative Atoms4Food récemment lancée (figure I.6), mémorandum qui énumère quatre secteurs prioritaires : la technologie d'irradiation des aliments, la santé animale, la technique de l'insecte stérile et l'identification de carbone renouvelable dans les produits biosourcés.

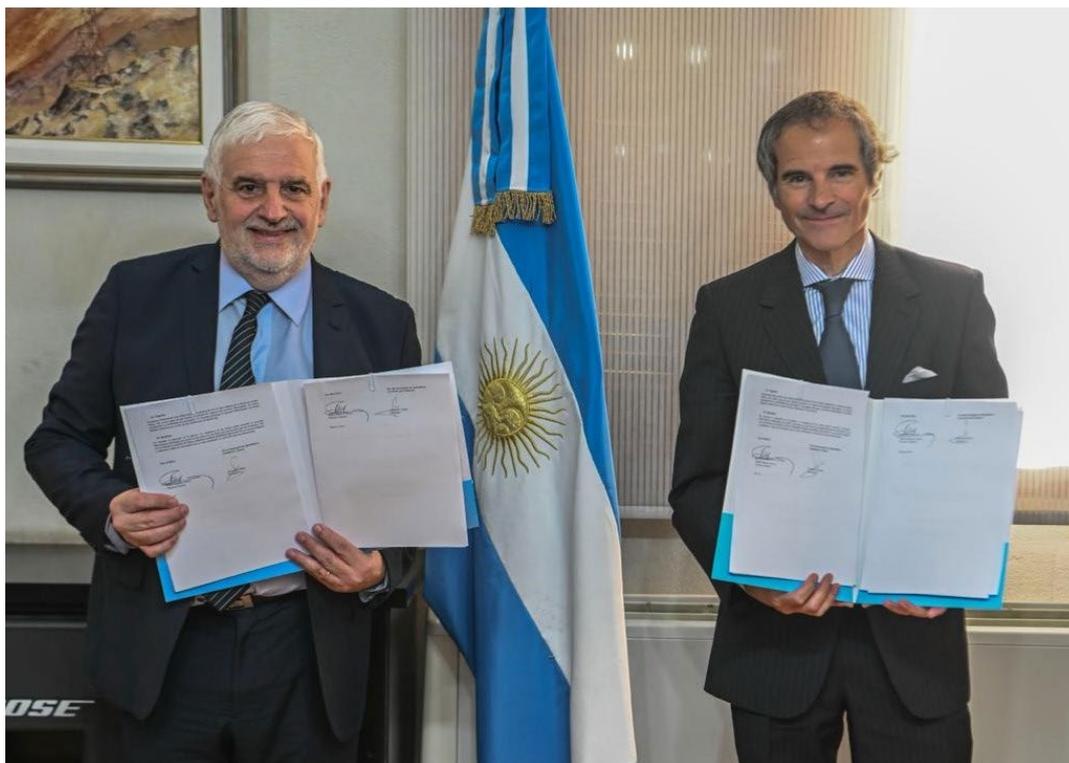


FIG. I.6 : Le Directeur général de l'AIEA Grossi (à droite), et le professeur Fernando Vilella, Directeur de la faculté d'agronomie de l'Université de Buenos Aires, ont signé le 29 décembre 2023 un mémorandum d'accord entre l'AIEA et le Secrétariat de l'alimentation et de la bioéconomie du Ministère argentin de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche, portant sur la coopération dans le cadre de l'initiative Atoms4Food. (Photo : AIEA)

J. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements

J.1. Nouveaux systèmes d'administration de radiopharmaceutiques ciblant les cellules

Situation

198. L'utilisation de radiopharmaceutiques constitue un moyen sûr et efficace d'acheminer les radionucléides jusqu'aux organes, tissus ou cellules cibles à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. Il convient que les radionucléides atteignent leur cible et n'y restent que le temps nécessaire aux besoins cliniques, pour éviter toute accumulation dans les tissus sains et radioexposition superflue. L'iode radioactif, dont on se sert pour le diagnostic et le traitement des maladies thyroïdiennes depuis le début des années 1940, a été le premier radionucléide à être ainsi utilisé. L'utilisation du fluorure de sodium marqué au fluor 18 dans l'imagerie osseuse et du chlorure de radium 223 et du chlorure de strontium 89 dans le traitement radio-isotopique des métastases osseuses sont d'autres exemples de solutions simples d'utilisation des radiopharmaceutiques. Cependant, l'utilisation de radiopharmaceutiques devient plus complexe lorsque différents radionucléides doivent être marqués avec différents types de vecteurs, comme de petites molécules, des peptides, des anticorps et leurs fragments, qui peuvent reconnaître avec précision les cibles cellulaires chez les cellules cancéreuses²⁷ (figure J.1).

²⁷ Bodei L., Herrmann K., Schöder H., Scott A. M. and Lewis J. S. Radiotheranostics in oncology: current challenges and emerging opportunities. *Nature Reviews Clinical Oncology* 19, 534–550 (2022).

