

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire ■ 2023

Rapport du Directeur général



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

L'atome pour la paix et le développement

GC(67)/INF/4

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2023

Rapport du Directeur général

GC(67)/INF/4

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Septembre 2023
IAEA/NTR/2023

Table des matières

Résumé.....	5
Avant-propos du Directeur général.....	6
Résumé analytique	7
A. Électronucléaire.....	11
A.1. Projections relatives à l'électronucléaire.....	11
A.2. Centrales nucléaires en exploitation.....	14
A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion	15
A.4. Développement de la technologie électronucléaire	18
A.4.1. Réacteurs avancés refroidis par eau.....	19
A.4.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires et microréacteurs	20
A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides	22
A.4.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire	23
B. Cycle du combustible nucléaire	25
B.1. Partie initiale.....	25
B.2. Partie terminale.....	28
C. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs.....	30
C.1. Déclassement	30
C.2. Remédiation environnementale et gestion des matières radioactives naturelles	34
C.3. Gestion des déchets radioactifs.....	36
D. Recherche sur la fusion nucléaire et développement de technologies pour la production d'énergie future	39
E. Réacteurs de recherche, accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire	44
E.1. Réacteurs de recherche	44
E.2. Accélérateurs de particules	47
E.3. Instrumentation nucléaire.....	49
F. Alimentation et agriculture.....	51
F.1. Intervention rapide en cas de crise de sécurité sanitaire des aliments.....	51
F.2. Progrès dans l'irradiation des aliments : utilisation accrue des irradiateurs à sources et nouvelle technologie faisant appel aux rayonnements de faible intensité.....	55
G. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements	61
G.1. Évolution des radiopharmaceutiques théranostiques.....	61
H. Santé humaine	64
H.1. L'intelligence artificielle au service du contourage et de la planification en radiothérapie	64

I. Environnement marin	68
I.1. Nouveaux contaminants préoccupants	68
I.2. Nouveaux radiotraceurs de la circulation océanique au service d'une meilleure compréhension et modélisation du transport des polluants et des changements océaniques et climatiques	71
Annexe	75

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 2022*.
- Le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2023 traite des domaines suivants : énergie d'origine nucléaire, cycle du combustible nucléaire, déclassement, remédiation de l'environnement et gestion des déchets radioactifs, recherche sur la fusion nucléaire et développement de technologies pour la production d'énergie future, réacteurs de recherche, accélérateurs de particules et instrumentation nucléaire, alimentation et agriculture, radio-isotopes et technologies des rayonnements, santé humaine et environnement marin.
- Le projet de rapport a été soumis à la réunion du Conseil des gouverneurs de mars 2023 (document GOV/2023/3). 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 faible émission 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 2022, la crise climatique mondiale et les perturbations des marchés de l'énergie ont, en se conjuguant, suscité un regain d'intérêt des États Membres pour l'électronucléaire et pour la contribution qu'il peut apporter aux objectifs de zéro émission nette et de sécurité de l'approvisionnement énergétique. Dans le même temps, de plus en plus de pays recourent à des technologies nucléaires pour des applications non énergétiques, afin notamment de préserver les ressources en eau, de mettre au point de nouvelles techniques d'agriculture intelligente et de sauver des vies grâce à une meilleure prise en charge du cancer.

Lors de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques 2022 (COP27) qui s'est tenue à Charm el-Cheikh (Égypte), l'AIEA s'est vu confier le tout premier pavillon consacré aux avantages qu'offrent les technologies nucléaires pour atténuer le changement climatique, en surveiller les effets et s'y adapter. En outre, l'initiative Atoms4NetZero a été lancée durant ce même événement pour améliorer la compréhension du potentiel de l'électronucléaire en matière de décarbonation à des fins autres que la production d'électricité. Soucieuse de tirer parti de ces efforts, l'Agence entend poursuivre, lors de la COP28 qui aura lieu à Dubaï (Émirats arabes unis), le dialogue noué avec ses États Membres et l'ensemble de la communauté internationale quant à la place importante qu'occupent l'énergie d'origine nucléaire et ses applications pacifiques dans la lutte contre la crise climatique.

Depuis plusieurs décennies, la science et la technologie nucléaires se sont montrées à la hauteur des circonstances et ont su aider les États à faire face à leurs besoins de développement. Tout leur potentiel n'a certainement pas encore été exploité et elles peuvent encore être mises à contribution dans de nouveaux domaines. En mettant en avant les principaux faits nouveaux relatifs à la technologie nucléaire survenus en 2022, le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2023* permettra aux États Membres de prendre des décisions éclairées concernant la voie à suivre pour relever les défis présents et à venir.



FIG. FW-1. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA, lors de son allocution à la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques 2022 (COP27), tenue à Charm el-Cheikh (Égypte).

Résumé analytique

1. Pour la deuxième année consécutive, l'Agence a revu à la hausse ses projections annuelles relatives à la croissance potentielle de l'énergie d'origine nucléaire au cours des décennies à venir, afin de tenir compte de l'évolution du débat mondial sur l'énergie et l'environnement dans un contexte de préoccupations croissantes concernant la sécurité énergétique et le changement climatique. L'intégration croissante des sources d'énergies renouvelables intermittentes dans les réseaux électriques peut être une source d'instabilité que les centrales nucléaires sont à même de compenser en assurant un approvisionnement en électricité stable et propre. L'Agence a relevé ses projections hautes pour 2050 ; elles ont été portées à 873 gigawatts (GW), en hausse de 10 % par rapport à celles établies l'an dernier. En fonction du niveau mondial d'électrification, la part de l'électronucléaire pourrait atteindre 14 % du bouquet électrique en 2050, ce qui représenterait une augmentation notable comparativement aux 9,8 % actuels.
2. Fin 2022, la capacité totale des 438 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans 32 pays s'établissait à 393,8 gigawatts électriques (GWe). En 2022, la capacité du réseau a augmenté de plus de 7,4 GWe dans cinq pays. D'après les rapports fournis à l'Agence par les pays concernés, le parc nucléaire a produit environ 2 486,8 térawatts-heures d'électricité acheminable à faibles émissions.
3. En raison de la crise énergétique survenue en 2022, certaines décisions de mise à l'arrêt de réacteurs ont été suspendues, poussant les exploitants et les organismes de réglementation à prendre des mesures afin de garantir une exploitation à long terme fiable et sûre. La persistance et l'intensification de la demande pour une production d'électricité sûre, propre, fiable et économique incitent fortement les exploitants à prolonger de plusieurs décennies la durée de vie utile des centrales nucléaires en procédant à leur modernisation et en améliorant d'importants équipements et systèmes de façon à permettre leur exploitation à long terme.
4. Parmi les 50 États Membres qui ont déclaré souhaiter recourir à l'électronucléaire, 24 en sont au stade pré-décisionnel et mènent des activités de planification, les 26 autres s'employant à en assurer l'implantation. Le nombre de pays qui exploitent des centrales nucléaires pourrait augmenter de quelque 30 % d'ici 2035 ; 10 à 12 États viendraient ainsi s'ajouter à la liste des 32 pays actuels. Pour répondre à cet intérêt croissant à l'égard de l'électronucléaire, il est nécessaire de mettre en place une infrastructure nucléaire adéquate.
5. Les réacteurs refroidis par eau continuent de jouer un rôle important dans le secteur nucléaire commercial et représentent aujourd'hui plus de 95 % des réacteurs de puissance civils en exploitation dans le monde. Le développement de la technologie électronucléaire que l'on observe au niveau mondial porte principalement sur l'accélération du déploiement de réacteurs avancés, en particulier de réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP), ainsi que sur un plus large recours à l'électronucléaire pour des applications non électriques, comme les systèmes de chauffage urbain, la production d'hydrogène ou le dessalement.
6. La cogénération d'électricité et de chaleur pour des applications non électriques de l'énergie d'origine nucléaire est une technologie fiable et éprouvée, qui suscite un intérêt croissant dans le monde entier, ouvre de vastes débouchés commerciaux et offre un important potentiel de développement. Plusieurs pays étudient la possibilité de produire de l'hydrogène ou de dessaler l'eau de mer à partir de l'électricité ou de la chaleur produites par des réacteurs nucléaires.
7. La mise à disposition et l'implantation attendues de plusieurs modèles inédits de RFMP d'ici 2030 constituent une évolution technologique qui attire l'attention des planificateurs et des

décideurs chargés de la politique énergétique. C'est là ce qui a incité plusieurs pays primo-accédants à intégrer ces réacteurs dans leur réflexion sur les questions d'ordre technologique ou à continuer de suivre l'évolution de la situation en la matière. Plus de 80 modèles de RFMP issus des principales filières technologiques sont à différents stades de mise au point et de déploiement dans 18 États Membres. Des efforts substantiels continuent d'être faits au niveau industriel et sur le plan réglementaire afin de faciliter l'élaboration de nouveaux modèles et le déploiement rapide de réacteurs de ce type, grâce notamment à la Plateforme de l'AIEA sur les PRM et à l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires.

8. Grâce à la puissance des capacités informatiques et des outils d'analyse de données désormais disponibles, le secteur nucléaire se tourne vers des techniques faisant appel à l'intelligence artificielle (IA), à l'apprentissage automatique et à l'apprentissage en profondeur, qu'il met à profit pour rénover les systèmes d'exploitation et les systèmes de maintenance à court et à long terme, ainsi que des procédés de fabrication de pointe. La technologie de la chaîne de blocs peut être utilisée pour diverses applications tout au long de la chaîne d'approvisionnement de l'électronucléaire.

9. Les États Membres accélèrent le développement de la technologie de la fusion nucléaire non seulement dans le domaine de la science expérimentale, mais aussi dans le secteur privé – d'où une multiplication des investissements et des avancées récentes, et l'essor de grands projets nationaux et internationaux y afférents. La modélisation de la dynamique des plasmas à l'aide de l'IA ainsi que le contrôle en temps réel des expériences de fusion ont considérablement gagné en efficacité, accélérant ainsi les progrès vers l'avènement de l'énergie de fusion.

10. Les travaux nécessaires à la production du premier plasma dans le cadre du projet ITER (Réacteur expérimental thermonucléaire international) ont bien avancé. En juin 2022, ils étaient achevés à 77 %, marquant ainsi une étape importante. Toutefois, le plan de travail initial devrait accuser des retards en raison des effets de la pandémie de COVID-19 et d'obstacles techniques, tels que la nécessité de réparer certains éléments essentiels.

11. La hausse soutenue du prix au comptant de l'uranium a relancé sa production industrielle ; plusieurs producteurs d'uranium cherchent à redémarrer leurs activités après une période de fermeture de leurs sites pour entretien et maintenance en raison de la faiblesse des prix. Grâce aux signaux positifs observés sur le marché de l'uranium ces deux dernières années, les activités d'exploration sont en augmentation.

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 avoisinant les 320 000 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 les pays qui suivent une stratégie de cycle fermé pour le combustible nucléaire, le combustible usé peut être retraité et recyclé à des fins de production.

13. Les technologies numériques jouent un rôle de plus en plus important pour faire avancer les projets de déclasserment nucléaire du fait de leur capacité à améliorer la planification et la mise en œuvre, et notamment permettent de mieux visualiser les scénarios établis dans ce domaine tant par les exploitants que par les parties prenantes externes. À l'heure actuelle, la réalité augmentée et la réalité virtuelle font l'objet d'intenses recherches pour voir si elles pourraient faciliter les activités de déclasserment et la formation des exploitants.

14. En matière de remédiation environnementale, la nouvelle tendance qui se dessine consiste à intégrer la notion de réduction des effets dommageables dans le calcul de la valeur globale d'un site contaminé. La remédiation constitue également une étape cruciale des opérations d'extraction minière

dans le cadre d'une économie circulaire, en ce qu'elle permet de rendre les sites aptes à accueillir de nouvelles activités de production à l'avenir.

15. Des progrès substantiels ont une nouvelle fois été réalisés en 2022 dans la gestion des déchets radioactifs, en particulier pour ce qui concerne l'avancement des programmes de dépôt géologique profond et la poursuite du déploiement sûr de technologies de gestion des déchets avant leur stockage définitif.

16. De plus en plus de sources de haute activité retirées du service ont été réexpédiées aux fournisseurs en vue de leur recyclage et de leur stockage définitif. Une bonne douzaine d'États Membres devrait procéder à l'enlèvement de plus de 30 sources de haute activité en 2023. Bien que la gestion des sources radioactives scellées retirées du service se soit améliorée dans de nombreux pays, leur stockage définitif demeure problématique, en particulier dans les États dotés de programmes nucléaires modestes.

17. L'intérêt pour les réacteurs de recherche a continué de croître dans le monde. Outre les 233 en service, 11 étaient en construction. La part de ceux qui sont en service depuis au moins 40 ans avoisine 70 %. Certains organismes exploitant des réacteurs de recherche très sollicités envisagent de prolonger leur durée de vie utile jusqu'à 80, voire 100 ans.

18. Les applications à grande échelle qui font appel à l'IA sont en train de révolutionner le domaine de la physique des hautes énergies. Des opérations de mise à niveau des accélérateurs de hadrons sont en cours, qui permettent d'atteindre des luminosités plus élevées et, ce faisant, d'augmenter également le nombre de particules produites lors de chaque collision. Cela suppose que les détecteurs de traces puissent enregistrer les traces des particules à des taux de comptage plus élevés, avec potentiellement un bruit de fond lui aussi plus important, afin de pouvoir explorer des axes de découverte rares.

19. La tendance consistant à faire appel à des drones pour la détection et la surveillance radiologiques est actuellement favorisée par de nouveaux paramètres qui augmentent la charge utile de ces appareils, les rendent plus sûrs, en allongent la durée de vol, en accroissent la résistance et améliorent la précision de leur guidage. De nouveaux drones utilisés dans les domaines de la détection des rayonnements et de la spectrométrie gamma sont maintenant disponibles sur le marché et offrent une solution globale pour la cartographie radiologique et d'autres applications.

20. Les crises et les situations d'urgence survenues récemment, telles que la pandémie de COVID-19, les conflits et les catastrophes naturelles liées au climat ont mis en évidence la vulnérabilité de l'approvisionnement alimentaire mondial face aux perturbations, ainsi que la nécessité de renforcer la résilience à la faveur d'une restructuration des systèmes de contrôle des denrées alimentaires et d'une amélioration de l'appui technique. L'application de techniques nucléaires nouvelles et émergentes aux fins de l'analyse des denrées alimentaires sur le terrain peut permettre de réagir efficacement en cas de situation ayant une incidence sur l'approvisionnement et la sécurité alimentaires.

21. Actuellement, le traitement par irradiation, qui contribue à améliorer la sécurité sanitaire des aliments, à en préserver la qualité et à en prolonger la durée de conservation, est pratiqué sur au moins un type de produit alimentaire dans quelque 70 pays. Grâce à leurs avantages tant économiques que pratiques, les irradiateurs à sources, par exemple à faisceaux de faible énergie (électrons ou rayons X de faible énergie), sont de plus en plus utilisés. Ces technologies de substitution viennent s'ajouter aux capacités qu'offrent les installations d'irradiation gamma et permettent ainsi un recours plus large à l'irradiation des denrées alimentaires.

22. En théranostique, un radionucléide servant au diagnostic du cancer est associé à un radionucléide utilisé pour la cancérothérapie. Les avancées récentes en matière d'imagerie moléculaire et d'applications thérapeutiques ont mis en avant la nécessité de mettre à la disposition des cliniciens de

nouveaux radio-isotopes supplémentaires. Grâce aux évolutions technologiques dans le domaine de la production de radionucléides, la liste des radionucléides offrant un bon potentiel d'intégration dans les applications radiopharmaceutiques s'étoffe, ce qui contribuera à améliorer les résultats des soins pour les patients.

23. Seul isotope radioactif présent dans les molécules d'eau, le tritium constitue un marqueur précieux des processus du cycle de l'eau en ce qu'il permet d'estimer la réalimentation des eaux souterraines et d'évaluer la vulnérabilité des eaux à la pollution. En raison des faibles concentrations de tritium constatées actuellement dans les eaux naturelles, un enrichissement en tritium important est nécessaire pour obtenir des résultats précis et exacts avec les méthodes de mesure classiques, ce qui exige du temps. Un nouveau système d'enrichissement en tritium élaboré par l'Agence devrait radicalement améliorer la capacité des États Membres à déterminer les concentrations de tritium, même extrêmement faibles, dans des échantillons d'eau, et ce à des fins de surveillance hydrologique.

24. Près de la moitié des patients atteints de cancer ont besoin d'une radiothérapie à un moment ou à un autre. L'IA pourrait offrir une solution face à la pénurie mondiale de personnel de santé. Elle peut améliorer la qualité et la normalisation des procédures et faire gagner du temps, en particulier lors du contourage, une étape cruciale en radiothérapie qui consiste à tracer les contours des organes, des tissus sains et de la tumeur. L'intelligence hybride, qui combine les atouts de l'intelligence naturelle et de l'intelligence artificielle, pourrait être mise à profit pour les opérations de contourage complexes qui requièrent des ajustements manuels ou une vérification.

25. Les signes annonciateurs d'une « pandémie silencieuse » due aux nouveaux contaminants préoccupants sont clairement visibles. Ces contaminants sont des substances chimiques détectées dans l'environnement qui échappent aux programmes de surveillance réglementaires. Les techniques d'échantillonnage passif permettent de détecter des milliers de substances chimiques présentes dans l'environnement marin et facilitent le repérage de composés chimiques non encore répertoriés. Les avancées en matière d'échantillonnage de l'eau et les techniques d'analyse perfectionnées dans le domaine de la détection peuvent aider à résoudre certains des problèmes que posent les mélanges complexes de nouveaux contaminants préoccupants présents dans l'environnement marin.

26. Les radiotraceurs sont utilisés pour suivre le parcours des eaux de mer et comprendre les écosystèmes marins et côtiers. Ils permettent de surveiller la présence de contaminants radioactifs et non radioactifs, tels que les microplastiques et le méthylmercure, et facilitent l'identification et la quantification des biotoxines contenues dans les produits de la mer, l'évaluation des effets de l'acidification des océans sur les organismes calcifiants, ainsi que l'analyse des processus métaboliques sous l'effet de l'augmentation des températures. Les avancées récentes dans le domaine de la spectrométrie de masse ont ouvert la voie à la détection et à l'analyse de radionucléides à longue période présents en concentrations extrêmement faibles.

A. Électronucléaire

A.1. Projections relatives à l'électronucléaire

Situation

1. Pour la deuxième année consécutive, l'Agence a revu ses projections annuelles de la croissance potentielle de l'électronucléaire au cours des décennies à venir afin de tenir compte de l'évolution du débat mondial sur l'énergie et l'environnement, dans un contexte de préoccupations croissantes concernant la sécurité énergétique et le changement climatique.

2. Dans ses nouvelles prévisions sur la capacité nucléaire mondiale aux fins de la production d'électricité, l'Agence a rehaussé sa projection haute pour 2050 de 10 % par rapport à celle de l'an dernier, la portant à 873 gigawatts (GW). 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 pour une capacité d'environ 600 GW. Il faudrait à cette fin que le secteur respecte les délais de livraison et les budgets arrêtés, que l'accès au financement soit facilité

et que des progrès soient faits dans l'harmonisation des prescriptions réglementaires et la normalisation des méthodes industrielles, en particulier pour les nouvelles technologies comme les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP) et d'autres réacteurs avancés, qui sont appelés à jouer un rôle essentiel dans la décarbonation du secteur de l'énergie en fournissant à des secteurs qui ne peuvent être électrifiés une énergie de chauffage sobre en carbone ou de l'hydrogène.