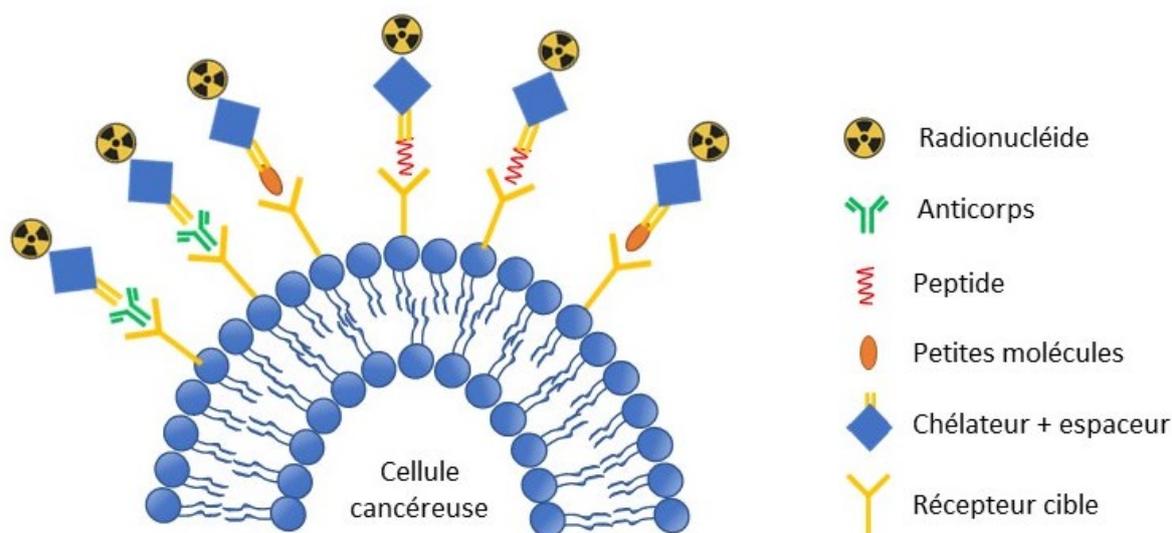


FIG. J.1. Représentation schématique de modèles de radiopharmaceutiques. [Illustration : AIEA)

199. Aujourd'hui, les radiopharmaceutiques ont prouvé leur utilité clinique non seulement pour l'imagerie fonctionnelle des organes, mais aussi pour la visualisation non invasive de cellules cancéreuses quand ils sont adaptés à la cible. Cette avancée ouvre la voie à un traitement personnalisé, notamment par immunothérapie et par administration de radiopharmaceutiques à usage thérapeutique, comme ceux qui ont été récemment approuvés pour le cancer de la prostate et les cancers neuroendocriniens²⁸. La suite du traitement peut être assurée à l'aide de radiopharmaceutiques à visée diagnostique.

200. Les radionucléides possédant les propriétés physiques se prêtant à l'imagerie diagnostique ou à la thérapie sont de plus en plus disponibles, grâce aux progrès techniques et aux réseaux de collaboration présents dans de nombreux pays²⁹. La recherche biomédicale contribue également à la mise au point de molécules qui peuvent être utilisées pour le marquage isotopique de nouvelles cibles cellulaires propres à certaines maladies et pour des travaux précliniques. Toutefois, leur application dans la pratique clinique se heurte à un goulet d'étranglement, en raison de divers problèmes liés aux barrières biologiques et aux interactions au niveau cellulaire qui entraînent des phénomènes de dégradation, des réactions du métabolisme et des réactions indésirables toxiques. Il devient de plus en plus complexe d'optimiser les formules de radiopharmaceutiques lorsqu'il s'agit de radionucléides qui se désintègrent en émettant des électrons bêta, alpha et Auger de courte portée, sans les émissions gamma associées qui se prêtent à l'imagerie.

Tendances

201. L'un des moyens de relever ces défis consiste à recourir à des systèmes d'administration similaires à ceux utilisés pour les produits pharmaceutiques et les vaccins non radioactifs. Les systèmes de nanotransporteurs, y compris ceux de nanothéranostique, comportant différentes permutations et combinaisons de modalités d'imagerie, de médicaments et de radionucléides, qui pourraient aider à

²⁸ Page web de l'Office de contrôle des produits alimentaires et pharmaceutiques (Food and Drug Administration) : <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cder/daf/index.cfm>

²⁹ Premier résumé publiable de PRISMAP (PRISMAP, 2022) : https://www.prismap.eu/members/repository/Public/Publishable_summaries/PRISMAP_PubSum_1.pdf

améliorer l'innocuité et l'efficacité des médicaments, font l'objet d'études approfondies. Dans les systèmes biologiques, de nombreux mécanismes intervenant dans une cellule se produisent naturellement à l'échelle du nanomètre (10⁻⁹ m). L'administration de nanoparticules devrait donc offrir de nombreux avantages, tels qu'une meilleure concentration des radionucléides à visée thérapeutique au niveau de la cible et une atténuation des effets secondaires³⁰, du fait d'une modification de la pharmacocinétique des médicaments. Il existe différents modèles de systèmes d'administration de nanoparticules (dendrimères, liposomes, micelles, nanocapsules et nanosphères, etc.) ainsi que différents types de nanoparticules (par exemple nanoparticules inorganiques, polymériques, lipidiques solides et autres)³¹ (figure J.2).

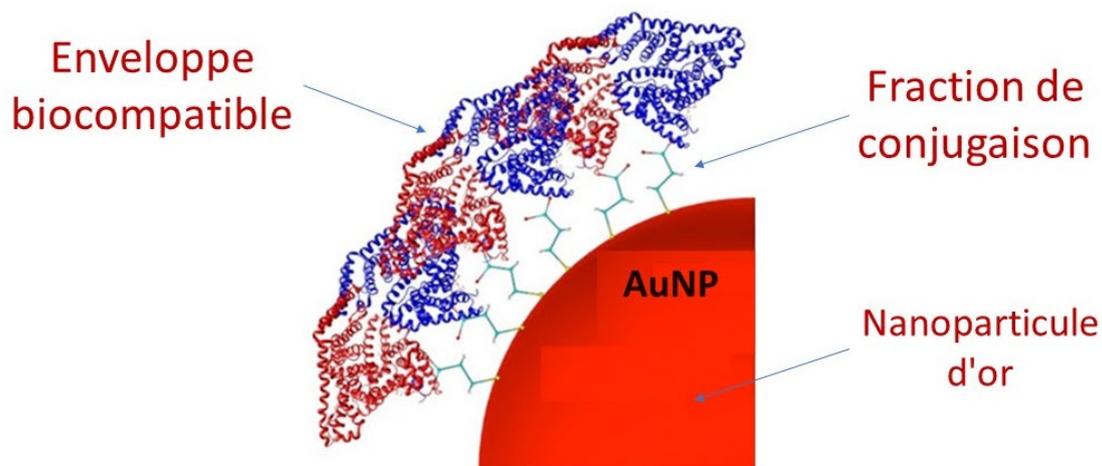


FIG. J.2. Schéma d'une nanoparticule d'or conjuguée (Au) utilisée pour la mise au point de radiopharmaceutiques. (Illustration : AIEA)

202. De nombreux radiopharmaceutiques faisant actuellement l'objet d'une évaluation préclinique sont basés sur des anticorps, des protéines ou des nanomédicaments qui peuvent cibler le microenvironnement tumoral, de manière active ou passive. De meilleurs systèmes d'administration qui sont en cours d'élaboration permettront d'étudier le potentiel caché des traitements ciblés aux radionucléides. La chimie click et la chimie bio-orthogonale, qui font l'objet d'une attention accrue depuis que le prix Nobel de chimie 2022 a été décerné à des chercheurs travaillant dans ces domaines, ont également été appliquées en radiochimie et aux systèmes d'administration, principalement pour l'administration efficace de radio-immunoconjugués (radionucléides à visée diagnostique ou thérapeutique combinés à des substances immunitaires spécifiques)³².

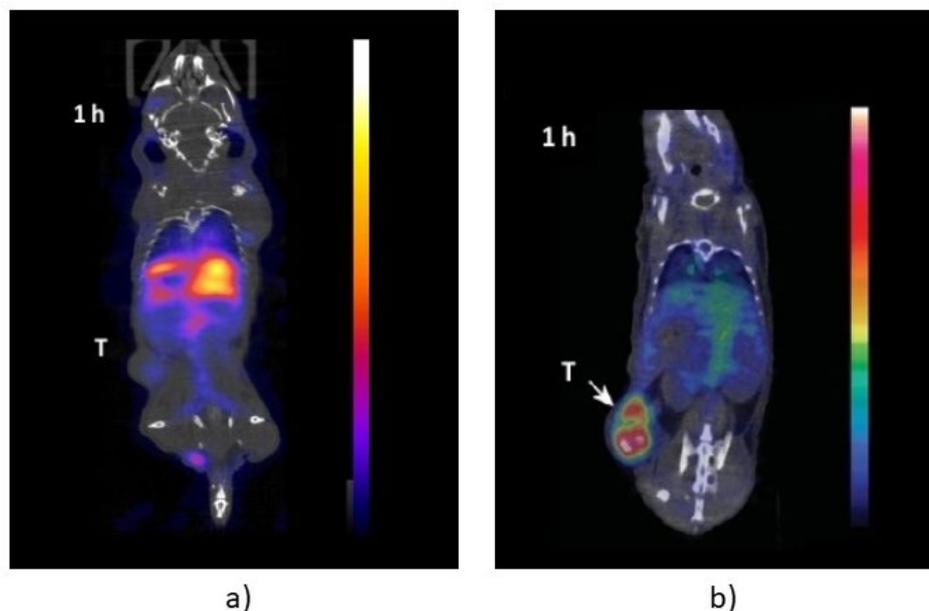
203. Ces systèmes d'administration ciblée peuvent tous être associés à des techniques de préciblage, des combinaisons de chimiothérapies ou des agents radiosensibilisants. Les techniques de préciblage sont à même de révolutionner les stratégies théranostiques modernes, car elles peuvent très rapidement multiplier par 150 le rapport signal/bruit de fond, comme le montre la figure J.3. D'après les premiers résultats, elles surpasseraient même les méthodes traditionnelles de traitement ciblé aux radionucléides. L'obtention plus rapide d'un meilleur rapport signal/bruit de fond et la préaccumulation d'anticorps

³⁰ Jani, P. Subramanian, S., Korde, A., Rathod, L. and Sawant, K. Theranostic Nanocarriers in Cancer: Dual Capabilities on a Single Platform. Functional Bionanomaterials Nanotechnology in the Life Sciences, 293 Thangadurai, D. et al. Functional Bionanomaterials. Nanotechnology in the Life Sciences, 293–310 (2020).

³¹ Jalilian, A. R., Ocampo-García, B. et al. IAEA Contribution to Nanosized Targeted Radiopharmaceuticals for Drug Delivery, Pharmaceutics 14, 1060 (2022).

³² Kondengadan, S. M., Bansla, S., Yang, C. et al. Click chemistry and drug delivery: A bird's-eye view. Acta Pharmaceutica Sinica B 13, 1990 (2023).

permettent d'utiliser des radionucléides à courte période, ce qui réduit le risque d'exposition de tissus sains aux rayonnements.



*FIG. J.3 Visualisations de la radioimmunodétection de la glycoprotéine 72 associée à la tumeur ciblant l'anticorps monoclonal CC49 par la méthode traditionnelle a) et par la technique de pré-ciblage b) aux fins d'une bonne administration du radiopharmaceutique.
[Source : Pharmaceuticals 15, 685 (2022)³³]*

204. Les futures activités de l'Agence viseront à créer un groupe pluridisciplinaire d'experts dans ce domaine afin de déterminer les systèmes les plus prometteurs, de recenser les difficultés associées et d'élaborer des solutions pour la traduction de ces évolutions dans la pratique clinique. Un PRC prévu pour 2025 aidera les États Membres à se préparer à les mettre progressivement en pratique en vue de l'administration efficace de radiopharmaceutiques. À cet égard, la mise en commun des connaissances et le transfert de technologies dans le cadre de l'Agence revêtent une grande importance.

J.2. Technologie des radiotraceurs et zones humides artificielles pour la récupération des eaux usées provenant de l'industrie minière

Situation

205. Les industries minières et de traitement des minerais contribuent certes largement à l'économie mondiale, mais elles sont également connues pour leurs effets néfastes sur l'environnement. Le rejet direct dans l'environnement d'eaux usées provenant de l'industrie minière qui contiennent des polluants organiques et inorganiques entraîne non seulement une pollution de l'environnement, mais aussi un gaspillage de ressources en eau qui s'amenuisent. Le recyclage et la réutilisation sont par conséquent des opérations indispensables au développement d'une économie circulaire dans le secteur du traitement des minerais.

206. Les systèmes classiques de traitement des eaux usées ont des capacités très limitées d'élimination des polluants persistants présents dans différents types d'eaux usées, ainsi qu'en ce qui concerne l'accumulation, le traitement et l'évacuation des boues. Non seulement ils sont fréquemment en panne

³³ García-Vázquez, R., Battisti, U. M. and Herth, M. M. Recent Advances in the Development of Tetrazine Ligation Tools for Pretargeted Nuclear Imaging. *Pharmaceuticals* 15, 685 (2022).

en raison de défaillances mécaniques ou de mauvaises manipulations, mais aussi ils sont coûteux et requièrent un personnel possédant un niveau de compétence technique élevé aux stades de leur construction, de leur utilisation et de leur maintenance. Au cours des dernières décennies, l'Agence a facilité les applications de la technologie des radiotraceurs dans le secteur industriel, l'objectif étant de procéder à un examen rigoureux de diverses installations de traitement des eaux usées (par exemple mélangeurs, aérateurs, clarificateurs, digesteurs, réservoirs de sédimentation et bassins de filtration).