3. En fonction du niveau mondial d'électrification, la part de l'électronucléaire pourrait atteindre 14 % du bouquet électrique, contre 9,8 % actuellement. Dans l'hypothèse basse, la capacité nucléaire installée resterait stable d'ici à 2050, à environ 400 GW, mais la part du nucléaire dans la production d'électricité pourrait tomber à 6,9 %, car d'autres sources gagneraient en importance.

873 GW
en **2050**

4. À la 27^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP27), tenue à Charm El-Cheikh (Égypte) en novembre 2022, des discussions de haut niveau ont porté sur la contribution de l'électronucléaire à un approvisionnement énergétique abordable, résilient et sûr, ainsi que sur sa contribution aux systèmes énergétiques décarbonés, élément crucial du déploiement des énergies renouvelables (figure A.1). Le financement de la transition vers une énergie propre et en particulier des projets nucléaires, demeure difficile, même si des progrès ont été accomplis en 2022, notamment l'inclusion de l'énergie nucléaire dans la taxonomie de l'Union européenne (UE) en matière de finance durable, ainsi que dans d'autres taxonomies dans le monde.

Selon le niveau d'électrification à l'échelle mondiale, la part de l'électronucléaire pourrait représenter



jusqu'à **14 %** du bouquet électrique, contre **9,8 %** aujourd'hui.

Dans l'hypothèse basse, la capacité nucléaire installée resterait stable d'ici à **2050**, à **environ 400 GW**, mais la part de l'électricité d'origine nucléaire pourrait tomber à **6,9 %**.



FIG. A.1. Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'Agence, avec Gerd Müller, Directeur général de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel, et Olga Algayerova, Secrétaire exécutive de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, lors de la manifestation organisée en marge de la COP27 sur le thème « Interactions des technologies bas carbone pour des systèmes résilients à émissions nettes nulles ». (Photo : AIEA)

Tendances

5. Les technologies de réacteurs avancées et innovantes, notamment les RFMP et leurs applications, suscitent un intérêt considérable et grandissant. Avec les grands réacteurs avancés refroidis par eau, les RFMP devraient fournir la plus grande partie de la capacité de production d'énergie bas carbone ajoutée dans les trente années à venir aux fins de la lutte contre le changement climatique et garantir un approvisionnement énergétique sûr à un prix abordable. Le secteur nucléaire devra continuer de faire face à plusieurs obstacles, notamment la réduction des coûts, le renforcement des capacités et l'amélioration de l'harmonisation et de la normalisation dans les domaines réglementaire et industriel, pour améliorer sa compétitivité et accélérer le déploiement de nouvelles capacités électronucléaires. Pour soutenir les États Membres dans ces efforts, le Directeur général de l'AIEA 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) une occasion unique de travailler en synergie à l'objectif commun de la construction de réacteurs avancés sûrs et sécurisés partout dans le monde en mettant l'accent sur la technologie des RFMP (figure A.2).



FIG. A.2. Le Directeur général de l'Agence, Rafael Mariano Grossi, à l'ouverture de la réunion de lancement de l'Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires (NHSI) qui s'est tenue au siège de l'Agence à Vienne (Autriche), en juin 2022.

6. À l'heure actuelle, de nombreux pays qui avaient décidé de sortir progressivement du nucléaire revoient leur position et optent pour une exploitation à long terme imprévue.

A.2. Centrales nucléaires en exploitation

Situation

7. Fin 2022, la capacité totale des 438 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans 32 pays s'établissait à 393,8 GWe. La part de la capacité opérationnelle totale suspendue cette année-là s'élevait à plus de 22,8 GWe (27 réacteurs).

8. En 2022, le réseau a gagné plus de 7,4 GWe de capacité, dont 5,6 GWe de capacité opérationnelle en Asie et 1,6 GWe en Europe. En Chine, deux réacteurs ont commencé à fournir de l'électricité au réseau cette année : Fuqing-6 [1 075 mégawatts électriques (MWe)], second réacteur de démonstration Hualong 1



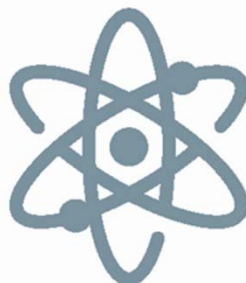
Fin 2022, la capacité globale des
438 réacteurs
 nucléaires en exploitation
 dans **32** pays
 était de **393,8** GWe

(HPR1000) du site, a été connecté au réseau en janvier et Hongyanhe-6, réacteur à eau sous pression (REP) ACPR-1000 de troisième génération et d'une capacité totale de 1 061 MWe, dans la province de Liaoning, a été couplé au réseau en mai. En République de Corée, un réacteur à eau sous pression (REP) de 1 340 MWe (APR-1400) de la centrale nucléaire Hanul a été connecté au réseau en juin.

9. Un réacteur HPR1000 fourni par la Chine a été couplé au réseau en mars à la centrale nucléaire de Karachi, dans la province du Sindh, dans le sud du Pakistan. La tranche 3 de la centrale nucléaire de Barakah aux Émirats arabes unis est entrée en service en octobre, apportant une capacité nucléaire supplémentaire de 1 345 MWe. En Finlande, le réacteur européen à eau sous pression (EPR) Olkiluoto-3 (1 600 MWe) a été connecté au réseau en mars.

10. Fin 2022, 58 réacteurs d'une capacité totale de 59,3 GWe étaient en construction dans 18 pays. La capacité électronucléaire installée en construction n'a pas connu d'évolution majeure au cours des dernières années, sauf en Asie, où la croissance se poursuit sans interruption : depuis 2012, 55 réacteurs d'une capacité opérationnelle de 56,1 GWe y ont été connectés au réseau.

11. Environ 66 % de la capacité nucléaire opérationnelle mondiale (258,7 GWe, 291 réacteurs) proviennent de réacteurs en exploitation depuis plus de 30 ans, plus de 26 % (101,5 GWe, 128 réacteurs) de réacteurs en exploitation depuis plus de 40 ans et 3 % (11 GWe, 13 réacteurs) de réacteurs en exploitation depuis plus de 50 ans. Le vieillissement du parc souligne la nécessité de construire de nouveaux réacteurs ou d'augmenter la capacité des



Fin 2022,
58 réacteurs
 d'une capacité totale de
59,3 GWe
 étaient en construction
 dans **18** pays

réacteurs existants pour compenser les mises hors service prévues et contribuer aux objectifs de durabilité, de sécurité énergétique mondiale et de lutte contre le changement climatique. 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.



12. 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.

Tendances

13. La capacité électronucléaire a connu une hausse régulière ces dix dernières années, augmentant de 20,3 GWe entre 2012 et 2022. En tout, 68 réacteurs d'une capacité de 67,8 GWe ont été couplés au réseau au cours de cette période. Plus de 83 % de cette augmentation provient d'Asie, où 55 réacteurs d'une capacité totale de 56,2 GWe ont été couplés au réseau. D'après les rapports fournis à l'Agence, en 2022, le parc nucléaire a produit environ 2 486,8 térawatts-heures (TW·h) d'électricité acheminable à faibles émissions.

14. La crise énergétique de 2022 a reporté la mise à l'arrêt de réacteurs en Belgique, aux États-Unis d'Amérique et en Suède, poussant les exploitants et les organismes de réglementation à prendre des mesures pour garantir une exploitation à long terme sûre et fiable.

A.3. Programmes électronucléaires nouveaux ou en expansion

Situation

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

- seize en sont à la phase décisionnelle, c'est-à-dire qu'ils envisagent de recourir à l'électronucléaire, certains ayant entrepris une étude de pré-faisabilité ou préparant activement l'infrastructure sans

- avoir pris de décision (Algérie, El Salvador, Estonie, Éthiopie, Indonésie, Kazakhstan, Maroc, Niger, Ouganda, Philippines, Sénégal, Soudan, Sri Lanka, Thaïlande, Tunisie, Zambie) ;
- dix en sont à la phase 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 (Arabie saoudite, Bangladesh, Égypte, Ghana, Jordanie, Kenya, Nigéria, Ouzbékistan, Pologne et Türkiye).



16. Le Bangladesh poursuit la construction de sa première centrale nucléaire. La livraison du combustible est prévue pour 2023 et l'exploitation commerciale des deux tranches devrait débuter dans les années à venir. La construction des quatre tranches de la centrale nucléaire d'Akkuyu (Türkiye) s'est poursuivie en 2022. Leur mise en service est prévue entre 2023 et 2026. La première coulée de béton de la tranche 1 de la centrale nucléaire égyptienne d'El Dabaa a eu lieu en juillet et celle de la tranche 2 en novembre 2022. L'Autorité des centrales nucléaires a également demandé en 2021 un permis de construire pour les troisième et quatrième tranches. La préparation du site aux travaux de construction se poursuit. Les deux principaux organismes en charge du projet (l'Autorité des centrales nucléaires et l'Autorité égyptienne de réglementation nucléaire et radiologique) continuent de développer leurs

capacités organisationnelles en fonction des besoins du programme. En Pologne, le choix des technologies et fournisseurs pour la construction des REP a été arrêté. Ces réacteurs devraient avoir une capacité nucléaire installée totale de 6 000 à 9 000 MWe et devraient être livrés d'ici à 2042.

17. En Arabie saoudite, le cahier des charges de l'appel d'offres pour acquisition des deux premières tranches de 1 000 à 1 600 MWe de la centrale nucléaire a été publié. La Jordanie a entamé une étude de faisabilité pour déterminer quelle technologie conviendrait le mieux, trouver un fournisseur et prendre une décision d'investissement afin d'utiliser des RFMP pour produire de l'électricité et dessaler de l'eau de mer. Le cahier des charges de ce projet est prévu pour 2026. Le Ghana a continué de développer son infrastructure nationale en vue d'un programme électronucléaire, notamment les capacités des principaux organismes concernés. Il a élargi son choix de technologie de réacteur aux RFMP, et cinq fournisseurs ont répondu à son appel à manifestation d'intérêt pour l'établissement d'une capacité d'environ 1 000 MWe. La première centrale nucléaire devrait être mise en chantier en 2023 et en service en 2029. Le Kenya a annoncé qu'il envisageait de construire un réacteur de recherche et des RFMP plutôt que 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 entrer en service entre 2026 et 2030. Les Philippines ont signé en 2022 leur position nationale sur un programme électronucléaire, fondée sur une étude menée par le Gouvernement. Elles peuvent maintenant réaliser d'autres études et évaluer les différentes possibilités : grands réacteurs, notamment une éventuelle réhabilitation de la centrale nucléaire de Bataan, ou RFMP. L'Estonie envisage les RFMP pour son programme électronucléaire, et l'organisme chargé de son exécution a présenté au Gouvernement un rapport d'étape sur les conditions et la viabilité d'un programme fondé sur les RFMP. L'introduction de l'électronucléaire dans le bouquet énergétique de nombre de ces pays contribue grandement à leurs objectifs d'atténuation du changement climatique. Plusieurs d'entre eux (l'Égypte, la Jordanie et la Türkiye) ont inclus l'électronucléaire dans leurs contributions déterminées au niveau national soumises à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques dans le cadre de l'Accord de Paris.

18. En 2022, Sri Lanka a accueilli une mission d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) de l'Agence (phase 1). L'Agence a également reçu une demande de mission INIR (phase 1) de l'Estonie, une demande de mission de suivi INIR (phase 1) du Kazakhstan et une demande de mission INIR (phase 3) de la Türkiye. En décembre 2021, elle a reçu du Bangladesh une demande de mission INIR (phase 3), qui aura lieu début 2024. En outre, 15 États Membres ont un plan de travail intégré en cours, et les activités ont repris depuis l'assouplissement des restrictions liées à la COVID-19.

Tendances

19. Le nombre de pays exploitants pourrait augmenter de quelque 30 % d'ici 2035 : 10 à 12 nouveaux pays s'ajouteraient aux 32 pays actuels. Cette augmentation est considérable et ces pays devront donc redoubler d'efforts pour préparer leurs infrastructures avec l'aide de l'Agence afin d'assurer un déploiement responsable.

20. 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 qui devraient être disponibles et déployés d'ici à 2030. Plusieurs pays primo-accédants ont donc intégré ces réacteurs dans leur réflexion sur les questions d'ordre technologique ou continuent de suivre la situation,



notamment l'Arabie saoudite, l'Estonie, le Ghana, l'Indonésie, la Jordanie, le Kenya, l'Ouganda, les Philippines, la Pologne, le Soudan et la Zambie, de même que des pays qui développent leur programme électronucléaire, tels que l'Afrique du Sud, la Bulgarie, la République tchèque et la Roumanie. Ils sont motivés par les progrès de la technologie des RFMP 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.

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

22. Que le programme se fonde sur de grandes centrales ou des RFMP, les questions d'infrastructure électronucléaire nationale, notamment les exigences en matière de sûreté nucléaire, de sécurité nucléaire et de garanties, doivent être traitées comme il se doit.

A.4. Développement de la technologie électronucléaire

Situation

23. Le développement de la technologie électronucléaire que l'on observe au niveau mondial consiste principalement en une accélération du déploiement de réacteurs avancés, notamment de réacteurs innovants comme les RFMP, ainsi qu'en un plus large recours à l'électronucléaire pour des applications non électriques, telles que les systèmes de chauffage urbain, la production d'hydrogène ou le dessalement. Des acteurs non traditionnels manifestent clairement, eux aussi, leur intérêt pour l'électronucléaire, qu'ils souhaitent utiliser pour décarboner le secteur industriel, en particulier les activités industrielles énergivores. Dans certaines régions du monde, des parties prenantes s'intéressent aux applications de l'électronucléaire, comme la cogénération par des centrales nucléaires flottantes, les applications de niche de microréacteurs (dans les régions reculées et les petites îles, en remplacement de groupes électrogènes diesel, etc.) ou encore les applications spatiales. En raison de l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables intermittentes, qui font peser des contraintes sur les réseaux électriques, les réacteurs avancés commencent à s'imposer comme une source d'énergie propre à même d'offrir à ces derniers plus de souplesse. Enfin, grâce à la puissance des capacités informatiques et des outils d'analyse de données désormais disponibles, le secteur nucléaire se tourne vers des techniques faisant appel à l'intelligence artificielle (IA), en particulier l'apprentissage automatique et l'apprentissage en profondeur, qu'il met à profit pour rénover les systèmes d'exploitation et les systèmes de maintenance à court et à long terme.

Tendances

24. Outre l'action menée par les États Membres pour développer les technologies de réacteurs avancées, de plus en plus d'entreprises privées et de start-up élaborent de nouveaux modèles de réacteurs, qui attirent des financements publics et privés. Elles s'appuient sur des modèles économiques de rupture et des méthodologies innovantes, tels que les jumeaux numériques, des procédés de fabrication de pointe et des techniques faisant appel à l'IA et à l'apprentissage automatique, pour mener un large éventail d'activités susceptibles de révolutionner la conception des systèmes nucléaires, leur autorisation et leur fonctionnement. L'IA peut améliorer l'intégration de calculs et de données expérimentales provenant d'expériences réalisées à petite échelle ou obtenus au moyen de capteurs pendant l'exploitation. Une fois optimisée, cette intégration permet aux informaticiens de mettre au point des modèles physiques d'une précision inégalée et aux scientifiques chargés des expérimentations de réduire au maximum le coût et le nombre des expériences qu'ils sont amenés à réaliser pour valider

des systèmes totalement nouveaux. Elle donne également aux opérateurs la possibilité de surveiller l'état d'un système qui ne peut être directement équipé d'instruments de contrôle. Des méthodes et outils reposant sur l'IA peuvent être utilisés pour établir des analyses prédictives fondées sur des paramètres physiques qui serviront à optimiser les phases de conception, de fabrication et de construction, à obtenir des gains d'efficacité d'exploitation, à améliorer les processus itératifs de conception de nouveaux réacteurs, à détecter des failles propres à un modèle déterminé, et à élaborer des systèmes de contrôle sophistiqués. L'IA peut aussi offrir d'autres avantages au secteur nucléaire en matière de fiabilité, de sûreté et d'efficacité globale.

A.4.1. Réacteurs avancés refroidis par eau

Situation

25. Les réacteurs refroidis par eau continuent de jouer un rôle important dans l'industrie nucléaire commerciale ; ils ont à leur actif plus de 19 000 années-réacteur d'expérience d'exploitation et représentent désormais plus de 95 % de tous les réacteurs de puissance civils en service dans le monde. À la fin de 2022, 54 des 57 réacteurs nucléaires en construction étaient des réacteurs refroidis par eau ordinaire ou eau lourde. Parmi les principales évolutions observées dans ce secteur en 2022, on retiendra le couplage au réseau de tel réacteurs situés en Chine, aux Émirats arabes unis, en Finlande, au Pakistan et en République de Corée.

Réacteurs refroidis par eau



d'un cœur à spectre rapide, sont en cours. Les modèles récemment élaborés sont essentiellement de petites versions modulaires de RESC, qui mettent l'accent sur l'amélioration de la sûreté, de la sécurité, de la rentabilité et de la durabilité.

27. Les États Membres privilégient avant tout la mise au point de systèmes énergétiques intégrés qui combinent des énergies renouvelables (en particulier les énergies solaire et éolienne, sources d'énergie variables) et des centrales nucléaires pour fournir une charge de base et améliorer la stabilité du réseau, ainsi que pour les applications non électriques.

Tendances

28. La capacité de production des réacteurs avancés refroidis par eau en construction varie entre 1 000 et 1 700 MWe par tranche et pourrait être plus importante encore pour les grands modèles évolutifs de ces réacteurs que l'on ambitionne de concevoir. La tendance en faveur des sites à plusieurs tranches, avec un seul ou plusieurs types de réacteurs se maintient dans les États Membres. Actuellement, une

26. Des modèles avancés de réacteurs refroidis par eau sont aussi de plus en plus envisagés, étudiés et mis en application dans plusieurs pays aux fins de la mise en place progressive de cycles du combustible avancés et plus efficaces, partiellement ou totalement fermés. Plusieurs États Membres poursuivent leurs activités de recherche-développement (R-D) sur les réacteurs refroidis par eau supercritique (RESC). Les études de conception du modèle de RESC canadien, réacteur à tubes de force modéré à eau lourde, et du CSR1000 chinois ont été menées à bien. En Europe, le concept de réacteur à eau ordinaire de haute performance (HPLWR) a vu le jour, et une installation d'essai de la qualification de combustible en réacteur a été planifiée, conçue et passée en revue en collaboration avec la Chine. En Fédération de Russie, des études de fond concernant des réacteurs de puissance innovants refroidis et modérés par eau supercritique, notamment la faisabilité

trentaine de pays non dotés de centrales nucléaires songent à construire des réacteurs refroidis par eau, petits ou grands.

29. La persistance et l'intensification de la demande pour une production d'électricité sûre, propre, fiable et économique incitent fortement les exploitants à prolonger de plusieurs décennies la durée de vie utile des centrales nucléaires en procédant à leur modernisation et en améliorant d'importants équipements et systèmes de façon à permettre leur exploitation à long terme.