FIG. J.4. Eaux usées issues de l'industrie minière, vallée de Boinas, Belmonte de Miranda, Asturies (Espagne). (Source : Adobe Stock)

207. La technologie des radiotraceurs joue un rôle important dans l'industrie du traitement des minerais : elle permet d'étudier des procédés employés dans des installations industrielles et d'en détecter les défaillances, en vue de leur optimisation. Bien qu'elle puisse être appliquée dans des domaines très divers, ses principaux groupes cibles d'utilisateurs sont les industries pétrolières et pétrochimiques et les secteurs du traitement des minerais et du traitement des eaux usées. Elle fait appel à des sources radioactives scellées ou non scellées ou bien à des systèmes de contrôle nucléonique, utilisés seuls ou en association, en fonction du problème à traiter. S'agissant des sources non scellées, couramment utilisées pour l'étude de l'hydrodynamique, un radiotraceur est injecté dans un système industriel. Grâce à des détecteurs de rayonnement et à un système intégré d'acquisition de données, on en mesure l'activité à la sortie du système ; on obtient une courbe d'âge en sortie qui peut fournir des données importantes sur l'écoulement des fluides.

208. Si la technologie des radiotraceurs a contribué à améliorer l'efficacité des stations d'épuration classiques, il subsiste une demande pour d'autres méthodes plus faciles à mettre en place, à appliquer et

à entretenir. Cette demande a conduit à de nouvelles avancées dans le traitement des eaux usées qui visent à surmonter ces difficultés persistantes.

209. Les zones humides artificielles constituent une alternative intéressante aux stations d'épuration classiques. Conçues pour exploiter les processus naturels des plantes, des sols et des populations microbiennes d'une zone humide, elles vont traiter les contaminants présents dans les eaux de surface, les eaux souterraines ou les flux de déchets. Elles sont économiques et respectueuses de l'environnement, en raison de leur faible consommation d'énergie et de la simplicité de leur infrastructure mécanique. Au cours des cinquante dernières années, elles sont apparues comme une technologie de traitement fiable, adaptée à tous les types d'eaux usées : eaux d'égout, effluents industriels et agricoles, lixiviats de décharges et eaux pluviales de ruissellement, etc. Malgré les avantages qu'elles présentent par rapport aux stations d'épuration classiques, on n'en connaît pas encore suffisamment bien l'hydrodynamique complexe, ce qui ne facilite pas l'exécution et l'optimisation du processus de traitement. Pour remédier à ces insuffisances, l'Agence a lancé un PRC qui vise à mettre au point une méthode de radiotraçage applicable à l'étude des zones humides artificielles, à établir des protocoles et des lignes directrices pertinents et à valider des modèles d'écoulement pour les zones humides artificielles.



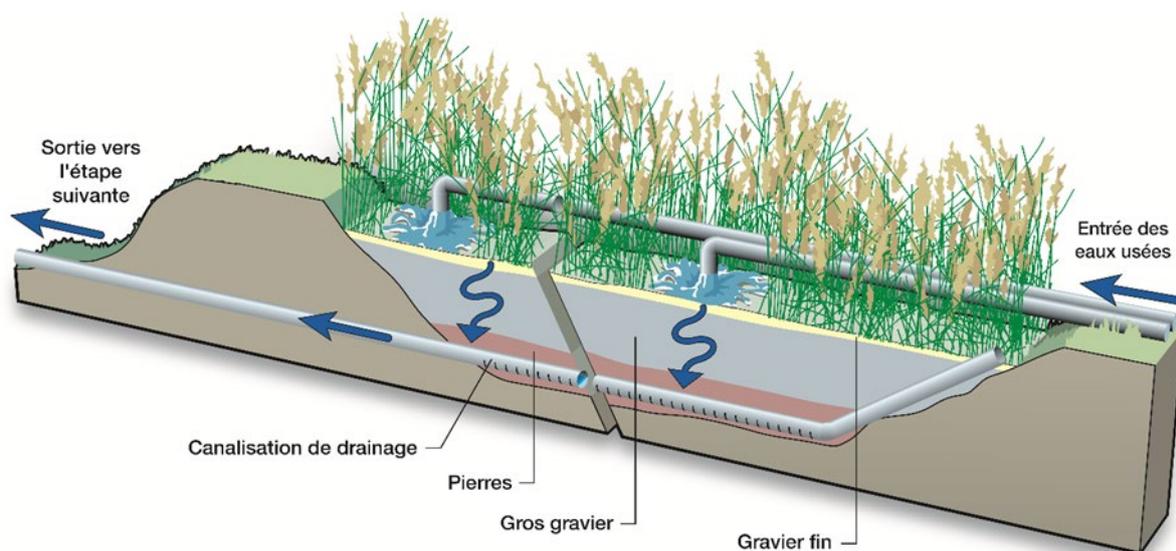
*FIG. J.5 Système traditionnel de traitement des eaux usées (Biélorus).
(Source : AIEA, d'après un graphique de Graphithèque/Adobe Stock)*

Tendances

210. L'industrie minière devrait se développer dans un avenir prévisible, car la demande de nouvelles technologies tributaires de matières critiques continue d'augmenter. Les plans de restauration et de fermeture des sites miniers, dépendant de ressources en eau qui s'amenuisent, sont importants pour assurer le succès final des opérations. Ils prennent en considération tous les problèmes possibles liés au

site et à sa station d'épuration et peuvent inclure un traitement des eaux après la fermeture, en sus du prélèvement d'échantillons à effectuer sur le long terme. Le modèle de l'économie circulaire a aussi récemment retenu l'attention car il pourrait s'adapter à ce scénario complexe, en favorisant l'adoption de nouvelles technologies et stratégies de traitement.

211. L'efficacité de l'utilisation des zones humides artificielles pour l'élimination de divers polluants est bien connue. Néanmoins, les recherches qui leur sont consacrées ont surtout été axées sur les procédés de traitement biologique et chimique, effectuées au moyen de tests en « boîte noire » qui comparent les concentrations de polluants à l'entrée et à la sortie d'une zone, au détriment des caractéristiques de l'écoulement, clé du transport et de l'élimination des polluants, qui sont déterminantes pour la bonne marche du système dans son ensemble.



*FIG. J.6 Schéma d'une zone humide artificielle.
(Source : AIEA, d'après un graphique de Graphithèque/Adobe Stock)*

212. Un nouveau PRC de l'Agence sur la performance du système hydraulique des zones humides artificielles pour la récupération des eaux usées provenant de l'industrie minière, en cours d'élaboration, portera sur l'étude des paramètres de conception liés aux processus hydrauliques et l'interdépendance de ces derniers et des processus affectant la qualité de l'eau à l'aide de radiotraceurs en sources non scellées. Il visera à mettre au point des modèles et outils qui optimiseront l'élimination des polluants dans les zones humides artificielles en fournissant des données spatiales et temporelles détaillées, ainsi qu'à prédire la réponse dynamique d'une zone humide dans diverses conditions. Les protocoles et lignes directrices régissant l'utilisation de radiotraceurs dans les zones humides artificielles, élaborés dans le cadre d'un PRC en cours, lui seront très précieux.

K. Hydrologie isotopique

K.1. Suivi du cycle de l'eau : faits nouveaux dans l'analyse du tritium

Situation

213. Le tritium, seul isotope radioactif présent dans les molécules d'eau, est un marqueur précieux des processus à l'œuvre dans le cycle de l'eau. Du fait de sa courte période (12,3 ans), il est principalement utilisé en hydrologie pour l'estimation de la recharge en eaux souterraines et du risque de pollution. Il est produit naturellement par interaction des rayons cosmiques avec l'azote 14 dans la haute atmosphère, au rythme d'environ 258 grammes par an. On en trouve aussi dans l'industrie nucléaire en tant que sous-produit, à un niveau comparable à celui dû aux sources naturelles.

214. Au cours de la période 1945-1963, plus de 500 kilogrammes de tritium ont été rejetés dans l'atmosphère à la suite des essais d'engins thermonucléaires dans l'atmosphère ; la quantité de cet isotope à travers le monde a ainsi augmenté de plusieurs ordres de grandeur par rapport à son niveau naturel dans les précipitations. Depuis l'interdiction des essais atmosphériques en 1963, les quantités de tritium de l'eau dans l'atmosphère ont lentement diminué pour finalement se stabiliser. Sa faible concentration dans les eaux naturelles contemporaines rend les opérations de sa mesure techniquement difficiles. Pour un comptage satisfaisant de la décroissance radioactive donnant lieu à des résultats exacts et précis qui se prêteront à des applications fiables en hydrologie menées à l'aide de compteurs à scintillation liquide commerciaux, il faut procéder à un enrichissement important en tritium (préconcentration de 15 à 100 fois).

215. L'enrichissement en tritium est en général réalisé à l'aide de cellules électrolytiques alcalines dotées d'électrodes en nickel-nickel ou en acier inoxydable, qui ont été conçues au début des années 1960. Selon un récent test de compétence en intercomparaison de la teneur en tritium auquel ont participé environ 90 laboratoires en 2018, plus de 75 % des laboratoires compétents dans le monde se servent de telles cellules à électrodes en acier inoxydable de 250 mL ou 500 mL pour mesurer le tritium dans des échantillons d'eau prélevés dans l'environnement. Cependant, près de la moitié d'entre eux ont produit des résultats inexacts pour les faibles et très faibles niveaux de tritium dans les échantillons d'eau, ce qui rend ces résultats impropres à des applications en hydrologie. Ces mauvais résultats sont dus à un faible enrichissement en tritium ou à des problèmes généraux de post-traitement des données.