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

Situation

30. Plus de 80 modèles de RFMP issus des principales filières technologiques sont à différents stades de mise au point et de déploiement dans 18 États Membres. Des progrès considérables sont intervenus en termes de déploiement au cours des trois dernières années. La centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov, en Fédération de Russie, dotée de deux modules de REP KLT-40S, a été couplée au réseau en décembre 2019 ; en exploitation commerciale depuis mai 2020, elle produit 70 MWe. En Chine, à la faveur d'une expérience visant à faire appel à une technologie innovante pour un réacteur à très haute température, l'installation de démonstration du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM) a été connectée au réseau en décembre 2021 et a fini par atteindre pour la première fois sa pleine puissance (210 Mwe) en décembre 2022.



modèles de RFMP
dans **18 États Membres**

31. En Argentine, le réacteur CAREM-25, issu d'un modèle de REP intégré à circulation naturelle, en est à un stade de construction avancé et devrait diverger pour la première fois en 2026. La construction du réacteur ACP100, conçu comme un réacteur polyvalent, a démarré en juillet 2021 en Chine et son exploitation commerciale est prévue pour la fin de 2026. Un PRM fondé sur le réacteur RITM-200N est en train d'être construit en Yakoutie (Fédération de Russie). Le projet a reçu l'agrément environnemental, et la phase d'exploitation commerciale devrait débuter en 2028. Les travaux de construction de la première centrale nucléaire flottante fondée sur le réacteur RITM-200 ont débuté en août 2022, et une unité flottante optimisée de production d'électricité fondée sur le réacteur RITM-400 est en train d'être mise au point en Fédération de Russie. Aux États-Unis d'Amérique, en juillet 2022, la Commission de la réglementation nucléaire a certifié la conception d'une première centrale NuScale Power. NuScale a déposé en décembre 2022 une demande d'agrément du modèle type pour un module d'alimentation d'une plus grande puissance dans une configuration à six modules, dont la démonstration aura lieu au laboratoire national de l'Idaho en 2029. La France met actuellement au point NUWARD, un modèle de REP intégré de 340 MWe constitué de deux tranches de réacteur indépendantes de 170 MWe chacune, projet axé sur l'exploitation en régime flexible. La première coulée de béton du tout premier réacteur NUWARD aura lieu en France, en 2030 au plus tard. NUWARD est un PRM servant d'étude de cas dans le cadre d'un examen conjoint européen préliminaire mené par l'Autorité de sûreté nucléaire française et auquel participent l'Autorité nationale de sûreté nucléaire tchèque et l'Autorité de sûreté radiologique et nucléaire finlandaise. Au Royaume-Uni, le Bureau de la réglementation nucléaire a engagé un processus de certification pour le RFMP du groupe Rolls-Royce, un REP à trois boucles conçu pour produire une puissance de 470 MWe, dont la construction devrait débuter en 2026. À cela s'ajoutent par ailleurs des modèles de RFMP qui s'appuient sur la technologie des réacteurs à eau

bouillante à circulation naturelle. La Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis et la Commission canadienne de sûreté nucléaire examinent actuellement une demande de permis de construction pour le réacteur BWRX-300, modèle de 300 MWe conçu à l'origine aux États-Unis d'Amérique, en vue de son déploiement à la centrale nucléaire de Darlington, en Ontario (Canada), et sur le site de Clinch River, dans le Tennessee (États-Unis d'Amérique). Le plan d'action canadien pour les petits réacteurs modulaires fixe également les grandes lignes des opérations de déploiement du microréacteur modulaire (MMR) issu de la technologie des réacteurs modulaires à haute température refroidis par gaz, qui devrait produire une puissance de 15 MWth aux fins de la cogénération d'électricité et de chaleur industrielle dans les laboratoires de Chalk River. En République de Corée, une procédure d'autorisation est en cours pour le modèle de réacteur avancé modulaire intégré (SMART) de 110 MWe, qui devrait aboutir à la délivrance d'un agrément du modèle type également valable pour l'Arabie saoudite. Un consortium coréen a entrepris de mettre au point un modèle innovant de RFMP, un REP de 170 MWe, dans le but d'améliorer la sûreté et la rentabilité.

32. Les réacteurs à sels fondus (RSF) font aussi partie des technologies adoptées pour les RFMP. Il existe divers modèles de RSF à divers stades de développement au Canada, en Chine, au Danemark, aux États-Unis d'Amérique, en France, en Indonésie, au Japon, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni.

Tendances

33. L'intérêt des États Membres pour les RFMP et leurs applications va croissant. De gros efforts sont actuellement déployés dans les secteurs industriel et réglementaire afin de faciliter l'élaboration de nouveaux modèles et le déploiement rapide de tels réacteurs. L'accent continue d'être mis sur les technologies présentant un niveau de maturité ou de préparation avancé, en particulier sur les réacteurs refroidis par eau intégrés et les réacteurs modulaires à haute température refroidis par gaz. Jusqu'en 2030 environ, les processus d'autorisation concerneront en premier lieu des modèles de RFMP issus de ces technologies et, en second lieu, des modèles de réacteurs innovants n'utilisant pas l'eau comme caloporteur. En 2022, les activités liées à la mise au point d'un sous-ensemble de RFMP 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 produire une gamme de puissance plus faible ne dépassant pas 10 MWe, les microréacteurs sont considérés comme la solution optimale pour la cogénération de chaleur et d'électricité dans des régions reculées ou des petites îles, ou encore pour remplacer les générateurs diesel.

34. De nouveaux pays se sont lancés dans la conception de réacteurs immergés. 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. Au Danemark, une jeune entreprise spécialisée dans la conception de modèles de réacteurs élabore actuellement un réacteur compact à sels fondus d'une capacité d'environ 100 MWe. Les RFMP immergés sont destinés à des marchés de niche, notamment l'approvisionnement par distribution électricité- chaleur des communautés reculées, le dessalement et les systèmes énergétiques hybrides, dans le cadre de collaborations avec le secteur maritime et les chantiers navals.

35. Dans ce contexte marqué par une évolution particulièrement rapide, la Plateforme de l'AIEA sur les PRM créée en 2021 par le Directeur général de l'AIEA, offre une sorte de « guichet unique » aux États Membres et aux autres parties prenantes intéressés par la mise au point, le déploiement et la supervision de ces réacteurs, pour que l'Agence puisse leur apporter un appui coordonné et cohérent, grâce notamment au portail sur les PRM établi récemment.

A.4.3. Réacteurs à neutrons rapides

Situation

36. En 2022, cinq réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) étaient en exploitation dans trois États Membres : un en Chine, un en Inde et trois en Fédération de Russie. En outre, l'Inde met actuellement en service un prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe, tandis que la Chine construit deux RNR-Na de même type, les réacteurs CFR-600. Bien que les cinq réacteurs en exploitation et les trois réacteurs en construction soient tous refroidis au sodium liquide, la technologie des caloporteurs utilisant des métaux lourds liquides suscite de plus en plus d'intérêt, en particulier pour les RFMP. La Fédération de Russie poursuit la construction de son réacteur de démonstration à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb) de 300 MWe, le BREST-OD-300 (figure A.3), et de son réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides. Plusieurs autres technologies prometteuses de caloporteurs, utilisant par exemple l'hélium ou les sels fondus, sont également en cours d'élaboration dans différents pays. 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 spectres de neutrons rapides ou modérés.



FIG. A.3. Site du BREST-OD-300 en septembre 2022.
(Photo : Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom »)

Tendances

37. Les RNR-Na demeurent la solution privilégiée pour un déploiement à moyen terme : la Fédération de Russie met actuellement au point un grand réacteur de 1200 MWe, le BN-1200 ; la Chine a entrepris le processus de planification pour son réacteur CFR-1000 de 1 GWe ; et TerraPower, aux États-Unis d'Amérique, travaille sur le projet de réacteur Natrium, associé à un système de stockage de sels fondus, d'une capacité pouvant atteindre 500 MWe. Le réacteur Natrium peut remplacer une centrale au charbon classique et peut aussi être combiné à d'autres énergies renouvelables. Plusieurs pays élaborent actuellement des RNR-Pb : le Royaume-Uni et les États-Unis d'Amérique mettent au point le RNR-Pb Westinghouse de 450 MWe, l'Italie et la Roumanie le réacteur européen avancé de démonstration à neutrons rapides à caloporteur plomb (ALFRED) de 120 MWe, la Suède le SEALER-55, et la Chine

divers modèles de RNR-Pb de type RFMP. Créée à la fin de l'année 2021, la jeune entreprise italo-britannique Newcleo élabore des RNR-Pb miniatures (30 MWe) et de faible puissance (200 MWe). La France, qui a reporté son projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium à vocation de démonstration industrielle, ainsi que sa R-D sur les RNR-Na et le cycle du combustible associé, met actuellement au point un réacteur rapide à sels fondus (RSF) qui pourrait fonctionner sur le cycle uranium-plutonium. L'UE pilote actuellement un projet de RSF baptisé « SAMOSAFER » destiné à mettre au point et à expérimenter de nouvelles barrières de sûreté assurant une meilleure maîtrise du comportement en cas d'accidents graves.

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

Situation

38. La cogénération d'électricité et de chaleur pour des applications non électriques de l'énergie d'origine nucléaire est une technologie fiable et éprouvée, qui suscite un intérêt croissant dans le monde entier, ouvre de vastes débouchés commerciaux et offre un important potentiel de développement, étant donné que seule une petite fraction de la chaleur nucléaire est à ce jour directement exploitée. Au total,

Environ **70** réacteurs nucléaires
sont actuellement utilisés pour
des applications non électriques

Plus de **2 TWh**
d'équivalent électrique par an

quelque 70 réacteurs nucléaires sont actuellement utilisés pour des applications non électriques, que l'on peut classer en plusieurs grandes catégories, à savoir le dessalement, le chauffage urbain, la chaleur industrielle et la production d'hydrogène. Au total, ces applications consomment chaque année plus de 2 TW·h d'équivalent électrique. La plupart de ces réacteurs nucléaires servent à l'alimentation de systèmes de chauffage urbain et près de la moitié à la production de chaleur industrielle. Une dizaine d'entre eux fournit de l'énergie à des fins de dessalement nucléaire et une petite poignée est utilisée pour des projets pilotes de démonstration en phase de démarrage portant sur la production d'hydrogène.

39. Rejoignant un groupe de pays utilisateurs, dont font notamment partie 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 important programme de développement du chauffage urbain par énergie nucléaire. Après le démarrage, en 2020, du réseau de chauffage urbain connecté à la centrale nucléaire de Haiyang, dans la province du Shandong (Chine), le projet Hongyanhe, officiellement lancé en 2022, permettra d'éliminer les émissions produites par 12 100 tonnes de charbon et de réduire les émissions de soufre, de dioxyde de carbone, de poussière, d'oxyde d'azote et de cendres. Un projet de démonstration de chauffage urbain a également été lancé en 2021 à la centrale nucléaire de Qinshan, dans la province du Zhejiang (Chine) ; il ambitionne d'assurer, d'ici 2025, le chauffage par énergie nucléaire d'une superficie de quatre millions de mètres carrés couvrant les principaux centres urbains du comté de Haiyan et toute la ville de Zhapu.

40. Un certain nombre de pays ont établi des plans pour la mise en œuvre de projets de dessalement nucléaire, rejoignant ainsi les pays qui ont déjà recours à ces technologies. Au Japon et en Fédération de Russie, plusieurs unités de dessalement sont alimentées par des centrales nucléaires, tandis que l'Inde, qui bénéficie déjà d'une longue expérience dans l'exploitation d'unités de dessalement alimentées par des réacteurs nucléaires, prévoit d'augmenter ses capacités de dessalement nucléaire dans les années qui viennent.

41. Plusieurs pays étudient la possibilité de produire de l'hydrogène à partir de l'électricité ou de la chaleur provenant de réacteurs nucléaires. 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. Des activités de R-D sont en cours en vue d'élaborer des processus de production d'hydrogène à haute température au moyen de réacteurs avancés (comme le HTR-PM, dont l'exploitation a débuté récemment en Chine) ainsi que du parc de réacteurs existant. Aux États-Unis d'Amérique par exemple, cinq projets différents visent à intégrer des électrolyseurs dans des centrales nucléaires existantes : quatre d'entre eux doivent permettre d'alimenter en électricité des électrolyseurs à basse température, tandis que le dernier, mené dans la centrale nucléaire de Prairie Island, exploitera également la chaleur nucléaire pour rendre la production d'hydrogène plus efficace (figure A.4). La Fédération de Russie prévoit de réaliser une démonstration de production d'hydrogène propre à la centrale nucléaire de Kola, et la France a indiqué vouloir entamer, d'ici 2030, la construction d'un petit réacteur modulaire et exploiter son parc nucléaire existant pour produire de l'hydrogène propre.



FIG. A.4. La centrale nucléaire de Prairie Island, dans le Minnesota (États-Unis d'Amérique), où Xcel Energy et ses partenaires mènent un projet pilote de production d'hydrogène à partir d'un électrolyseur de vapeur à haute température. (Photo : Shutterstock)

Tendances

42. La possibilité qu'offre l'énergie nucléaire de produire à la fois de la chaleur et de l'électricité suscite un intérêt grandissant dans le monde entier, en réponse aux efforts croissants déployés pour lutter contre le changement climatique et à l'augmentation continue du coût des énergies fossiles dans de nombreuses régions du globe. Alors que les émissions proviennent pour la plupart d'activités qui ne concernent pas le secteur énergétique et que la quasi-totalité de l'énergie utilisée pour des applications non électriques est actuellement issue d'énergies fossiles, l'énergie nucléaire revêt un intérêt particulier puisqu'elle est une des seules sources d'électricité et de chaleur décarbonées qui peut être exploitée à large échelle, sans limites géographiques et de manière ininterrompue. En outre, les RFMP et les microréacteurs offrent des possibilités intéressantes en raison de leur taille réduite, étant donné que

plusieurs pôles qui concentrent une forte demande d’approvisionnement en chaleur ne sont pas assez grands pour exploiter efficacement la quantité de chaleur produite par les centrales dont la puissance est de l’ordre du gigawatt. Enfin, certains réacteurs avancés, tels que le HTR-PM, présentent des possibilités uniques en termes de contribution à la production de chaleur à haute température, chaleur qui peut ensuite être efficacement exploitée dans différentes applications industrielles.

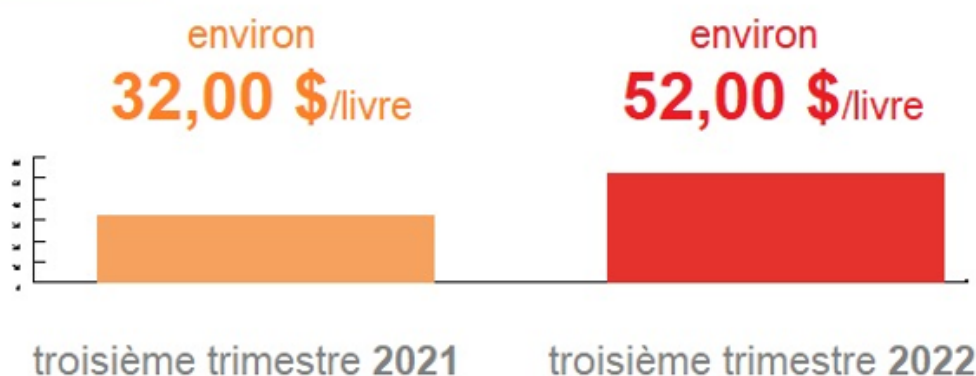
B. Cycle du combustible nucléaire

B.1. Partie initiale

Situation

43. Au troisième trimestre de 2022, le prix au comptant de l’uranium s’établissait approximativement à 52,00 \$ É.-U./livre d’U₃O₈, en forte hausse par rapport au troisième trimestre de 2021 – il était alors de 32,00 \$ É.-U./livre. On notera en outre qu’il a augmenté d’environ 42 % depuis 2021 et de plus de 64 % sur les deux dernières années (figure B.1). La hausse soutenue du prix au comptant de l’uranium a relancé sa production industrielle ; plusieurs producteurs d’uranium cherchent à redémarrer leurs activités après avoir fermé leur site pour entretien et maintenance en raison de la faiblesse du prix au comptant. C’est le cas, par exemple, de la mine de McArthur River au Canada et de celle de Langer Heinrich en Namibie.

Prix au comptant de l’uranium U₃O₈



Hausse des prix

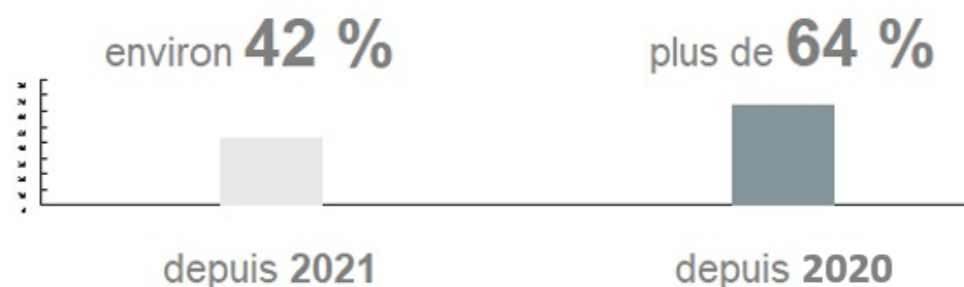




FIG. B.1. Évolution du prix au comptant de l'uranium depuis 2018. (Source : UxC)

44. Le Kazakhstan, pays dont les taux de production annuels d'uranium sont les plus élevés, a fait savoir qu'il allait intensifier ses activités de lixiviation in situ pour passer d'une capacité nominale d'environ 70 % à une capacité de 90 %. La mine de Honeymoon, en Australie, a également annoncé le redémarrage de son site de lixiviation in situ et de son installation de traitement. Après être tombées à leur plus bas niveau en 2020, année au cours de laquelle les investissements y afférents n'avaient pas dépassé 39,2 millions de dollars des États-Unis, les activités de prospection de l'uranium sont reparties à la hausse à la faveur des signaux positifs observés ces deux dernières années sur le marché de l'uranium : quelque 71 millions de dollars des États-Unis y ont été consacrés en 2021.

45. La production de combustible nucléaire est une technologie éprouvée, qui s'est continuellement améliorée au fil des ans grâce à l'automatisation et à la numérisation, à la réduction du volume de déchets issus de l'exploitation et à l'amélioration de la radioprotection des travailleurs. Elle a permis d'accroître la rentabilité (prolongement des cycles du combustible de 12 à 18 et 24 mois, taux de combustion plus élevés), la fiabilité (réduction des défaillances du combustible, nouveaux combustibles pour limiter au maximum l'arcure des assemblages combustibles, meilleure performance sismique, combustibles dopés, gaines de combustible avec revêtement ou à double couche, plus grande résistance à la corrosion) et la durabilité [recyclage et recyclage multiple du combustible des réacteurs à eau ordinaire (REO) et des réacteurs à neutrons rapides]. Les capacités actuelles de fabrication de combustible nucléaire dans le monde suffisent pour satisfaire la demande prévue d'énergie d'origine nucléaire.

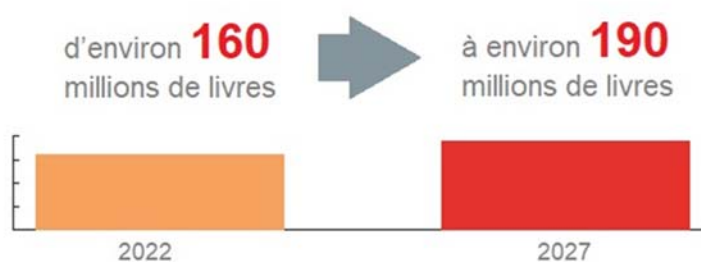
46. Plusieurs États Membres, dont certains participent au projet de recherche coordonnée (PRC) de l'Agence sur l'essai et la simulation de combustibles de technologie avancée et de combustibles résistants aux accidents (ATF-TS), ont des programmes de RDD en cours qui visent à mettre au point ce type de combustibles (ATF-TS) et des combustibles innovants en recourant à des techniques de fabrication de pointe telles que la fabrication additive. On peut par exemple, à l'aide d'imprimantes 3D, façonner du carbure de silicium de qualité nucléaire qui est utilisé dans les combustibles micro-encapsulés en céramique.

47. Plusieurs États Membres recyclent déjà les combustibles dans des réacteurs existants et prévoient de le faire dans leurs futurs réacteurs, tandis d'autres mènent des programmes de RDD visant à recycler le combustible ou à déployer des combustibles innovants pour les RFMP. Des travaux de R-D s'intéressent actuellement aux combustibles à dioxyde d'uranium, aux combustibles à mélange d'oxydes (MOX) uranium-plutonium et aux ATF pour 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 conduits de chaleur, aux combustibles métalliques ou céramiques pour RFMP à neutrons rapides refroidis par métal liquide ou gaz ou à conduits de chaleur, ainsi qu'aux combustibles à base de sels fondus pour RFMP refroidis par sels fondus.