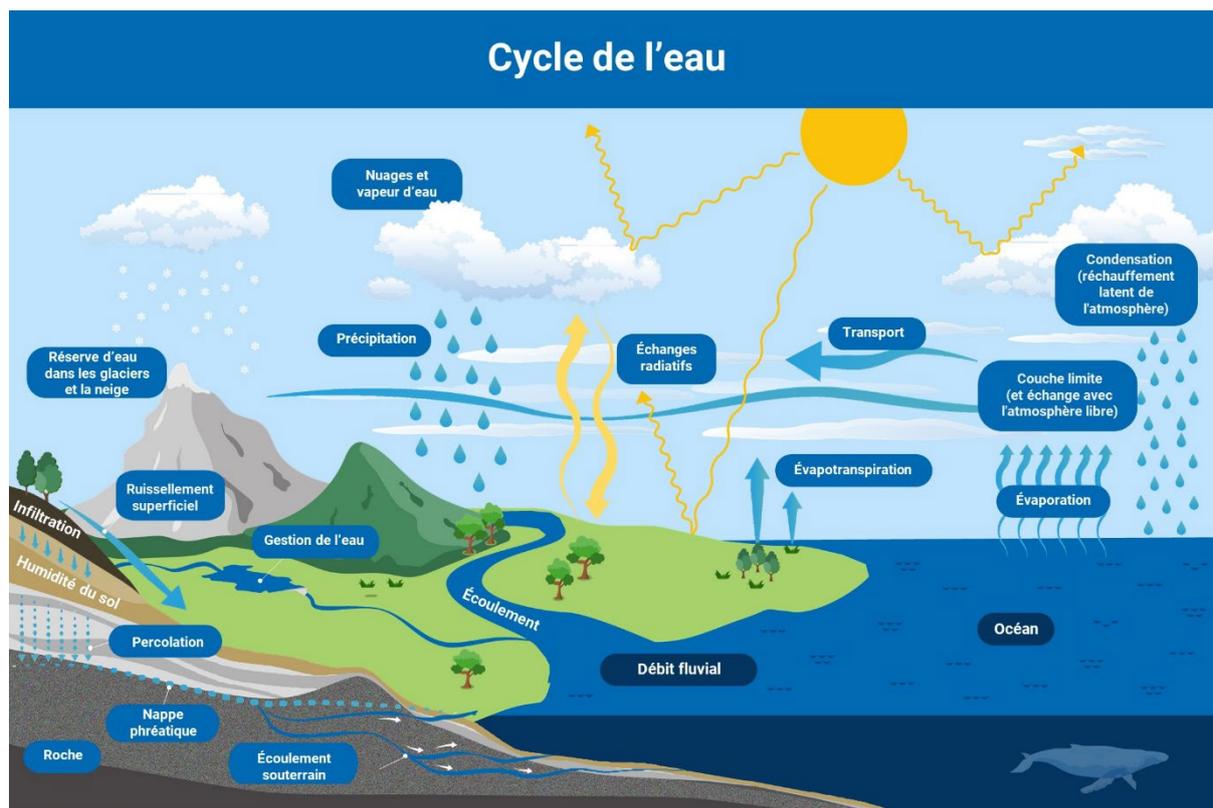


FIG. K.1. Le cycle de l'eau. (Illustration : AIEA)

Tendances

216. Pour répondre à la nécessité d'un enrichissement plus élevé en tritium, le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'Agence a mis au point à cette fin et testé à grande échelle un système innovant de membrane à électrolyte polymère. Ce dernier devrait radicalement améliorer la capacité des États Membres à déterminer les concentrations de tritium, même extrêmement faibles, dans des échantillons d'eau prélevés dans l'environnement, et ce à des fins de contrôle hydrologique et radiologique.

217. Le nouveau système d'enrichissement en tritium, qui peut donner des facteurs de préconcentration élevés (plus de 60 fois), n'a pas certains des inconvénients des méthodes classiques d'enrichissement, notamment l'utilisation de produits chimiques dangereux pour l'électrolyse et la neutralisation, ainsi que d'un appareil d'électrolyse complexe dont on doit souvent contrôler le refroidissement et la température. En outre, il vise à simplifier et à raccourcir la procédure d'analyse, facilitant ainsi beaucoup les choses pour les États Membres désireux d'utiliser le tritium en tant que traceur pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau.

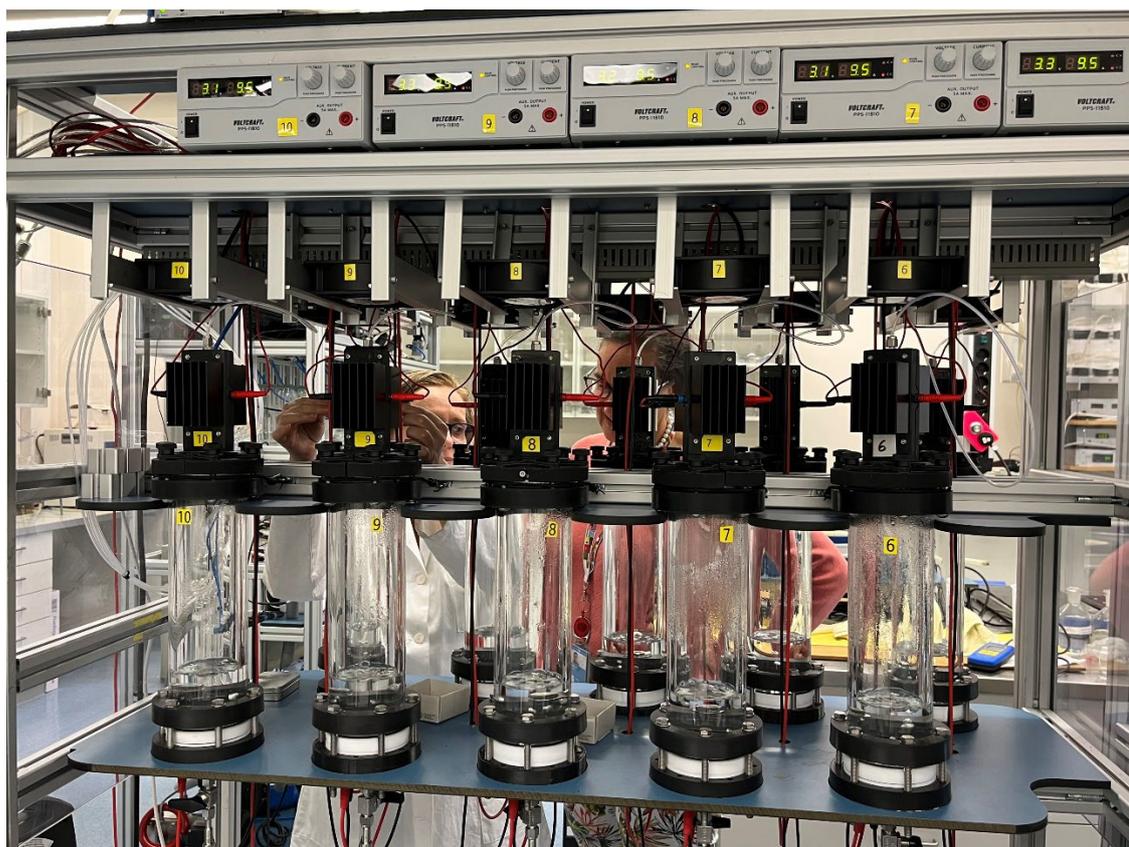


FIG. K.2. Vue de face du système d'enrichissement en tritium à membrane à électrolyte polymère de l'Agence composé de dix cellules électrolytiques traitant un ensemble d'échantillons de référence afin de tester l'exactitude et la précision. (Photo : AIEA)

218. Les progrès de la technologie d'enrichissement en tritium permettront d'affiner la discrimination des sources anthropiques par rapport aux sources naturelles et d'améliorer la disponibilité des données de référence sur le tritium à l'état naturel.