Tendances

48. D'après les prévisions, la demande mondiale annuelle d'uranium devrait passer, au cours des cinq prochaines années, de quelque 160 millions de livres d' U_3O_8 à environ 190 millions. En 2022, le taux de production annuel mondial d'uranium devrait être d'environ 133 millions de livres, le reste de la demande étant comblé par des sources d'approvisionnement secondaires, de moins en moins sollicitées. Face à la perspective de nouvelles hausses du prix au comptant de l'uranium, les analystes

Demande mondiale d'uranium U_3O_8 : prévisions annuelles



En **2022**, le taux de production annuel mondial d'uranium U_3O_8 devrait être d'environ **133** millions de livres.

prévoient que les services des centrales nucléaires chargés des approvisionnements chercheront à procéder à des achats de concentré d'uranium et à renégocier des contrats de longue durée avec les fournisseurs d'uranium. Une telle tendance pourrait faire grimper plus encore le prix au comptant de l'uranium, qui devrait passer d'environ 52,00 \$ É.-U./livre d' U_3O_8 à environ 65,00 \$ É.-U./livre d'ici 2027.

49. On s'attend également à ce que de nouvelles mines d'uranium soient mises en exploitation dans les cinq à dix années qui viennent, notamment en Australie, au Brésil, au Canada, en Mauritanie et en Namibie. La production issue de ces nouvelles activités ne devrait cependant pas suffire pour combler l'écart entre l'offre et la demande, écart actuellement comblé par des sources d'approvisionnement secondaires. En l'état, les activités de prospection d'uranium devraient augmenter dans les prochaines années, en particulier dans les types de gisements d'uranium classiques et non classiques. Sachant qu'il faut 10 à 15 ans avant de pouvoir ouvrir et mettre en service une nouvelle mine d'uranium une fois qu'un gisement a été repéré et confirmé, les activités de prospection sont indispensables à la découverte de nouveaux gisements.

50. Afin de veiller à ce que les ressources d'uranium soient mises sur le marché le moment venu, il serait bon de mener en temps utile des activités de recherche et d'innovation en vue d'améliorer encore la prospection de l'uranium et de mettre au point des techniques d'extraction nouvelles et plus rentables. La durabilité du secteur de l'uranium et la récupération de ce dernier dans des gisements à plus faible teneur et plus complexes passent par des innovations susceptibles de favoriser l'exploitation des gisements d'uranium marginaux. Les résultats positifs tirés en 2022 des études de faisabilité de l'exploitation d'une mine de récupération in situ dans un gisement à haute teneur associé à des discordances en sont l'illustration. En outre, les techniques d'enrichissement ou de valorisation de

l'uranium à faible teneur sont prometteuses et accroissent l'intérêt porté à des gisements auparavant considérés comme non rentables. Les méthodes de biolixiviation constituent une autre innovation importante qui se prête à une application pour la lixiviation in situ d'uranium dans des gisements de type gréseux. Enfin, les techniques de lixiviation en tas, mises à profit dans d'autres applications minières, semblent également prometteuses pour certaines activités liées à l'uranium.

51. Après l'accident survenu en 2011 à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, les États Membres se sont avant tout attachés à renforcer la sûreté des combustibles qu'ils utilisent dans leurs parcs existants de grands REO ainsi que des combustibles destinés aux futures générations de réacteurs, notamment les RFMP. De nombreux États Membres mènent des programmes intensifs axés sur le déploiement d'ATF, qui comprennent notamment la fabrication de barres d'essai principal et d'assemblages d'essai principal, l'irradiation et les 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.

52. Certains États Membres envisagent de mettre en place, vers le milieu de la décennie, une infrastructure qui sera chargée de l'octroi d'autorisations relatives aux combustibles qui permettraient de porter les taux de combustion et d'enrichissement au-delà des limites initialement prévues, et ont également des projets destinés à rendre possible l'exploitation sûre et économique sur un cycle de 24 mois des REO existants avec un taux de combustion moyen plus élevé, sans devoir modifier les caractéristiques physiques des usines de fabrication et des conteneurs de transport (c'est-à-dire uniquement en modifiant la procédure d'autorisation). Pour répondre à la demande nationale et mondiale, il faudra augmenter les quantités produites de combustibles avancés afin de favoriser leur commercialisation durable et les économies d'échelle.

53. D'autres facteurs contribuent à la mise au point de combustibles nucléaires, notamment l'arrivée de modèles de réacteurs innovants, comme les réacteurs de génération IV et les RFMP (associés aussi bien à des modèles réduits de combustibles pour REO qu'à des modèles de combustibles de génération IV entièrement nouveaux). Toutes les étapes du développement des technologies de production de combustibles, de la R-D à leur industrialisation, devront avoir été franchies avant de pouvoir effectivement utiliser tous les types de combustibles destinés aux RFMP. En outre, des combustibles à base d'uranium faiblement enrichi de forte densité (HALEU) seront nécessaires à la fabrication de nombreux modèles de combustibles nucléaires innovants, comme certains destinés aux ATF ou aux RFMP. Actuellement, seule la Fédération de Russie dispose d'une chaîne d'approvisionnement pour la production de combustible à base d'HALEU, mais les États-Unis d'Amérique prévoient de mettre en place une infrastructure de production d'HALEU pour les réacteurs avancés.

B.2. Partie terminale

Situation

54. Les stocks de combustible nucléaire usé s'accumulent dans le monde au rythme d'environ 7 000 tonnes de métaux lourds (t ML) par an, leur volume total avoisinant les 320 000 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 (figure B.2).



FIG. B.2. Les participants au PRC de l'Agence intitulé « Évaluation de la performance du combustible usé et recherche dans ce domaine – phase IV » ont pu voir la nouvelle installation d'entreposage en construction dans le cadre d'une visite technique organisée à la centrale nucléaire d'Atucha, en Argentine, en 2019.

55. Dans certains pays, il arrive souvent que le combustible nucléaire usé soit déplacé d'une installation d'entreposage en piscine à une installation d'entreposage à sec après un temps de refroidissement initial. Les travaux visant à mettre sur pied des installations d'entreposage provisoire centralisées suivent leur cours. Dans certains pays, le transport du combustible nucléaire usé est une opération de routine ; d'autres se préparent à financer de futures campagnes de transport. 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.

56. Le Royaume-Uni a mis fin à ses opérations de retraitement en juillet 2022 avec la fermeture de l'usine de retraitement de combustibles Magnox, ce qui a substantiellement réduit la capacité mondiale de retraitement. La mise au point de nouvelles technologies de recyclage, à l'échelle commerciale, des combustibles utilisés pour le parc actuel de réacteurs et les réacteurs avancés se poursuit en France, en Inde et en Fédération de Russie. En décembre 2022, le réacteur BN-800 en Fédération de Russie a été chargé presque entièrement avec du combustible MOX, en vue de respecter le concept du « cycle équilibré du combustible nucléaire », qui prévoit le retraitement du combustible nucléaire usé, le recyclage des matières nucléaires régénérées en combustible nucléaire et la transmutation des actinides mineurs dans des réacteurs à neutrons rapides. La construction du complexe énergétique de démonstration pilote destiné au retraitement des combustibles des RNR-Pb à Seversk (Fédération de Russie) a été approuvée et l'exploitation de cette installation devrait commencer en 2024. Divers programmes du Département de l'énergie des États-Unis associent des laboratoires nationaux à des universités et à des entités commerciales pour qu'ils élaborent ensemble des solutions applicables à grande échelle fondées sur des technologies telles que le retraitement par procédé aqueux et le traitement pyrochimique. Le concepteur canadien du réacteur intégral à sels fondus (IMSR) Terrestrial Energy cherche, en partenariat avec l'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (ANSTO), à déterminer si le processus de traitement par Synroc développé par l'ANSTO est adapté au conditionnement du combustible usé à base de sels utilisé pour l'IMSR.

Tendances

57. 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 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.

58. L'Agence coordonne des activités de recherche sur cette question pour recueillir auprès des États Membres des données relatives à leur expérience d'exploitation et aux résultats de leurs travaux de recherche, ainsi que pour favoriser l'échange d'informations. 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.

59. Dès lors que de nouveaux combustibles destinés au parc de réacteurs existant et aux modèles de réacteurs avancés, notamment les RFMP, sont envisagés, et sachant qu'ils pourraient avoir un comportement différent s'agissant de la gestion du combustible usé, il faudra trouver pour cette dernière des solutions innovantes susceptibles d'être appliquées le moment venu.

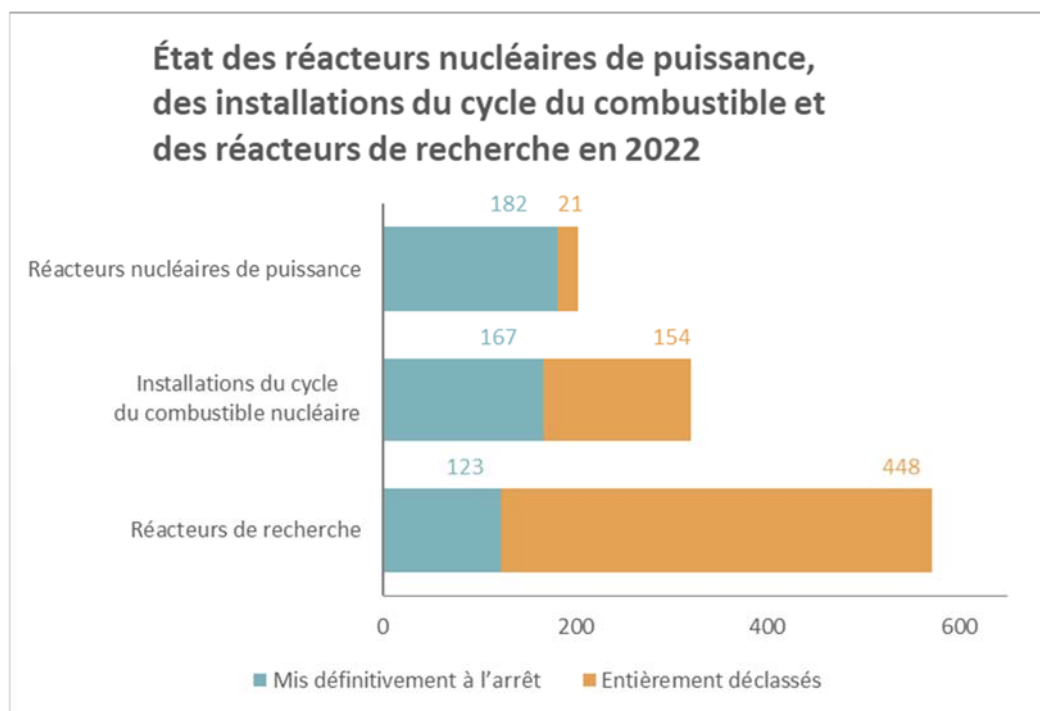
60. Malgré la réduction globale des capacités mondiales de retraitement du combustible usé, la mise au point de technologies de recyclage de pointe suscite un intérêt croissant tant pour ce qui concerne les combustibles actuels que sous l'angle des efforts engagés pour favoriser le déploiement de réacteurs avancés et en améliorer la durabilité. 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.

C. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs

C.1. Déclassement

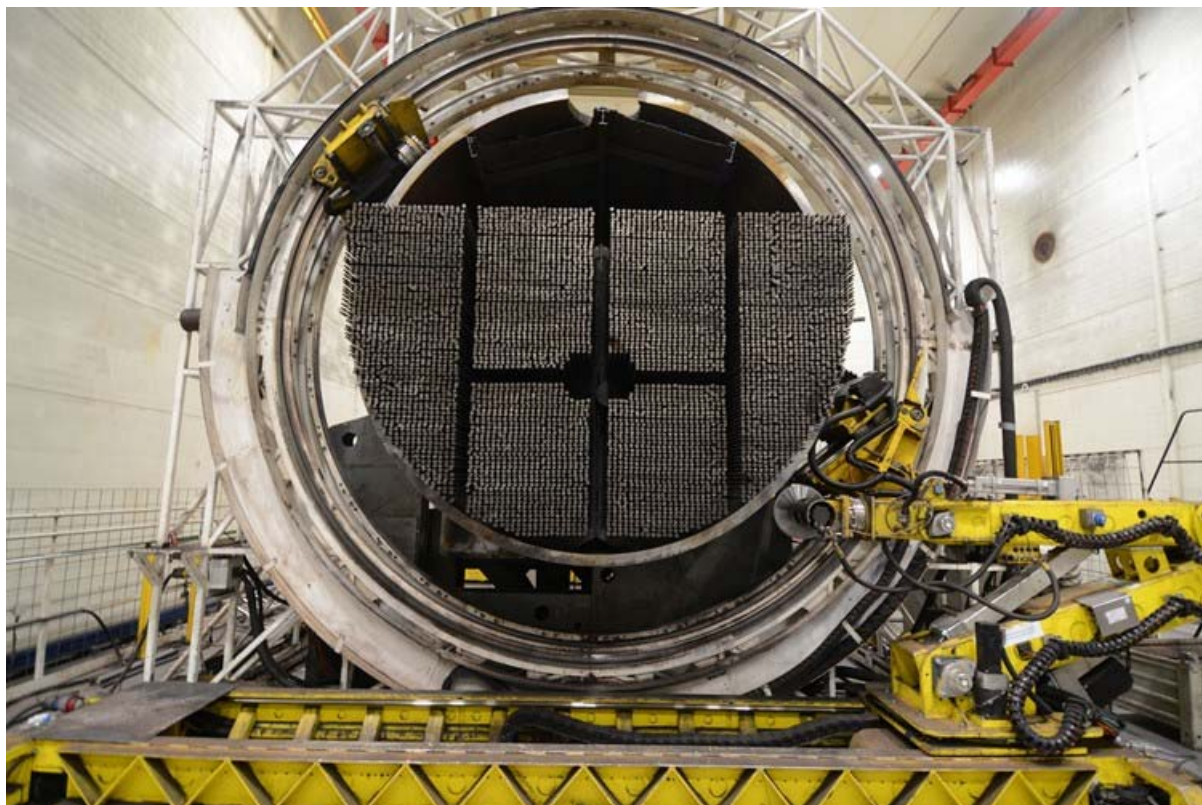
Situation

61. Cinq réacteurs de puissance ont été définitivement mis à l'arrêt en 2022 : le réacteur Doel-3 en Belgique, les réacteurs avancés refroidis par gaz (RARG) Hinkley Point B-1 et B-2 et le réacteur Hunterston B-2 au Royaume-Uni, et le REP Palisades aux États-Unis d'Amérique. Au total, 203 réacteurs nucléaires ont été retirés définitivement du service dans le monde, dont 21 ont été entièrement déclassés. Pour l'heure, les principaux programmes de déclassement de réacteurs de puissance concernent l'Allemagne (27 réacteurs définitivement mis à l'arrêt ou en cours de déclassement), le Japon (24 réacteurs aux mêmes stades) et les États-Unis d'Amérique (28 réacteurs aux mêmes stades, dont 18 mis en attente sûre et 8 en cours de démantèlement). Le Royaume-Uni a définitivement mis à l'arrêt 36 de ses réacteurs refroidis par gaz de première et de deuxième génération. En phase post-opérationnelle pour la plupart, ces réacteurs s'appêtent à être mis en attente sûre.



62. Des activités de déclasserment sont en cours dans de grandes 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. Actuellement, l'accent est surtout mis sur la réduction des risques graves, notamment l'élimination des déchets hérités du passé, lesquels sont généralement stockés dans des piscines ou des tranchées en béton avant qu'il ne soit procédé au démantèlement de l'installation. Dans son usine de retraitement de combustible située au Royaume-Uni, la compagnie Magnox prépare les activités de nettoyage après exploitation. Le site va également entrer dans une phase pleinement opérationnelle de récupération des déchets de ses piscines et silos. Les travaux d'enlèvement et de conditionnement des déchets hérités du passé se poursuivent sur le site de La Hague (France) ; ils consistent notamment à récupérer les déchets de graphite et de magnésium stockés dans des silos de béton et à décontaminer les cellules présentant des niveaux d'activité trop élevés pour que des êtres humains puissent y accéder ou y rester suffisamment longtemps. Toutes les boîtes à gants ayant servi à la manipulation de plutonium ont également été démantelées, et le site s'occupe à présent des principaux instruments de traitement – dissolvants, mélangeurs-décanteurs et évaporateurs.

63. De grands progrès techniques ont été réalisés dans plusieurs centrales nucléaires en 2022. Ainsi, deux cuves sous pression de réacteurs, 12 générateurs de vapeur et d'autres composants du circuit primaire ont été découpés et emballés à la centrale nucléaire de Bohunice V-1 en Slovaquie (figure C.1), le grand bouchon tournant de la centrale Superphénix en France a été découpé, le cœur du réacteur de la centrale de Vermont Yankee aux États-Unis d'Amérique a été démantelé et le dernier grand bâtiment restant à la centrale José Cabrera en Espagne, à savoir le bâtiment des turbines, a été démoli.



*FIG. C.1. Découpage d'un générateur de vapeur à la centrale nucléaire Bohunice V-I.
(Photo : Société de l'énergie nucléaire et du déclassé, Slovaquie)*

64. L'Agence japonaise de l'énergie atomique a franchi un cap important dans son programme de fin de cycle. En octobre 2022, elle a en effet achevé les principales opérations de la première étape du déclassé du réacteur surgénérateur à neutrons rapides MONJU en déplaçant dans la piscine d'entreposage du combustible usé 530 assemblages qui étaient situés dans le cœur du réacteur et le réservoir d'entreposage du combustible hors de la cuve. L'élimination du sodium liquide du circuit primaire de refroidissement a été menée à bien en avril 2022.

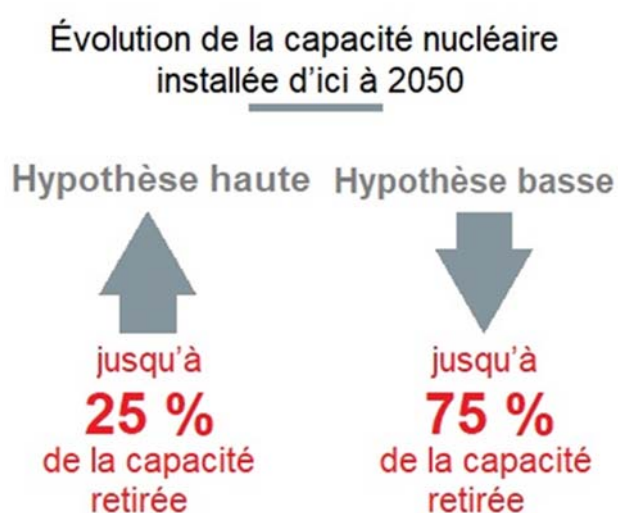
65. Le 22 juillet 2022, l'Autorité de réglementation nucléaire du Japon a approuvé la modification du plan de mise en œuvre de l'installation de rejet de l'eau traitée par le Système avancé de traitement des liquides (ALPS) qu'avait présenté la Compagnie d'électricité de Tokyo en décembre 2021. Les opérations de rejet devraient débuter en 2023, et le dispositif prévu à cet effet est en cours d'installation. En ce qui concerne la récupération des débris de combustible dans les cuves des réacteurs, il a été décidé de procéder en premier lieu à un essai dans la tranche 2. Le matériel conçu à cette fin, tel que les bras robotiques et manipulateurs, a été fabriqué (figure C.2), et l'objectif est maintenant d'améliorer son opérabilité et de terminer l'étude détaillée de la zone de pénétration de la cuve de confinement, où le matériel sera installé.



FIG. C.2. Hall d'essai des bras robotiques et manipulateurs pour la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. (Photo : Ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie)

Tendances

66. L'Agence a établi deux projections concernant l'évolution de la capacité nucléaire installée d'ici 2050, l'une « haute », l'autre « basse ». Dans la projection haute, environ 25 % de la capacité installée actuelle serait mis hors service et la durée de vie de nombreuses centrales serait prolongée. À cela s'ajouterait un vaste programme de nouvelles constructions. Dans la projection basse, jusqu'à 75 % de la capacité installée actuelle serait mis hors service, et de nouvelles constructions remplaceraient cette capacité perdue. Ces chiffres montrent combien il est difficile de prévoir le rythme des mises à l'arrêt d'ici à 2050.



67. Comme ces dernières années, le rythme des mises à l'arrêt d'installations nucléaires reste sensiblement identique à celui des mises en service de nouvelles installations. Dans le cas des centrales nucléaires, les mises à l'arrêt concernent surtout le Royaume-Uni, où les réacteurs avancés refroidis par gaz de deuxième génération sont mis hors service pour des motifs économiques, lorsque les coûts de prolongation de la durée de vie des installations sont trop élevés au regard des revenus que l'on pourrait en tirer en les maintenant en exploitation. Pour ce qui est de l'Allemagne, les mises à l'arrêt définitives

des trois dernières installations en exploitation, qui devaient intervenir fin 2022, ont été reportées à avril 2023 en raison de la crise énergétique actuelle.

68. 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 éventuel démantèlement et de la gestion des matières qui va de pair avec ces opérations.

69. Les technologies numériques et la réalité virtuelle et augmentée jouent un rôle de plus en plus important pour faire avancer les projets de déclassement nucléaire du fait de leur capacité à améliorer la planification et la mise en œuvre. Ces technologies offrent des avantages potentiels qui couvrent plusieurs domaines d'activité dans la phase de déclassement d'une installation : elles renforcent les capacités de collecte, d'analyse et de présentation des données nécessaires à la planification des stratégies de démantèlement ; elles permettent de mettre les robots au service de la sûreté du personnel ; elles facilitent la formation des exploitants en donnant la possibilité de réaliser des simulations des activités prévues dans un environnement virtuel aux effets réalistes ; elles aident à prévoir plus précisément les quantités futures de déchets et, partant, à mieux estimer les coûts ; enfin, elles permettent de mieux visualiser les scénarios de déclassement tant pour les exploitants que pour les parties prenantes externes. Les technologies numériques pourront offrir encore beaucoup d'avantages à l'industrie nucléaire dans son ensemble, lorsque les connaissances acquises à la phase de déclassement seront transférées aux concepteurs et aux exploitants des centrales nucléaires ainsi qu'aux organismes d'appui technique.

C.2. Remédiation environnementale et gestion des matières radioactives naturelles

Remédiation environnementale

70. Le processus de remédiation environnementale peut être lent. Ainsi, même si les travaux se poursuivent sans heurts dans certains cas, il en est d'autres où leur mise en œuvre continue de buter sur des obstacles. Depuis 1989 aux États-Unis d'Amérique, le Bureau de la gestion de l'environnement du Département de l'énergie a assaini 92 anciens sites dans tout le pays, le dernier en date étant celui du Laboratoire national de Brookhaven. Quinze sites doivent encore être assainis mais posent certains problèmes parmi les plus difficiles et coûteux. En Europe et en Asie centrale, l'assainissement des anciens sites d'extraction d'uranium progresse. Une nouvelle technologie combinant un drone et un détecteur de rayons gamma très sensible a été mise au point et sera déployée dans un avenir proche pour faciliter la caractérisation des sites contaminés par d'anciennes activités liées à l'uranium en Asie centrale. Afin de répondre au besoin de main-d'œuvre spécialisée à la fois dans le déclassement et la remédiation, un consortium dirigé par l'Université de Porto au Portugal élabore actuellement, sous les auspices du programme Erasmus+ de la Commission européenne, un programme de master en sciences axé sur le déclassement et la remédiation environnementale.

Gestion des matières radioactives naturelles

71. De nombreux pays éprouvent des difficultés à gérer leurs résidus de matières radioactives naturelles (figure C.3). Ils sollicitent un appui pour mettre en place l'infrastructure nécessaire à leurs besoins. Des goulets d'étranglement se créent, faute de politiques relatives à l'utilisation de ces résidus et aux solutions de stockage définitif des matières radioactives naturelles déclarées comme déchets. L'absence de laboratoires accrédités dans bon nombre d'États Membres constitue un autre obstacle qui

vient s'ajouter aux difficultés de transport de ces matières en vue de leur stockage définitif dans un autre pays.



FIG. C.3. Résidus de l'industrie minière du cuivre et présence de matières radioactives naturelles.

Tendances

Remédiation environnementale

72. Une nouvelle tendance qui se dessine en matière de remédiation consiste à intégrer le concept de réduction des effets dommageables dans le calcul de la valeur globale d'un site contaminé. Le retraitement des déchets existants et plus anciens peut permettre d'éviter de coûteuses mesures de

remédiation en stabilisant les résidus sur les plans géochimique et géotechnique. Cela permet de limiter les responsabilités et les coûts de fermeture définitive qui y sont associés, et peut déboucher sur la création de produits « verts » commercialisables. La remédiation constitue une étape cruciale des opérations d'extraction minière dans le cadre d'une économie circulaire, car elle permet de rendre les sites aptes à accueillir de nouvelles activités de production à l'avenir. Le programme d'investissements massifs lancé aux États-Unis d'Amérique en vue de produire une énergie propre sur d'anciens terrains miniers pour transformer ces sites en pôles énergétiques propres en est un exemple.

73. Pour les projets en cours et futurs, il est essentiel de commencer à planifier la fermeture dès le départ. Néanmoins, si l'on veut tirer pleinement parti de ces possibilités au niveau des sites, il convient d'évoluer vers un modèle d'économie circulaire élargi qui tienne compte des approches établies en matière de durabilité et qui s'appuie sur un processus décisionnel participatif englobant les dimensions environnementales, économiques et sociales. À cet égard, la tendance est à l'adoption de l'IA et de l'apprentissage automatique pour étayer la prise de décision dans des situations complexes, comme c'est le cas dans le cadre de la remédiation environnementale.

Gestion des matières radioactives naturelles

74. La circularité est également de mise dans les activités liées à la gestion des matières radioactives naturelles. Différents secteurs étudient les processus susceptibles d'ajouter de la valeur aux résidus de ces matières. Le phosphogypse, qui sert à la fois d'amendement agricole et de matériau de construction, et l'ilménite, utilisée pour la fabrication commerciale de ciment mais aussi de céramique, entre autres, sont deux exemples de cette tendance qui gagne du terrain. Pour pouvoir tirer pleinement parti des résidus générés par les processus industriels liés aux matières radioactives naturelles, il faudra investir dans l'innovation technologique, adopter des politiques appropriées au niveau national, connaître les stocks disponibles pour ces matériaux et mettre en place des mécanismes de financement innovants, afin de pouvoir s'aligner sur le Programme de développement durable à l'horizon 2030.

C.3. Gestion des déchets radioactifs

Situation

75. En 2022, des progrès substantiels ont continué d'être réalisés dans la gestion des déchets radioactifs, en particulier en ce qui concerne l'avancement des programmes de dépôt géologique profond et la poursuite du déploiement sûr de technologies de gestion des déchets avant leur stockage définitif.

76. Même si des technologies de conditionnement et de traitement sont d'ores et déjà utilisées pour la grande majorité des flux de déchets radioactifs, il est difficile de déterminer celles qui sont les plus indiquées, du point de vue tant technique que financier. Le choix des technologies exige une connaissance des déchets, de leurs caractéristiques, de leurs critères d'acceptation ainsi que des dispositions réglementaires qui les régissent. La Commission pakistanaise de l'énergie atomique a mis au point des moyens de caractérisation des déchets des centrales nucléaires et des déchets de déclassement. En parallèle, les travaux d'élaboration de critères d'acceptation des déchets pour les installations de stockage définitif des déchets de faible ou moyenne activité progressent. Plusieurs pays qui possèdent de faibles stocks de déchets mettent actuellement au point des solutions centralisées pour la gestion de ces déchets avant leur stockage définitif. La Croatie a décidé de se doter d'un centre de gestion des déchets radioactifs à Čerkezovac, et l'Estonie a déclassé son installation de type Radon et évacué tous les déchets vers des installations situées sur le site de Paldiski.

77. Le site ukrainien de Tchernobyl a mené à bien son programme détaillé visant à garantir des conditions opérationnelles sûres à la suite de l'arrêt de ses installations en février 2022 et les activités de traitement et de stockage définitif des déchets radioactifs y ont repris.

78. Grâce à l'initiative mondiale de gestion du radium 226 de l'Agence, plusieurs États Membres ont déjà trouvé une solution pour gérer les sources de radium retirées du service. En Islande, des sources de radium 226 ont été conditionnées pour en faciliter le transport en vue de leur recyclage en radiopharmaceutiques, lesquels servent à l'alphathérapie ciblée des cellules cancéreuses (figure C.4).



FIG. C.4. Aiguilles de radium usagées conditionnées en Islande à des fins de recyclage.

79. En 2020, le Canada a lancé un processus de consultation inclusif pour moderniser sa politique en matière de déchets radioactifs. En février 2022, il a publié son projet de politique en matière de gestion des déchets radioactifs et de déclassement pour recueillir les observations de la population. Une stratégie nationale intégrée de gestion des déchets radioactifs a également été soumise à une consultation publique en août 2022. L'accent est mis sur la gestion éclairée des déchets, dans laquelle tous les flux de déchets du stock national disposent d'une solution de stockage définitif planifiée. Les Laboratoires nucléaires canadiens ont annoncé, en mai 2022, que le projet de Port Granby faisait désormais l'objet d'une maintenance et d'une surveillance à long terme, après que 1,3 mégatonne de déchets de faible activité ont été placés dans un monticule de confinement en surface qui a été fermé fin 2021.

80. Plusieurs faits nouveaux sont intervenus dans des programmes de dépôt géologique profond destinés à des déchets de haute activité. L'organisation finlandaise de gestion des déchets Posiva a terminé les travaux d'excavation des cinq premiers tunnels de stockage définitif, où le combustible utilisé devrait commencer à être stocké d'ici 2025. En janvier 2022, le Gouvernement suédois a autorisé la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires à démarrer la construction du dépôt de combustible utilisé à Forsmark, ainsi que de l'usine d'encapsulation à Oskarshamn. Un sondage a ensuite été réalisé sur le site de la municipalité d'Östhammar, dont il est ressorti que plus de 80 % des personnes interrogées étaient favorables à la construction du dépôt géologique profond, ce qui constitue le plus fort taux d'approbation jamais obtenu. Dans le cadre du projet Cigéo en France, une demande de permis de bâtir devait être déposée avant la fin de 2022. En Fédération de Russie, les études à grande échelle et en laboratoire de la masse rocheuse pour la construction d'un laboratoire de dépôt géologique profond dans la région de Krasnoyarsk devraient être achevées en 2023.

81. En Suisse, la Société coopérative nationale suisse pour le stockage des déchets radioactifs a recommandé, en septembre 2022, de choisir le site du Nördlich Läger pour accueillir un dépôt

géologique profond ; elle devrait soumettre la demande d'autorisation en 2024. La Société canadienne de gestion des déchets nucléaires poursuit sa collaboration avec des communautés volontaires et a l'intention de recommander un site pour un dépôt géologique profond en 2024.

Tendances

82. Des politiques et stratégies nationales de gestion des déchets radioactifs continuent d'être lancées et affinées dans de nombreux États Membres, ce qui, s'agissant de ceux de l'UE, s'inscrit dans le droit fil de l'article 14.3 de la Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011.

83. De plus en plus de sources de haute activité retirées du service sont réexpédiées aux fournisseurs en vue de leur recyclage et de leur stockage définitif. Près d'une douzaine d'États Membres devraient procéder à l'enlèvement de plus de 30 sources de haute activité en 2023. Bien que la gestion des sources radioactives scellées retirées du service se soit améliorée dans de nombreux pays, leur stockage définitif demeure problématique, en particulier dans les États dotés de programmes nucléaires modestes. En 2023, la Malaisie prévoit de mener à bien sa première opération de stockage en puits de sources radioactives scellées retirées du service. De nombreux États Membres s'intéressent de près à ce projet, car leurs stocks se composent pour l'essentiel de ces mêmes types de sources. La Bulgarie, la Géorgie et le Ghana, entre autres, envisagent de recourir à cette technologie de stockage définitif.

84. La minimisation des déchets radioactifs demeure une priorité. Les technologies thermiques et le supercompactage restent la norme industrielle mondiale permettant d'obtenir une baisse significative du volume des déchets de faible ou moyenne activité. À l'heure actuelle, les États Membres examinent en détail les géopolymères pour savoir s'ils pourraient remplacer le ciment Portland ordinaire. En France, Électricité de France et Veolia ont créé une coentreprise, Waste2Glass, pour vitrifier les déchets autres que les déchets de haute activité sous une forme stable et durable. Au Royaume-Uni, le site de recherche de Harwell s'est associé à Augean, société de gestion des déchets dangereux, pour adapter une technologie de jet d'eau à très haute pression afin de décontaminer ses tuyauteries et permettre ainsi de les recycler plutôt que de les stocker comme déchets radioactifs.

85. Des progrès continuent d'être réalisés pour ce qui concerne la gestion des stocks de déchets hérités du passé. Sur le site de Hanford, aux États-Unis d'Amérique, les premières activités de traitement à grande échelle des déchets radiochimiques ont débuté. Plus de 189 millions de litres de déchets ont été produits depuis les années 1950 et sont actuellement entreposés dans des réservoirs souterrains dans l'attente de leur stockage définitif. Les Pays-Bas construisent un nouveau bâtiment multifonctions pour y stocker les déchets radioactifs anciens issus de la production d'isotopes médicaux. L'installation pourra servir à leur stockage jusqu'en 2050. Au Royaume-Uni, la phase opérationnelle d'un programme étalé sur 20 ans consistant à déplacer les copeaux de magnésium résultant du traitement du combustible des réacteurs Magnox de silos de six mètres de profondeur vers des conteneurs de déchets en acier inoxydable conçus à cet effet, avant de transférer ces derniers vers une installation d'entreposage moderne, a été lancée.

86. En ce qui concerne la collaboration internationale dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, la Compagnie tchèque d'électricité ČEZ et la Société slovaque de l'énergie nucléaire et du déclassement ont signé un accord de coopération portant sur la mise en commun de leurs connaissances en matière de minimisation des déchets et de gestion du vieillissement. La ERDO Association for Multinational Radioactive Waste Solutions continue de s'employer à trouver des solutions multinationales pour les États Membres disposant de petits stocks de déchets de faible ou moyenne activité à longue période. Le Programme conjoint européen de recherche sur la gestion des déchets radioactifs a continué d'encourager les participants à renforcer la collaboration pour assurer une gestion sûre des déchets radioactifs. La Plateforme technologique de l'Union européenne sur le stockage géologique des déchets radioactifs continue d'œuvrer activement à l'objectif exposé dans son rapport

intitulé « Vision 2025 Report », à savoir disposer en Europe, à l'horizon 2025, des premières installations assurant le stockage géologique en toute sûreté du combustible usé, des déchets de haute activité et des autres déchets radioactifs à longue période.

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

Situation

87. Le projet ITER a bien avancé (figure D.1). En juin 2022, ils étaient achevés à 77 %, marquant ainsi une étape importante. L'opération de sous-assemblage du premier secteur de la chambre à vide a été menée à bien. Ce secteur, qui comprend deux bobines de champ toroïdal associées et des éléments du bouclier thermique, a ainsi été installé dans la fosse du tokamak. Le troisième secteur de la chambre à vide a été livré, quant à lui, sur le site d'ITER. Le dernier élément du cryostat qui restait à fabriquer, à savoir le couvercle, est maintenant prêt. Des progrès importants ont été réalisés sur le plan des systèmes de l'installation : le circuit d'eau de refroidissement a été livré et il est prêt à être mis en service, les travaux de construction de l'usine cryogénique sont terminés, les essais fonctionnels sont en cours, et la totalité du matériel nécessaire au premier plasma a été installée dans les bâtiments de conversion de l'énergie magnétique. En revanche, de récentes analyses de composants essentiels et totalement nouveaux d'ITER ont fait ressortir la nécessité de procéder à d'importantes réparations. L'Organisation ITER traite également des questions réglementaires soulevées par l'Autorité française de sûreté nucléaire.

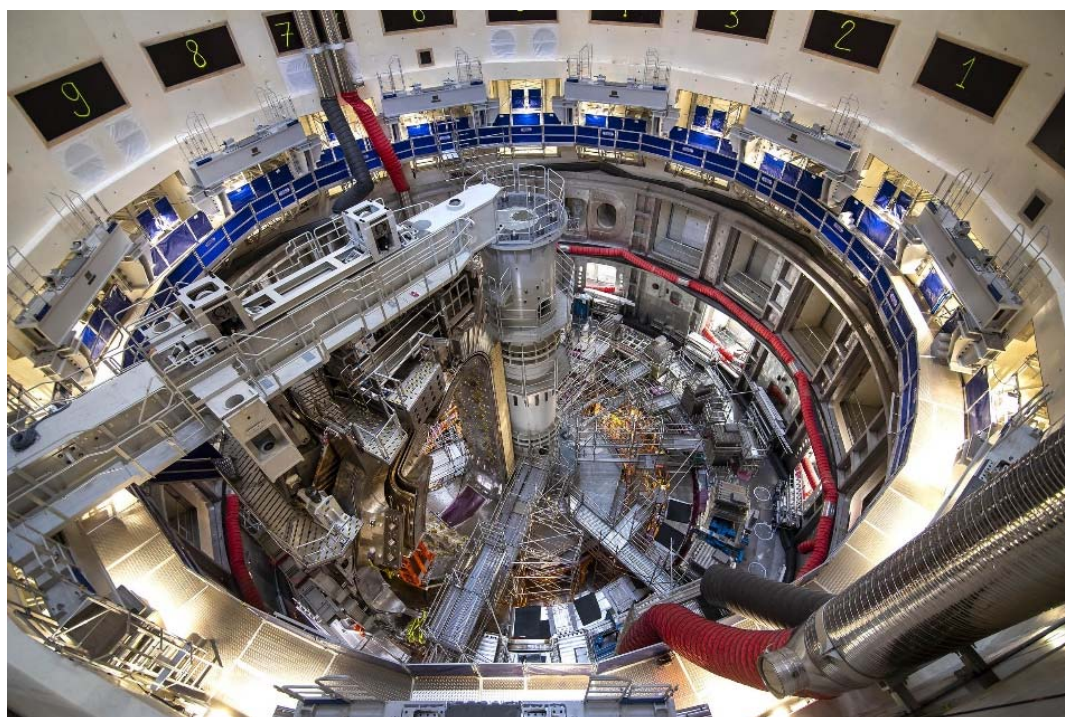


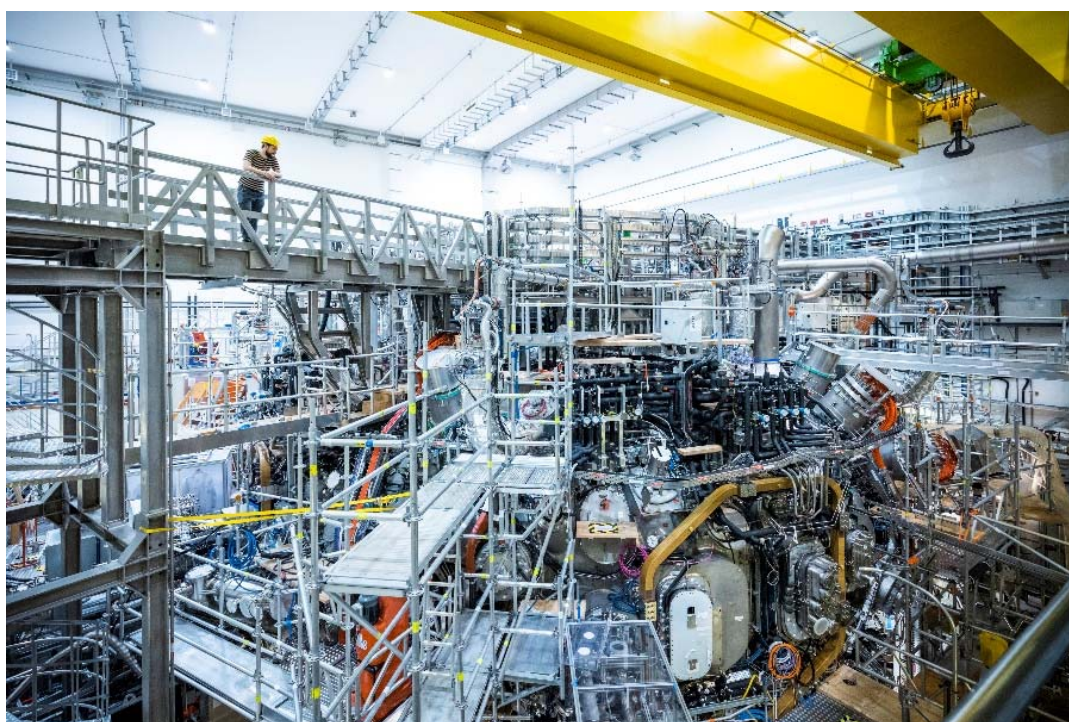
FIG. D.1. Au cœur du bâtiment du tokamak ITER. C'est dans cette fosse de 30 mètres de profondeur qu'est assemblée la machine ITER, du bas vers le haut. (Photo : Organisation ITER)

88. La mise en place du consortium chargé de la construction de la source de neutrons de l'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion (IFMIF) pour la centrale de démonstration à fusion (DEMO) en Espagne s'est poursuivie. Cette source jouera un rôle de premier plan dans le

développement et la validation des matériaux de fusion. La planification du projet est terminée, et le financement de la construction est en voie d'être assuré. De même, de nouveaux progrès ont été enregistrés dans le cadre du sous-projet de l'IFMIF au Japon axé sur la validation et la conception techniques. La conception technique intégrée du complexe et la collecte des données nécessaires aux décisions sur la construction, l'exploitation, le fonctionnement et le déclassement de la future source de neutrons de fusion ont bien évolué grâce à la validation technique des trois principales installations – à savoir l'installation d'essai, l'installation de la cible de lithium et l'installation de l'accélérateur.