*FIG. K.3. Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, prononçant le discours d'ouverture de la cérémonie de lancement du Réseau mondial des laboratoires d'analyse de l'eau (Réseau GloWAL) lors de la Conférence des Nations Unies sur l'eau 2023, tenue à New York.
(Photo : AIEA)*

L. Environnement marin

L.1. Améliorer la surveillance et les recherches concernant la pollution par les microplastiques dans l'océan grâce à l'intelligence artificielle

Situation

219. L'abondance de plastiques provenant de sources terrestres dans les océans a transformé des environnements marins en dépôts de déchets plastiques. Les écosystèmes marins sont confrontés à une crise grandissante, l'afflux annuel de plus de 12 millions de tonnes de plastique d'origine terrestre ayant entraîné une hausse brutale de la pollution des océans par les microplastiques et nanoplastiques. Pour faire face à ce phénomène spectaculaire, l'initiative NUTEC Plastics (Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique) de l'AIEA consiste à surveiller les microplastiques et à en évaluer l'impact sur le milieu marin. Malgré les progrès accomplis dans la compréhension de la pollution des mers par le plastique, il est encore difficile de quantifier et de caractériser les microplastiques, en raison de leurs processus de dégradation complexes et de l'absence de bases de données complètes sur les polymères. Dans le cadre de ses recherches, NUTEC Plastics œuvre à la

création d'une base de données mondiale sur les microplastiques à différents stades de dégradation dans l'environnement.

220. L'AIEA travaille en étroite collaboration avec les États Membres à mettre sur pied des usines pilotes de recyclage des déchets plastiques en produits utiles. L'Argentine, l'Indonésie, la Malaisie et les Philippines ont bien avancé en vue de la construction de prototypes techniques en 2024, en coopération avec des partenaires industriels. Les applications les plus prometteuses concernent des matériaux de construction abordables, durables et de qualité, la thermo-pyrolyse radio-assistée pour la production de carburants et d'additifs, et l'amélioration des traverses de chemin de fer.



FIG. L.1. Scientifiques des Laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA analysant les caractéristiques chimiques des microplastiques dans des échantillons de l'environnement marin à l'aide de la spectroscopie vibrationnelle, de la spectroscopie Raman et de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. (Photo : AIEA)

221. Plusieurs techniques qui font appel à l'interaction de photons avec la matière, telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (spectroscopie IRTF), la spectroscopie Raman et l'imagerie infrarouge directe par laser (LDIR), ont été utilisées pour la détection et la caractérisation de polymères et de microplastiques. Elles s'appuient sur des bases de données contenant des spectres de référence, auxquels sont comparés les spectres des particules prélevés. Alors que les spectres de référence sont habituellement obtenus à partir de polymères vierges, les particules présentes dans les échantillons environnementaux restent rarement vierges et se dégradent souvent sous l'effet de facteurs tels que l'exposition à la lumière ultraviolette et l'oxydation. Ce phénomène altère les propriétés physicochimiques des échantillons environnementaux, influe sur leur interaction avec la lumière infrarouge et entraîne une modification des profils spectraux, augmentant ainsi le risque d'erreur d'identification. Attendu que la création d'une base de données contenant des spectres de polymères à différents stades de dégradation serait une tâche à forte intensité de travail, voire irréalisable, la nécessité

s'impose de trouver d'autres approches combinant des techniques d'analyse plus rapides et des méthodes avancées d'analyse de données pour l'exploitation des informations existantes sur les échantillons aussi bien vierges que dégradés.

222. L'imagerie infrarouge directe par laser s'est récemment imposée comme une technique de substitution dans les Laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA pour l'analyse des microplastiques et des polymères présents dans des échantillons d'eau de mer, de sédiments marins et de biote marin. Contrairement à la spectroscopie IRTF, elle a pour avantage de balayer les échantillons avant de donner une image réelle et d'analyser uniquement les zones où des particules ont été détectées. Les temps d'analyse sont donc plus courts, en particulier en présence d'échantillons contenant très peu de particules. Toutefois, la LDIR a notamment pour inconvénient d'identifier parfois à tort deux particules accolées comme étant une seule unité, alors qu'un seul spectre est enregistré par particule. En outre, par rapport à d'autres techniques telles que la spectroscopie IRTF, elle est plus susceptible de donner lieu à des erreurs d'identification lors de l'analyse de particules altérées, car la bande infrarouge enregistrée avec ses instruments est plus étroite. Il est donc essentiel de mettre au point des méthodes de classification plus efficaces afin de réduire au minimum le risque d'erreurs d'identification.

Tendances

223. L'apprentissage automatique peut se révéler précieux pour améliorer la classification, bien que son application à l'identification des microplastiques reste limitée. Incluant l'apprentissage profond et l'apprentissage par renforcement, il est désormais une composante à part entière dans divers domaines scientifiques et industriels, notamment l'ingénierie biomédicale et les recherches sur l'eau. Il vise à entraîner des modèles mathématiques à établir des prévisions ou à prendre des décisions à partir des données observées, au moyen de méthodes issues des statistiques et de l'informatique. Son application à l'identification des polymères et des microplastiques pourrait donc améliorer l'exactitude des données environnementales obtenues en milieu naturel.

224. L'intelligence artificielle (IA) devient essentielle pour l'identification des microplastiques. Son utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique pour l'étude du caractère complexe de la dégradation des polymères dans l'environnement marin constitue un changement radical. La capacité de produire des spectres de polymères dégradés dans des conditions environnementales particulières permet aux chercheurs de distinguer la typologie des microplastiques avec une précision sans précédent. Elle leur permet non seulement de faire la distinction entre les diverses compositions de plastique, mais aussi de bien mieux connaître l'origine d'un polymère et son comportement dans différents milieux marins.

225. L'IA a pris pied dans le domaine de la protection de l'environnement à un moment crucial de la lutte contre la pollution des mers par le plastique. Sa rapidité d'analyse des spectres, couplée à sa capacité de simulation de processus physiques, chimiques et biologiques pour obtenir des spectres de polymères dégradés, permet de voir les problèmes complexes posés par la pollution par les microplastiques comme à travers une lentille très élaborée et de les surmonter. Alors que nous continuons de naviguer à l'intersection de l'innovation technologique et de la gestion de l'environnement, elle promet d'être un outil formidable dans la lutte en faveur d'un océan sans plastique.