89. La mise en service du tokamak JT-60SA au Japon, qui avait débutée en avril 2020, a été interrompue, car l'une des bobines magnétiques avait une isolation haute tension insuffisante. Des améliorations y sont en cours, et la mise en service devrait reprendre plus tard en 2023.

90. En octobre 2022, Wendelstein 7-X (W7-X), le stellarator le plus avancé au monde, situé en Allemagne, est entré dans sa deuxième phase expérimentale (figure D.2). Il est maintenant entièrement équipé d'un ensemble de composants refroidis à l'eau faisant face au plasma, grâce auxquels il devrait pouvoir émettre des décharges allant jusqu'à 30 minutes, pour une puissance de chauffage de 10 MW, qui devraient lui permettre de fonctionner en continu.



*FIG. D.2. Avec une capacité de chauffage doublée, 40 nouveaux diagnostics et 6,8 kilomètres de tuyaux de refroidissement, le stellarator W7-X a débuté sa deuxième campagne d'expérimentation scientifique.
(Photo : Institut Max Planck de physique des plasmas)*

91. D'après une étude¹ publiée en septembre 2022, le tokamak supraconducteur expérimental avancé de Corée (KSTAR) (République de Corée) a pu atteindre un régime de fusion du plasma satisfaisant au regard des exigences de performance des centrales, notamment une température supérieure à 100 millions de kelvins et un contrôle suffisant des instabilités pour garantir un fonctionnement en

¹ Han, H., Park, S.J., Sung, C. et al. A sustained high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions. Nature 609, 269-275 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05008-1>

régime permanent pendant des dizaines de secondes. Ces résultats confortent l'idée selon laquelle les tokamaks constituent une solution prometteuse pour les futures centrales à fusion commerciales.

92. Le 13 décembre 2022, le Département de l'énergie des États-Unis a annoncé une percée scientifique historique pour l'énergie de fusion. Des chercheurs de l'installation nationale d'ignition (NIF), située au Laboratoire national Lawrence de Livermore, ont pu produire environ 3,15 mégajoules d'énergie de fusion à partir de 2,05 mégajoules fournis au total par 192 faisceaux laser, obtenant ainsi un gain d'énergie dans la cible d'environ 1,5 pour la première fois dans une expérience de fusion. L'énergie nécessaire pour alimenter les faisceaux laser s'élevait à environ 300 mégajoules.

93. Des gouvernements, entreprises privées et certaines coentreprises public-privé continuent de travailler sur les concepts des centrales de démonstration à fusion (DEMO), dont l'objectif est de démontrer le gain net d'énergie électrique obtenu par la fusion (figure D.3). On compte actuellement au moins 11 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 2025 et 2055. En Italie, les travaux de construction du tokamak DTT, un nouveau tokamak supraconducteur consacré à l'étude de solutions avancées de divertor pour les centrales DEMO, se sont poursuivis.

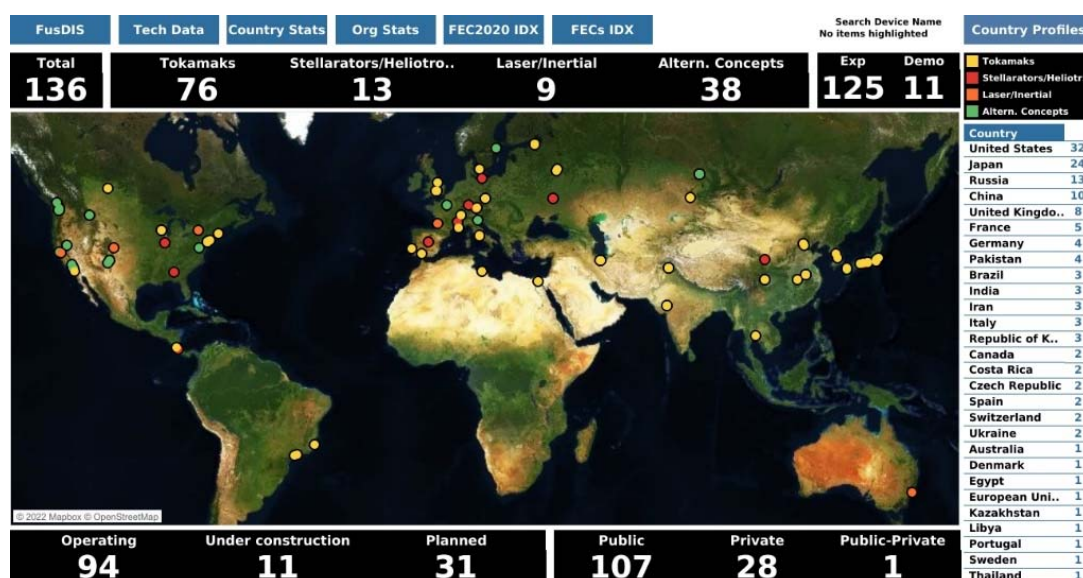
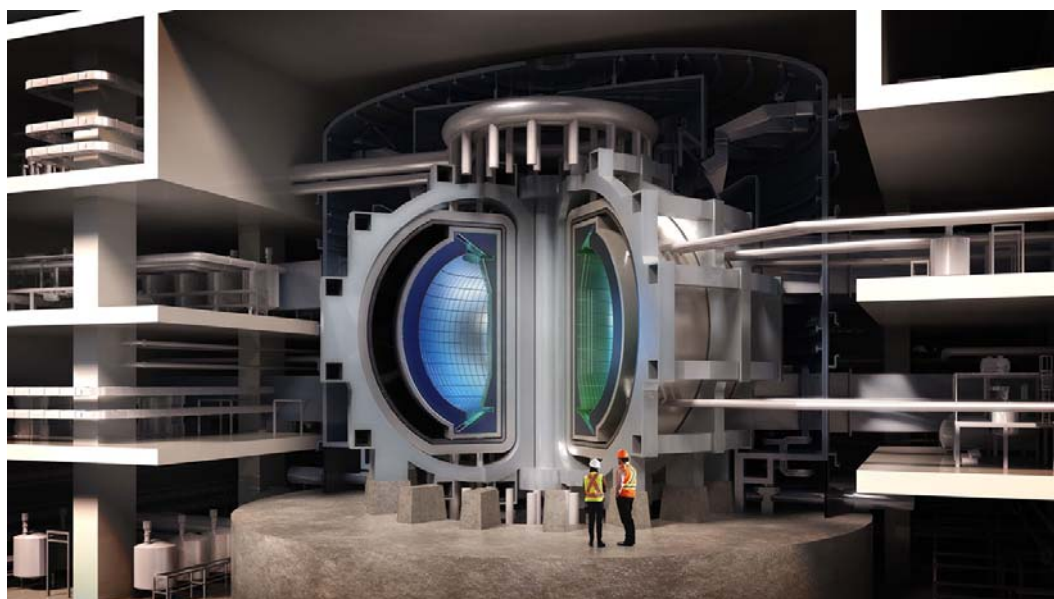


FIG. D.3. Plus de 130 dispositifs de fusion publics et privés à usage expérimental sont en service, en construction ou à l'étude, et plusieurs organismes envisagent de mettre au point des modèles destinés à des centrales de démonstration à fusion.
(Source : Système d'information sur les dispositifs de fusion, AIEA)

94. En octobre 2022, le Gouvernement britannique a annoncé que son programme de centrale de démonstration à fusion intitulé « Tokamak sphérique pour la production d'énergie » (STEP) serait mené sur un site de centrale au charbon à West Burton, dans le Nottinghamshire, les travaux de construction devant s'achever en 2040. L'objectif sera de démontrer la capacité de production électrique nette de la fusion et la capacité de la centrale à produire du tritium comme son propre combustible.

95. Le même mois, l'entreprise américaine General Atomics a annoncé qu'elle prévoyait de construire une centrale à fusion pilote avancée et compacte, de type tokamak, capable de fonctionner en régime permanent (figure D.4). La conception reposera sur des capteurs avancés, des algorithmes de contrôle et des ordinateurs de haute performance pour contrôler le plasma, des couvertures tritigènes en carbure de silicium pour produire le tritium et un chauffage par micro-ondes pour alimenter les réactions de fusion.



*FIG. D.4. Coupe de l'intérieur de la centrale à fusion pilote de General Atomics.
(Source : General Atomics)*

96. La hausse impressionnante des investissements du secteur privé s'est poursuivie en 2022. Les entreprises de ce secteur ont déclaré avoir attiré environ 5 milliards de dollars des États-Unis au total – dont plus de 3 milliards depuis juin 2021. En 2022, on compte 33 entreprises de ce type dans le monde (Allemagne, Australie, Canada, Chine, France, États-Unis d'Amérique, Israël, Italie, Japon, Royaume-Uni), dont plus de 70 % sont implantées dans les seuls États-Unis d'Amérique.

Tendances

97. Aux États-Unis d'Amérique, le sommet de la Maison-Blanche sur l'élaboration d'une vision décennale audacieuse pour l'énergie de fusion commerciale, qui s'est tenu en mars 2022, a été l'occasion de lancer trois nouvelles initiatives – dont une sur la fusion, émanant du Département de l'énergie (DOE), qui a conduit à la nomination d'un nouveau coordonnateur principal pour l'énergie de fusion au sein du Bureau de la Secrétaire générale adjointe pour la science et l'innovation. Toutes ces initiatives reposent sur un même postulat : les partenariats public-privé sont un moyen d'accélérer les travaux de recherche, de développement et de démonstration (RDD) sur l'énergie de fusion. Partant, en septembre 2022, le Bureau des sciences du DOE a lancé un appel à candidatures pour le financement d'un nouveau programme de développement par étapes de la fusion qui, mené en partenariat avec le secteur privé, vise à concevoir une centrale à fusion pilote.

98. La modélisation de la dynamique des plasmas à l'aide de l'IA ainsi que le contrôle en temps réel des expériences de fusion ont considérablement gagné en efficacité, accélérant ainsi les progrès vers l'avènement de l'énergie de fusion. Par exemple, selon une étude publiée en 2022, les systèmes de contrôle fondés sur l'IA étaient capables de créer et de maintenir toute une série de formes et de configurations de plasma dans le tokamak TCV en Suisse en manipulant les 19 bobines magnétiques à l'intérieur du dispositif (figure D.5). Dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée (PRC) lancé récemment, l'Agence et ses partenaires ont étudié les utilisations possibles et mené des analyses comparatives et ont collecté les données correspondantes pour tester les applications de l'IA dans la science de la fusion à un niveau international.

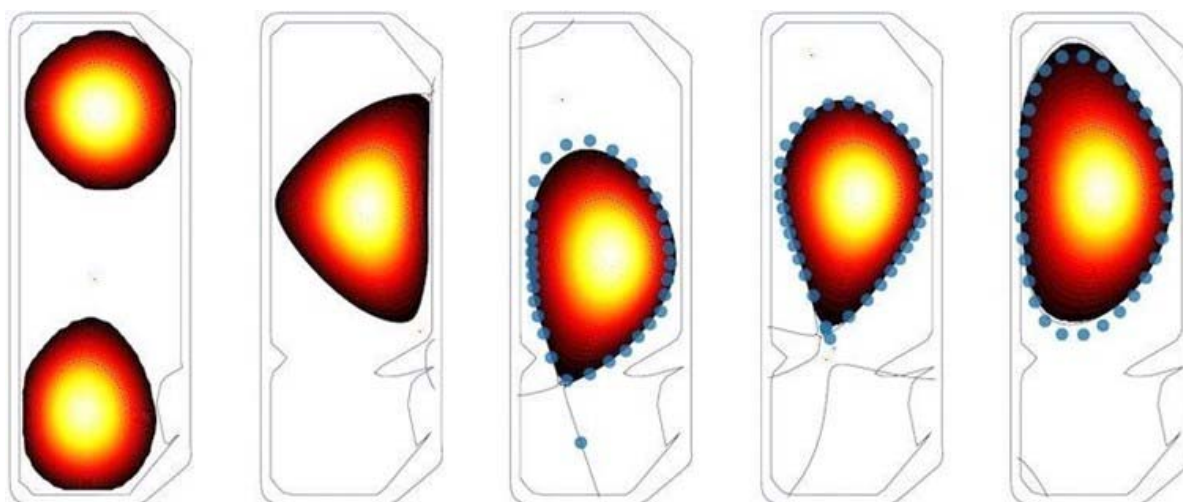


FIG. D.5 Série de différentes formes et configurations de plasma générées avec le contrôleur de système fondé sur l'IA. De gauche à droite : gouttelettes, triangularité négative, forme semblable à celle d'ITER, flocon de neige, plasma allongé.
(Source : DeepMind, et le Swiss Plasma Center de l'École polytechnique fédérale de Lausanne)

99. Les États Membres accélèrent le développement de la technologie non seulement dans le domaine de la science expérimentale, mais aussi dans le secteur privé, d'où une multiplication des investissements et des avancées récentes et grâce à l'essor de grands projets nationaux et internationaux consacrés à la fusion. Dans ce contexte, plusieurs d'entre eux examinent les possibilités d'établir un cadre national de sûreté adapté aux systèmes de fusion. Les normes et orientations existantes qui traitent de la sûreté de la conception des installations nucléaires, telles que les centrales nucléaires ou les accélérateurs, ne tiennent pas compte des spécificités des centrales à fusion, ni des dangers qu'elles peuvent comporter.

100. À l'heure actuelle, une dizaine d'États Membres appliquent des dispositions réglementaires à diverses installations expérimentales de fusion. En général, seules de petites quantités de matières radioactives sont utilisées dans ces dernières, à des fins de démonstration de la viabilité des concepts proposés. Les États Membres appliquent et, au besoin, adaptent les prescriptions en matière d'autorisation et de surveillance tirées de cadres établis pour la radioprotection et les installations nucléaires aux premières activités de R&D qui visent, à terme, la commercialisation d'installations de fusion. Cette solution ne peut être utilisée qu'à court terme, et des changements seront nécessaires à l'avenir.

101. De nombreux pays ont convenu qu'ils allaient devoir actualiser les cadres nationaux ou en créer de nouveaux pour tenir compte de la complexité accrue des installations de fusion commerciales. Citons, par exemple, l'utilisation ou la constitution de plus larges stocks de matières radioactives, ou encore les conditions de fonctionnement extrêmes (températures élevées, conditions de vide, et technologies de refroidissement par métal liquide), qui exigent de mettre au point de nouveaux matériaux. À cela s'ajoute le fait que la fusion ne présente pas les mêmes niveaux de dangers et de risques associés que les processus de fission, et qu'elle pourrait donc nécessiter un cadre réglementaire spécifique. Les attentes en matière de contrôle des risques et l'approche de l'organisme de réglementation peuvent en outre différer.

102. L'expérience acquise depuis 70 ans dans le domaine des réacteurs à fission nucléaire pourrait contribuer à la mise au point d'une technologie de fusion à des fins de production d'énergie grâce à la création de synergies entre la fission et la fusion nucléaires.

103. L'élaboration à l'échelle nationale d'un cadre juridique, institutionnel et réglementaire approprié pour la fusion est intrinsèquement liée au développement de ce nouveau type de technologie et aux usages commerciaux qui en seront faits. Il va sans dire qu'un travail d'harmonisation entre les États dans ce domaine faciliterait et accélérerait l'essor, à l'échelle mondiale, d'une industrie de la fusion.

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

E.1. Réacteurs de recherche

Situation

104. À la fin de 2022, 233 réacteurs de recherche, y compris ceux mis temporairement à l'arrêt, étaient en service dans 53 pays. Ils ont continué à fournir des faisceaux de neutrons et des services d'irradiation indispensables dans les domaines de la science, de la médecine et de l'industrie, et à contribuer à la formation théorique et pratique.

Le tableau D-1 figurant en annexe en présente les applications les plus courantes.



233 réacteurs de recherche
opérationnels dans
53 pays
fin 2022

105. Onze nouveaux réacteurs de recherche, dont un assemblage sous-critique et un système

hybride, sont en construction dans les dix pays suivants : Arabie saoudite, Argentine, Bolivie (État plurinational de), Brésil, Chine, Fédération de Russie, France, République de Corée, République tchèque et Ukraine. Quatorze États Membres planifient officiellement la construction de nouveaux réacteurs de recherche, à savoir : 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 de construire des réacteurs de recherche, à savoir l'Azerbaïdjan, l'Éthiopie, le Ghana, l'Inde, l'Iraq, le Kenya, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Niger, les Philippines, la République-Unie de Tanzanie, le Rwanda, le Sénégal, le Soudan et la Tunisie.



106. Les initiatives internationales visant à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur civil se sont poursuivies. Le réacteur IVG.1M du Kazakhstan a été transformé pour pouvoir utiliser de l'uranium faiblement enrichi (UFE) en 2022. À ce jour, 108 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. D'ici avril 2023, tous les grands producteurs mondiaux de molybdène 99, le radio-isotope médical le plus demandé, utiliseront des méthodes de production qui ne nécessitent pas d'UHE. Au total, 6 885 kilogrammes d'UHE ont été rapatriés dans leur pays d'origine ou évacués d'une autre manière de 48 pays [et de Taiwan (Chine)].

Tendances

107. La part des réacteurs de recherche en service depuis au moins 40 ans avoisine les 70 %. De nombreux organismes exploitants ont mis en place des stratégies préventives et des programmes systématiques de gestion du vieillissement, de remise à neuf et de modernisation pour permettre une exploitation sûre et continue pendant 60 ans et au-delà, ou sont en train de le faire. Certains organismes exploitant des réacteurs de recherche très sollicités envisagent de prolonger la durée de vie utile de ceux-ci jusqu'à 80, voire 100 ans (figure E.1). L'examen des structures, systèmes et composants du point de vue de leur impact sur la sûreté et la fiabilité de l'exploitation, l'identification et la compréhension des mécanismes de dégradation, la détection, la surveillance et l'atténuation des effets du vieillissement deviennent des éléments communément acceptés de ces programmes.

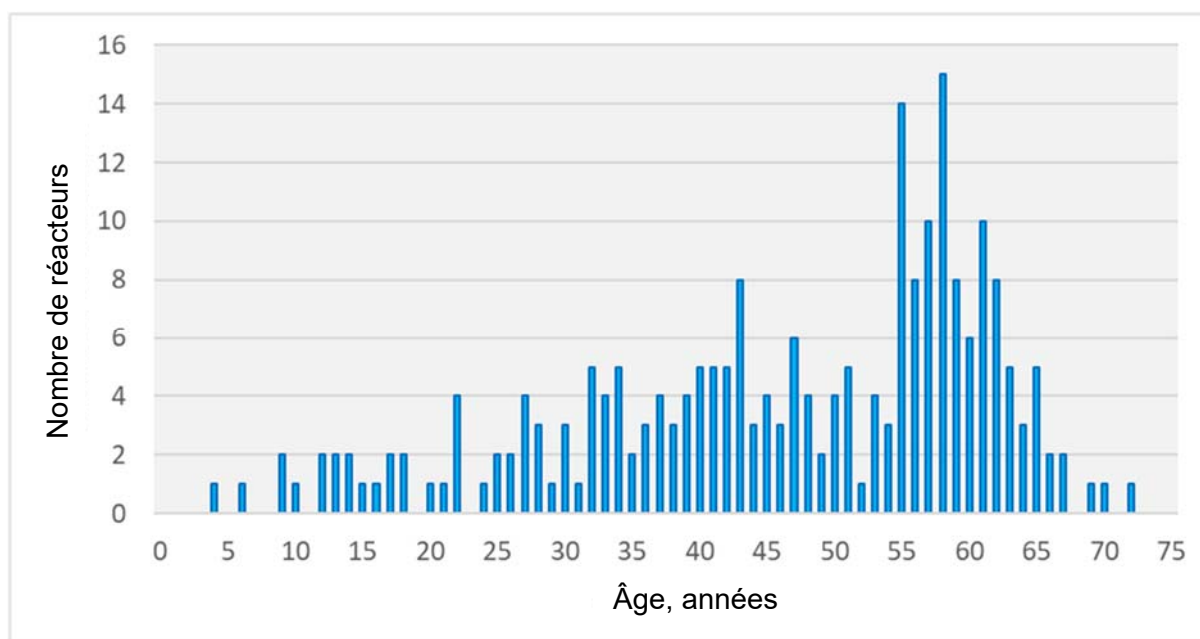


FIG. E.1. Répartition par âge des réacteurs de recherche en service, novembre 2022.
(Source : Base de données de l'AIEA sur les réacteurs de recherche)

108. De nombreux pays profitent des possibilités d'accès aux réacteurs de recherche grâce à des initiatives de collaboration internationales et régionales, comme les centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche et les réacteurs-laboratoires par Internet.

109. Après une réduction de l'activité due à la pandémie de COVID-19, les États Membres redoublent d'efforts pour accroître l'utilisation de leurs réacteurs de recherche en service. Si le retour aux niveaux de production de radio-isotopes d'avant la pandémie a entraîné une normalisation de la demande et le rétablissement des chaînes logistiques et d'approvisionnement essentielles, l'essor d'autres applications rend nécessaire un examen attentif du potentiel de croissance et des contraintes susceptibles de le limiter. Ainsi, l'évolution actuelle de la neutronographie dans les réacteurs de recherche et les générateurs de neutrons de puissance nulle ou faible a ouvert de nouvelles perspectives de développement de l'application de cette technique, notamment dans les travaux de R-D, les études relatives au patrimoine culturel et l'industrie, où elle est déjà présente. Des systèmes peu coûteux et de bonne qualité mis au point à la source expérimentale de neutrons Heinz Maier-Leibnitz en Allemagne sont désormais utilisés dans d'autres installations. Des images tomographiques tridimensionnelles ont été obtenues grâce au système d'imagerie neutronique installé récemment sur le site du réacteur VR-1 de l'Université technique tchèque de Prague (figure E.2). Le réacteur fonctionne à 500 watts, puissance inférieure à ce qui était auparavant considéré comme possible pour la tomographie neutronique. Un système similaire a été mis en place sur le site du réacteur de recherche RECH-1 au Chili, tandis qu'un autre a été testé avec succès à la nouvelle installation de neutronique de l'Agence à Seibersdorf, qui repose sur des générateurs de neutrons compacts deutérium-deutérium et deutérium-tritium.

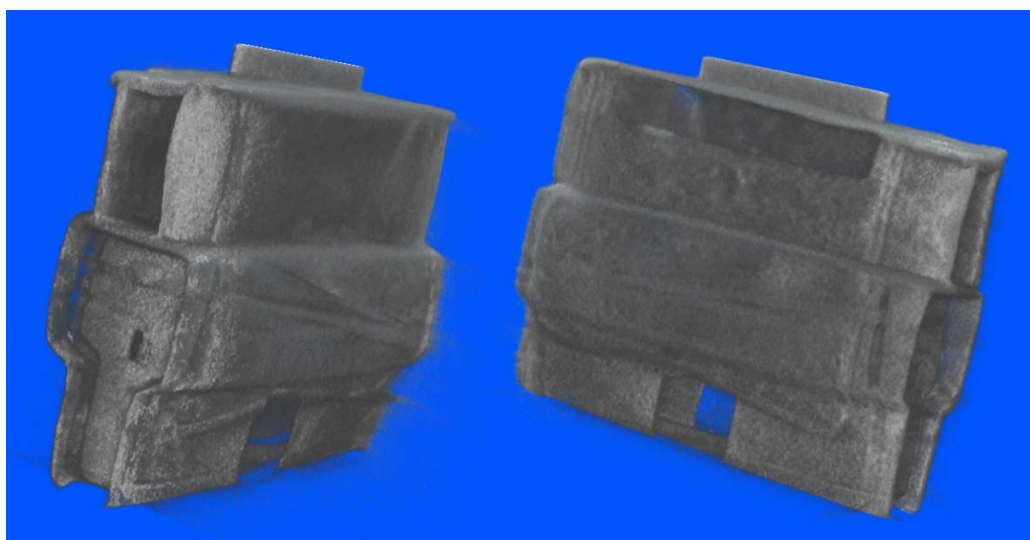


FIG. E.2. Deux coupes transversales d'une tomographie d'une ancienne serrure tibétaine prise au réacteur VR-1 de 500 watts de l'Université technique tchèque de Prague.

*[Image : Université technique tchèque de Prague (République tchèque) ;
Centre Heinz Maier-Leibnitz, Université technique de Munich (Allemagne)]*

E.2. Accélérateurs de particules

Situation

110. La thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT), nouveau traitement anticancéreux, combine l'utilisation d'un produit pharmaceutique à base de bore qui cible les tumeurs et d'un faisceau de neutrons externe. L'intérêt pour cette technique n'a cessé de croître à l'échelle mondiale, notamment après l'approbation au Japon de la BNCT dans des installations utilisant un accélérateur pour le traitement clinique habituel de tumeurs cancéreuses de la tête et du cou récurrentes et non résécables (figure E.3). D'autres pays disposent d'installations qui en sont maintenant à un niveau avancé et qui permettront un traitement clinique de routine, comme à Helsinki (Finlande) et à Xiamen (Chine), et de nouveaux projets s'appuyant sur des accélérateurs ont été annoncés en 2022, notamment une deuxième installation en Chine, dans la province de Hainan, et une installation à Bruxelles (Belgique). Il y a maintenant plus de 20 installations de BNCT faisant appel à un accélérateur dans 11 États Membres qui se trouvent à différents stades, depuis la planification jusqu'à l'utilisation régulière, et plusieurs sociétés proposent des solutions commerciales pour l'accélérateur, les cibles de production de neutrons et les composants des modérateurs, les systèmes de planification du traitement et de positionnement des patients, ainsi que pour les produits pharmaceutiques. Dans le domaine de l'information du public et du renforcement des capacités, l'association International Society for Neutron Capture Therapy est très active : elle publie régulièrement des communications et organise une conférence annuelle et des événements ciblant la prochaine génération de spécialistes de la BNCT.



*FIG. E.3. Étudiant jouant le rôle d'un patient que l'on positionne en vue d'un traitement par BNCT lors d'une formation organisée récemment au Centre médical BNCT de Kansai (Japon).
(Photo : Centre médical BNCT de Kansai)*

Tendances

111. L'une des principales utilisations industrielles des accélérateurs d'électrons à faible énergie est la stérilisation des produits médicaux, notamment les dispositifs médicaux à usage unique. Par le passé, la radiostérilisation s'effectuait essentiellement au moyen de sources gamma, comme le cobalt 60. Cependant, la chaîne d'approvisionnement étant limitée et des problèmes de sûreté et de sécurité étant associés à l'utilisation et à la gestion du cobalt 60, de nombreux utilisateurs s'efforcent de trouver des solutions alternatives s'appuyant sur des accélérateurs. La stérilisation directe par faisceau d'électrons est utilisée depuis de nombreuses années pour traiter efficacement les produits de faible densité. En outre, en équipant des accélérateurs d'électrons d'un convertisseur d'électrons en rayons X, il est possible de générer un flux de rayons X d'une intensité suffisante pour d'autres utilisations industrielles. Bien que cette solution soit relativement énergivore, elle combine les avantages des accélérateurs (débit de dose élevé et, par conséquent, capacité de production élevée) et des sources gamma (taux de pénétration en profondeur du produit important).

112. La mise au point d'accélérateurs d'électrons plus puissants et plus fiables reste l'objectif principal des utilisateurs et plusieurs fournisseurs de technologie dans le monde travaillent activement dans ce domaine. Les appareils existants sont très recherchés et les producteurs d'accélérateurs travaillent à plein régime pour satisfaire une demande croissante. Aujourd'hui, de nombreuses entreprises proposent une solution complète (accélérateur d'électrons, cible de conversion en rayons X, structures de blindage, convoyeur, systèmes de contrôle des processus, etc.), qui peut souvent être adaptée aux besoins du client,

par exemple pour optimiser le débit ou traiter des produits délicats, ou pour offrir une plus grande polyvalence. Toutes ces initiatives en cours modifient progressivement la situation dans le domaine des techniques d'irradiation, avec pour conséquence une augmentation de la part des produits issus des accélérateurs et des services rendus par ces derniers.

E.3. Instrumentation nucléaire

Situation

113. L'IA et les technologies dérivées continuent d'être utilisées pour des applications d'instrumentation nucléaire toujours plus nombreuses et variées. Récemment, elles ont été introduites dans le domaine de la détection de rayonnements en champ mixte afin de distinguer les impulsions produites par différentes particules. Un bon exemple de cette application en est la possibilité de discriminer les signaux de photons de ceux de neutrons dans les scintillateurs plastiques. Des algorithmes de classification permettent de discriminer les impulsions après leur traitement.

114. Les sciences de la vie bénéficient elles aussi déjà des applications de l'IA. Décoder les structures de repliement des protéines à l'aide de la radiocristallographie ou de la cristallographie neutronique en 3D est un problème auquel les scientifiques se heurtent depuis longtemps. Outre que l'instrumentation nécessaire à la détection avancée devient disponible, les spécialistes de l'IA, y compris des fournisseurs privés, concentrent leurs efforts sur des algorithmes d'apprentissage profond capables de prédire les structures des protéines. Récemment, les progrès des logiciels d'apprentissage profond, combinés aux outils librement accessibles, ont profondément modifié notre compréhension du repliement des protéines dans le protéome humain jusqu'au niveau de l'atome, et cette évolution devrait conduire à des découvertes révolutionnaires dans les années à venir.

Tendances

115. Les applications à large échelle qui font appel à l'IA sont en train de révolutionner le domaine de la physique des hautes énergies. Des opérations de mise à niveau des accélérateurs de hadrons sont en cours, qui permettent d'atteindre des luminosités plus élevées et, ce faisant, d'augmenter également le nombre de particules produites lors de chaque collision. Cela suppose que les détecteurs de traces puissent enregistrer les traces des particules à des taux de comptage plus élevés, avec potentiellement un bruit de fond lui aussi plus important, afin de pouvoir explorer des axes de découverte rares. Les différents algorithmes de reconstruction doivent faire face à une charge plus importante de résultats de détection, de grappes et de traces. Les spécialistes de la physique des particules ont commencé à utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique pour optimiser et accélérer la reconstruction de traces, ainsi que pour réduire au minimum le bruit de fond dû à une mauvaise identification des traces. Ces spécialistes organisent également des concours ouverts où les participants sont invités à présenter leurs algorithmes pour traiter le régime de haute luminosité du grand collisionneur de hadrons. Il est d'autant plus important d'optimiser cet aspect que les détecteurs entrent dans l'ère du mode de lecture sans déclenchement. Comme par le passé, beaucoup de ces innovations dans le domaine de la physique des particules sont également très susceptibles de trouver des applications dans l'instrumentation nucléaire de pointe.

116. La tendance du recours aux drones aux fins de la détection et de la surveillance radiologiques est actuellement favorisée par de nouveaux paramètres qui augmentent la charge utile de ces appareils, les rendent plus sûrs, en allongent la durée de vol, en accroissent la résistance et améliorent la précision de leur guidage. De nouveaux drones utilisés dans les domaines de la détection des rayonnements et de la spectrométrie gamma sont maintenant disponibles sur le marché et offrent une solution globale pour la cartographie radiologique. Des conteneurs robotisés sont en cours de mise au point aux fins d'un fonctionnement autonome des drones, et lors de missions à distance il est notamment possible de

procéder au décollage et à l'atterrissage des appareils, d'en recharger ou d'en remplacer les batteries, de les protéger des intempéries sans intervention humaine. Grâce à la précision toujours plus grande des systèmes mondiaux de navigation par satellite, les études ont commencé à se concentrer davantage sur le balayage précis d'objets plus petits tels que les quais de chargement des ports, les conteneurs ou les bâtiments.

117. L'utilisation de détecteurs de rayonnements faisant appel à des photomultiplicateurs en silicium a permis d'améliorer les performances et la compacité. L'électronique intégrée pour la compensation thermique et l'électronique de lecture jouent un rôle important dans la mise en œuvre de la technologie des drones. Des détecteurs comme les scintillateurs plastiques, les détecteurs GAGG, ainsi que des appareils de détection gamma et neutronique faisant appel aux technologies ZnS(Ag)/6LiF ou CLYC et CLLB font leur apparition dans les systèmes reposant sur des drones.

118. Le recours aux scintillateurs plastiques apparaît comme une nouvelle tendance. Le plastique est prometteur en raison de son faible poids spécifique (densité d'environ 1g/cm^3), des formes variées qu'il peut prendre et de sa haute sensibilité de détection. Les algorithmes de traitement de spectres existants permettent aux détecteurs plastiques de faire la distinction entre les isotopes artificiels et les isotopes des matières radioactives naturelles, ou d'identifier les principaux radionucléides, notamment industriels.

119. De nouvelles méthodes de traitement en temps réel et de traitement différé des données sont également appliquées afin d'optimiser le temps nécessaire aux drones pour accomplir leurs missions de détection des rayonnements. Par exemple, il est possible de coupler un capteur de rayonnement avec un système de détection et de télémétrie par la lumière (LIDAR), ce qui permet d'obtenir une imagerie gamma 3D haute résolution en temps réel ou une double cartographie des rayons gamma et des neutrons avec une discrimination neutron-gamma. L'utilisation d'une caméra haute résolution pour la photogrammétrie 3D ou la détection et la télémétrie par la lumière permet d'appliquer des techniques de reconstruction algébrique pour corriger les distances de toutes les surfaces contributives et d'obtenir une image du détecteur en 3D, comme le montre la figure E.4.

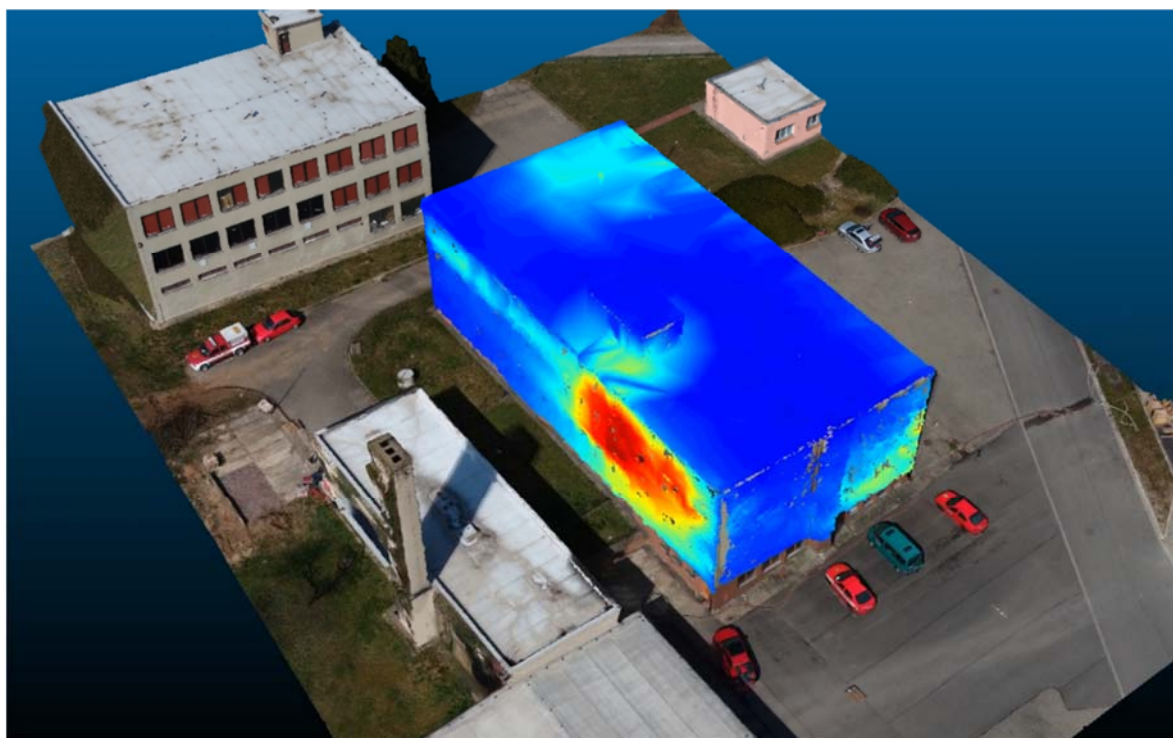


FIG. E.4. Exemple du profil radiologique en 3D d'un bâtiment contenant des sources et des matières radioactives obtenu par drone. (Illustration : AIEA)

F. Alimentation et agriculture

F.1. Intervention rapide en cas de crise de sécurité sanitaire des aliments

Situation

120. Les événements survenus récemment, tels que la pandémie de COVID-19, les conflits et les catastrophes naturelles liées au climat ont mis en évidence la vulnérabilité de l'approvisionnement alimentaire mondial face aux perturbations, ainsi que la nécessité de renforcer la résilience à la faveur d'une restructuration des systèmes de contrôle des aliments et d'une amélioration de l'appui technique. Les crises et urgences, comme les événements climatiques extrêmes, les catastrophes naturelles, les épidémies et les pandémies, perturbent les systèmes de contrôle de la sécurité sanitaire des aliments, compromettent cette dernière et la sécurité alimentaire et multiplient les risques d'adultération des aliments et de criminalité dans la chaîne alimentaire. Le renforcement des capacités de préparation et d'intervention rapide des États Membres est essentiel pour les surmonter.