FIG. L.2. L'Agence mène actuellement un projet qui vise à analyser les microplastiques présents dans des échantillons d'eau de mer et de sédiments recueillis en Antarctique, en partenariat avec l'Institut antarctique argentin. (Photo : AIEA)

Annexe

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

Pays	Réacteurs en service		Réacteurs temporairement à l'arrêt		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TWh	Part du nucléaire en %
AFRIQUE DU SUD	2	1 854					8,2	4,4
ARGENTINE	3	1 641			1	25	9,0	6,3
ARMÉNIE	1	416					2,5	31,1
BANGLADESH					2	2 160		
BÉLARUS	2	2 220					11,0	28,6
BELGIQUE	5	3 908					31,3	41,2
BRÉSIL	2	1 884			1	1 340	13,7	2,2
BULGARIE	2	2 006					15,5	40,5
CANADA	19	13 699					83,5	13,7
CHINE	55	53 152			24	24 948	406,5	4,9
CORÉE, RÉP. DE	26	25 825			2	2 680	171,6	31,5
ÉGYPTE					3	3 300		
ÉMIRATS ARABES UNIS	3	4 011			1	1 310	31,2	19,7
ESPAGNE	7	7 123					54,4	20,3
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	93	95 835			1	1 117	742,4	18,5
FINLANDE	5	4 394					32,8	42,0
FRANCE	56	61 370			1	1 630	323,8	64,8
HONGRIE	4	1 916					15,1	48,8
INDE	19	6 290	4	639	8	6 028	44,6	3,1
IRAN, RÉP. ISL.	1	915			1	974	6,1	1,7
JAPON	12	11 046	21	20 633	2	2 653	77,5	5,5
MEXIQUE	2	1 552					12,0	4,9
PAKISTAN	6	3 262					22,4	17,4
PAYS-BAS, ROYAUME DES	1	482					3,8	3,4
RÉP. TCHÈQUE	6	3 934					28,7	40,0
ROUMANIE	2	1 300					10,3	18,9
ROYAUME-UNI	9	5 883			2	3 260	37,3	12,5
RUSSIE	37	27 727			3	2 700	204,0	18,4
SLOVAQUIE	5	2 308			1	440	17,0	61,3
SLOVÉNIE	1	688					5,3	36,8
SUÈDE	6	6 944					46,6	28,6
SUISSE	4	2 973					23,4	32,4
TÜRKIYE					4	4 456		
UKRAINE	15	13 107			2	2 070	n.d.	n.d.
Monde ^b	413	371 539	25	21 272	59	61 091	2 508,7 ^c	s.o.

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

^a Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'Agence (www.iaea.org/pris), d'après les données fournies par les États Membres au 16 juin 2024.

^b Le total inclut les chiffres suivants pour Taïwan (Chine) : 2 tranches, 1 874 MWe en service et 17,2 TW·h d'électricité fournie, soit 6,9 % du bouquet énergétique.

^c La production totale d'électricité n'inclut pas les réacteurs ukrainiens, car les données d'exploitation n'ont pas été communiquées pour l'année 2023.

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

Type d'application ^a	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Formation théorique/pratique	162	51
Analyse par activation neutronique	119	50
Production de radio-isotopes	83	40
Neutronographie	69	34
Irradiation de matériaux/du combustible	67	26
Diffusion neutronique	45	28
Géochronologie	25	22
Transmutation (dopage de silicium)	24	15
Transmutation (gemmes)	21	12
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	16	11
Mesure de données nucléaires	17	11
Autres ^c	116	35

^a La publication de l'Agence intitulée *Applications of Research Reactors* (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5 .3, Vienna, 2014) décrit ces applications de manière plus détaillée.

^b Sur les 234 réacteurs de recherche considérés (225 en service, 9 provisoirement à l'arrêt, en décembre 2023).

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

Abréviations et sigles

^{99m}Tc -PYP	pyrophosphate marqué au technétium 99m
AEN	Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques
ARAO	Agence slovène pour la gestion des déchets radioactifs
ATTR-CM	cardiomyopathie amyloïde à transthyrétine
CIRES	Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage
COP28 2023	Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
COVID-19	maladie à coronavirus 2019
CT	tomodensitométrie
DEMO	centrale de démonstration à fusion
DFMA	déchet de faible ou moyenne activité
DTT	Tokamak de test de divertor
EE	entéropathie environnementale
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FGPA	réseau de portes programmable par l'utilisateur
GJ	gigajoule
GW	gigawatt
GWe	gigawatt électrique
HALEU	uranium faiblement enrichi de haute densité
HTTR	réacteur expérimental à haute température
IA	intelligence artificielle
ICpFE	insuffisance cardiaque avec préservation de la fraction d'éjection
ICrFE	insuffisance cardiaque avec réduction de la fraction d'éjection
IFMIF	Installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion
INIR	Examen intégré de l'infrastructure nucléaire
IRTF	infrarouge à transformée de Fourier
JET	Tore européen commun
LDIR	infrarouge directe par laser
LIDAR	détection et télémétrie par la lumière
LLNL	Laboratoire national Lawrence de Livermore
MeV	mégaélectronvolt
MIT	Institut de technologie du Massachusetts
MMR	microréacteur modulaire

MWe	mégawatt (électrique)
NHSI	Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires
NIF	Installation nationale d'ignition
NRC	Commission de la réglementation nucléaire
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PET	tomographie à émission de positons
PRC	projet de recherche coordonnée
PRIS	Système d'information sur les réacteurs de puissance
R-D	recherche-développement
REO	réacteur à eau ordinaire
REP	réacteur à eau sous pression
RESC	réacteur refroidi par eau supercritique
RFMP-PRM	réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires
RHTRG	réacteur à haute température refroidi par gaz
RNR-Na	réacteur rapide refroidi au sodium
RNR-Pb	réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb
RSF	réacteur rapide à sels fondus
RSF	réacteur à sels fondus
SMART	réacteur avancé modulaire intégré
SPECT-CT	tomographie d'émission monophotonique - tomodensitométrie
STEP	Tokamak sphérique pour la production d'énergie
t ML	tonnes de métaux lourds
test ¹³ C-SBT	test respiratoire au saccharose marqué au ¹³ C
TW · h	térawatt-heure
UFE	uranium faiblement enrichi
UHE	uranium hautement enrichi
UKAEA	Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni



IAEA

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

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