121. Les systèmes de contrôle des aliments s'appuient généralement sur des programmes de tests en laboratoire à deux niveaux. Des méthodes de test rationnelles et à haut débit sont utilisées pour l'analyse de produits échantillonnés dans le cadre des plans réglementaires nationaux de surveillance de la sécurité sanitaire des aliments. Tout résultat suggérant une éventuelle contamination supérieure aux marges réglementaires de tolérance est ensuite vérifié à l'aide de techniques plus poussées exigeant plus de temps. Les techniques nucléaires, telles que la spectrométrie de masse à dilution isotopique et les mesures du rapport des isotopes stables, jouent un rôle important dans ces tests. Pour éviter que des aliments contaminés ne restent dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire, les tests d'analyse sont paramétrés de manière à éviter au maximum les faux négatifs (soit les cas où les aliments contaminés ne sont pas détectés). Toutefois, en raison de la performance des méthodes d'analyse et de l'incertitude de mesure, on peut parfois obtenir de faux positifs (et donc considérer comme contaminés des aliments qui ne le sont pas), ce qui porte préjudice aux producteurs et à l'industrie alimentaire. Le test de confirmation utilisé à la deuxième étape permet d'obtenir des résultats de contamination plus fiables et ne produit que très peu de faux positifs. Ce type de système de contrôle des aliments protège à la fois les consommateurs et les producteurs et contribue à faciliter le commerce.

122. L'évolution des conditions environnementales entraîne une modification des niveaux naturels de toxines dans la production végétale, l'élevage de bétail et la pêche. Par exemple, les nouvelles conditions climatiques favorisent la croissance de champignons producteurs de mycotoxines dans des régions où ceux-ci n'étaient pas présents auparavant et où les producteurs n'avaient pas besoin de se soucier d'une telle menace. La hausse des températures, combinée à l'eutrophisation, augmentera probablement la fréquence et la durée des efflorescences de cyanobactéries dans de nombreux écosystèmes aquatiques et la bioaccumulation du méthylmercure dans les espèces de poissons commerciales, induisant des risques supplémentaires pour la sécurité sanitaire des aliments (figure F.1).

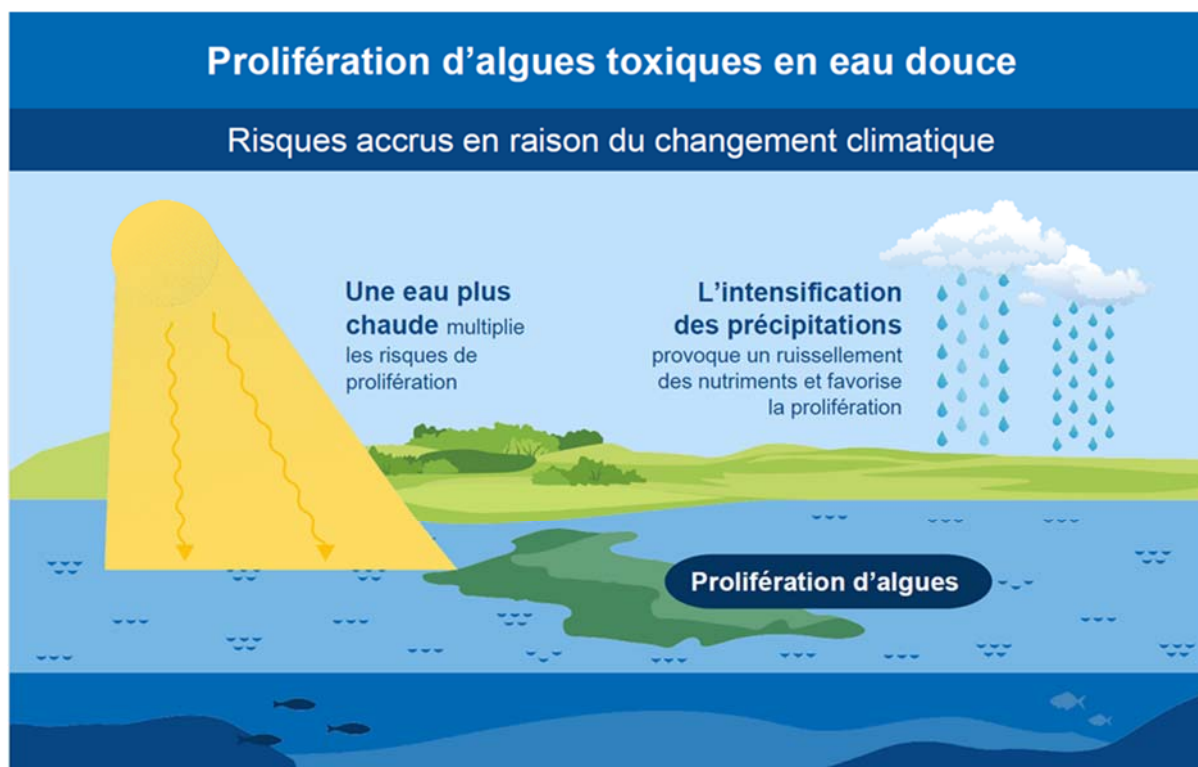


FIG. F.1. Le changement climatique augmente le risque de présence de toxines dans les produits de la mer lié à la contamination par les efflorescences de cyanobactéries (prolifération d'algues toxiques).

(Illustration : IAEA, d'après www.climatecentral.org/climate-matters/harmful-algal-blooms)

123. Le changement climatique a également une incidence sur la prévalence et la répartition des organismes nuisibles et des vecteurs de maladies et exige donc de modifier l'utilisation des pesticides et des médicaments vétérinaires, dont les résidus, s'ils restent dans les aliments, peuvent faire courir des risques supplémentaires. Un lien a en outre été établi entre l'utilisation d'antimicrobiens chez les animaux d'élevage et la résistance à ces substances – laquelle peut conduire au développement de bactéries résistantes, qui peuvent ensuite être transmises par des aliments contaminés.

124. Chacun de ces facteurs, qu'il soit pris individuellement ou en combinaison, peut être lourd de conséquences pour les différentes composantes de l'approche « Une seule santé », notamment en ce qui concerne la sûreté et l'intégrité de l'approvisionnement en denrées alimentaires et en aliments pour animaux. En outre, les effets sont accentués lorsque les systèmes de contrôle normaux sont perturbés. Les répercussions qu'a eu la pandémie de COVID-19, alors même que cette maladie n'était pas d'origine alimentaire, en sont la preuve.

Tendances

125. En cas d'urgence, lorsque les chaînes d'approvisionnement sont perturbées et que les laboratoires et systèmes de contrôle des aliments sont indisponibles ou peu efficaces, la priorité absolue est de s'assurer que l'approvisionnement alimentaire reste sûr. Protéger la santé des consommateurs et empêcher que les services de santé ne soient confrontés à de nouveaux problèmes de sécurité sanitaire des aliments permet d'éviter toute aggravation de la situation. C'est la raison pour laquelle, dans les situations de crise, l'accent doit être mis sur des méthodes d'analyse rapides et facilement applicables, afin de maintenir les normes de sécurité sanitaire des aliments et de déterminer ou de confirmer l'origine des aliments contaminés. On peut ensuite concentrer les ressources disponibles sur des techniques de pointe qui fournissent des informations essentielles pour la maîtrise et la gestion des crises.

126. Les tests alimentaires rapides reposent sur diverses techniques nucléaires et isotopiques, ainsi que sur des mesures de la composition isotopique, qui peuvent être utilisées isolément ou en complément d'autres techniques. Les techniques nucléaires d'analyse s'appuient sur des paramètres fiables, tels que la masse, le spin, le moment magnétique, les niveaux d'énergie du noyau d'un atome et des électrons des couches internes, ainsi que sur les mesures isotopiques de la composition élémentaire.

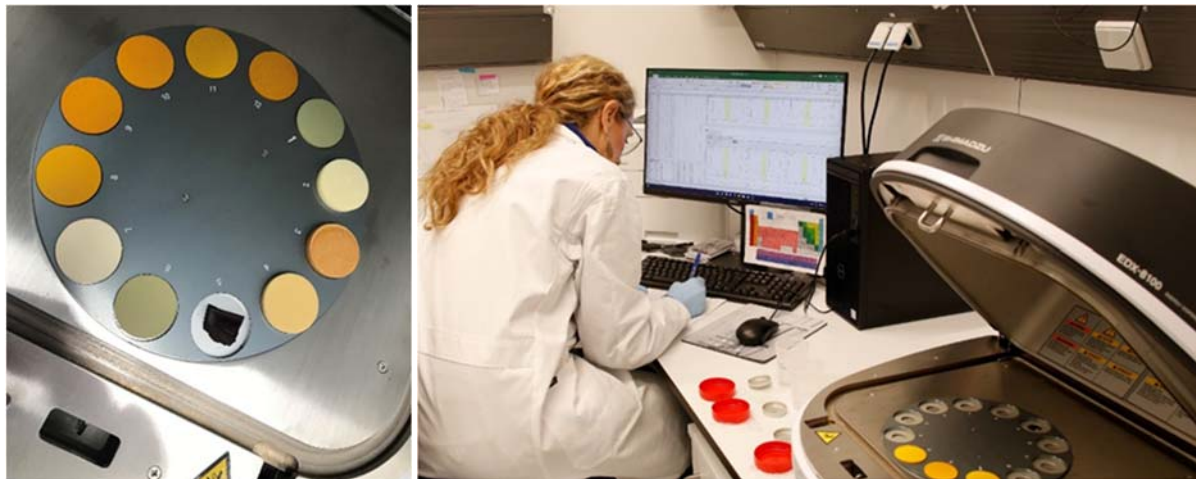


FIG. F.2. Analyse d'échantillons de curcuma à l'aide d'un dispositif fixe de fluorescence X à dispersion d'énergie pour la détection d'éléments toxiques au Laboratoire du contrôle et de la sécurité sanitaire des aliments du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, à Seibersdorf (Autriche). (Photo : AIEA)

127. Les progrès récemment survenus dans les domaines des semi-conducteurs, de la photonique et d'autres technologies ont permis de miniaturiser les instruments d'analyse, ce qui a ouvert la voie à toute une gamme d'appareils fixes, de poche et portatifs, utilisables en laboratoire mais également à diverses étapes des chaînes de production et d'approvisionnement alimentaire. Ces instruments aident à intervenir rapidement en cas de crise en communiquant des informations pour étayer la prise de décisions.

128. Cette tendance s'est notamment traduite par la mise au point d'applications de fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF) pour l'analyse rapide des aliments, qui servent à vérifier que les valeurs des nutriments essentiels et métaux toxiques (tels que le plomb, le cadmium et l'arsenic) respectent les niveaux réglementaires fixés par l'Organisation mondiale de la Santé². Les appareils sont disponibles en format de poche et fixe (figure F.2) et peuvent être utilisés sur le terrain ou sur site par des utilisateurs non spécialisés. Ils n'exigent qu'une préparation élémentaire des échantillons et n'utilisent pas de réactifs nocifs pour l'environnement. Utilisées en parallèle d'outils chimométriques, les données de prédiction obtenues par EDXRF peuvent également servir à résoudre les problèmes de fraude alimentaire.

129. Autre exemple pour illustrer cette tendance : celui de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de mobilité ionique (GC-IMS), technique qui utilise une source de rayonnements de faible énergie fondée sur l'hydrure de tritium. Dans l'espace de tête (figure F.3), cette technique peut être utilisée pour détecter les traces de composés organiques volatils microbiens, qui indiquent la présence d'un champignon, ce qui permet de donner rapidement l'alerte à propos d'une éventuelle

² Byers, H.L., McHenry, L.J., Grundl, T.J., XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits, Food Chemistry: X 1, Vol. 1 (2019).

production de mycotoxines dans les aliments et d'appliquer les mesures de contrôle³. La GC-IMS permet de détecter de nombreux autres contaminants et traces de substances dangereuses, notamment le méthanol, produit chimique que l'on peut trouver dans les boissons alcoolisées frelatées et qui contient des métabolites qui se révèlent toxiques lorsqu'ils sont ingérés, et l'oxyde d'éthylène, pesticide toxique qui a entraîné de nombreux rappels de produits alimentaires contaminés en Europe depuis 2020.



FIG. F.3. Analyse menée par GC-IMS dans l'espace de tête pour détecter les traces caractéristiques de contaminants alimentaires au Laboratoire du contrôle et de la sécurité sanitaire des aliments du Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, à Seibersdorf (Autriche). (Photo : AIEA)

130. Associés à des technologies spectroscopiques portables, telles que la spectroscopie Raman exaltée de surface et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, ces dispositifs et autres technologies nucléaires d'analyse rapide, comme les dispositifs fixes de spectroscopie par résonance magnétique nucléaire et d'analyse des isotopes stables par spectroscopie à cavité optique, constituent un ensemble d'instruments d'analyse efficaces. Les applications de ces outils à l'analyse des aliments sur le terrain, qui permettront d'intervenir plus efficacement en cas d'urgence ou de crise perturbant l'approvisionnement alimentaire, se développent rapidement.

³ Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., Li, H., Determination of volatile organic compounds by HS-GC-IMS to detect different stages of *Aspergillus flavus* infection in Xiang Ling walnut, Food Science & Nutrition, Vol. 9, Issue 5 (2021).

F.2. Progrès dans l'irradiation des aliments : utilisation accrue des irradiateurs à sources et nouvelle technologie faisant appel aux rayonnements de faible intensité

Situation

131. L'irradiation des aliments permet d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments, de maintenir leur qualité et d'en prolonger la durée de conservation sans utiliser de produits chimiques. Qu'il s'agisse de photons gamma, de faisceaux d'électrons ou de rayons X, les rayonnements ionisants sont sans danger pour les aliments, mais impitoyables pour les microbes et les parasites. Comme l'irradiation n'augmente pas sensiblement la température des aliments, l'utilisation contrôlée des rayonnements ne compromet pas la qualité nutritionnelle de ces derniers ni n'en altère le goût, la texture ou l'apparence de manière notable. Dans une procédure d'irradiation classique, les faisceaux sont énergétiques et pénétrants, ce qui signifie que même les aliments préemballés peuvent être irradiés. L'emballage protège également les aliments du risque de contamination externe après le traitement.

132. Environ 70 pays autorisent l'irradiation d'au moins un type de denrée alimentaire, et plus de 160 installations d'irradiation traitent régulièrement des denrées alimentaires dans 50 pays (figure F.4). Dans le modèle commercial actuel, les centres d'irradiation commerciaux fonctionnent comme des prestataires de services polyvalents : ils délivrent systématiquement la dose de rayonnements ionisants certifiée, dans une fourchette de doses prédéfinie, pour une certaine gamme de produits en vue de répondre aux besoins de clients dans des secteurs tels que la médecine, la pharmaceutique et l'alimentation.

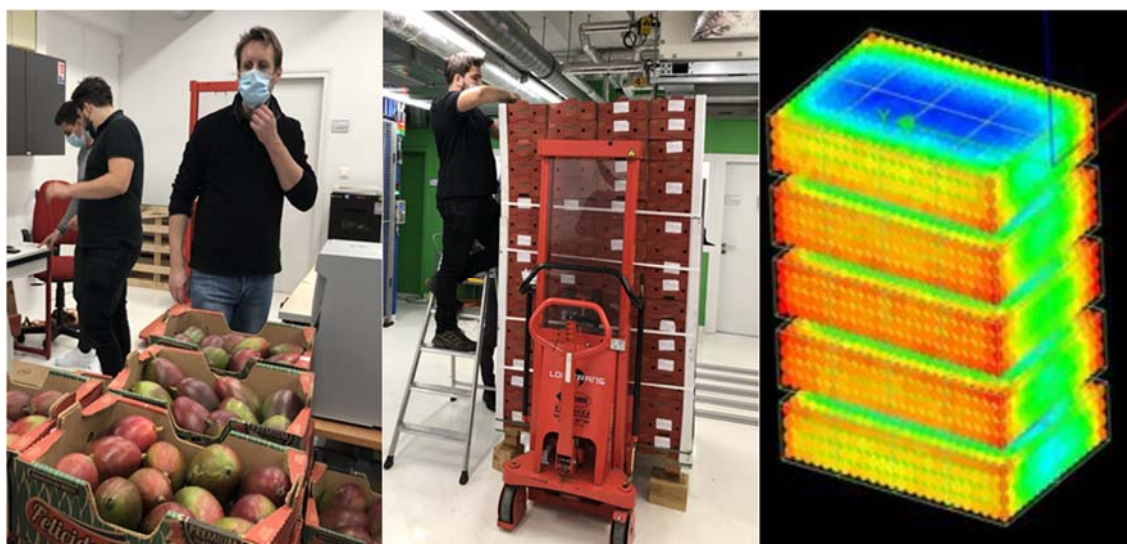


FIG. F.4. Experts d'une installation d'irradiation des aliments en France effectuant des tests pour vérifier que l'irradiation aux rayons X de mangues en palettes permet d'atteindre la dose minimale requise pour un traitement phytosanitaire satisfaisant (à gauche et au centre). La carte de dose donne un aperçu des variations de la dose absorbée (à droite). (Photos : Aerial, France)

133. Actuellement, presque tous les produits alimentaires irradiés sont traités dans des installations spécialisées qui utilisent les rayons gamma du cobalt 60, isotope radioactif qui émet des photons de haute énergie – de 1,17 et 1,33 mégaélectronvolts (MeV). Environ 90 % des installations commerciales d'irradiation des aliments utilisent des rayons gamma. D'autres recourent à des irradiateurs à sources, qui émettent des faisceaux d'électrons de haute énergie générés électriquement (jusqu'à 10 MeV) ou des rayons X (généralement jusqu'à 5 MeV, bien que certains pays autorisent jusqu'à 7,5 MeV). Environ 5 % des fournisseurs de services d'irradiation des aliments ont investi dans des irradiateurs à faisceaux d'électrons ou à rayons X, en plus de leurs appareils d'irradiation au cobalt 60. Il est de plus en plus important de diversifier les technologies, car la demande de sources au cobalt ne cesse de croître et la production de cobalt 60 exige plusieurs années. Face au prix croissant du radionucléide cobalt 60, la solution de substitution que constitue l'irradiation par faisceau d'électrons, voire par rayons X, devient avantageuse, et les irradiateurs émettant des rayonnements de faible intensité suscitent de plus en plus d'intérêt (figure F.5).

134. L'irradiation d'aliments séchés, comme les épices, illustre bien l'utilité de cette technique, car de nombreux microbes (y compris des micro-organismes pathogènes d'origine alimentaire, comme les salmonelles, *Bacillus cereus* et *Clostridium perfringens* peuvent survivre à l'état déshydraté⁴. Même si les niveaux de contamination sont faibles, en ajoutant des épices séchées aux aliments on offre à ces micro-organismes de l'eau et un environnement riche dans lequel ils peuvent se multiplier et se propager rapidement. Les traitements de réduction de la charge microbienne sont donc nécessaires pour limiter autant que possible les risques de maladie chez les consommateurs et les pertes commerciales dues à l'altération des aliments. Bien qu'efficaces, les traitements thermiques éliminent les composants volatils qui donnent aux épices leur saveur unique, leur couleur vive et leur arôme, ainsi que leurs vertus. En revanche, les rayonnements ionisants détruisent les microbes susmentionnés mais n'ont que peu d'effet sur les composants des épices responsables du goût, de la qualité et des bienfaits. Ils peuvent également ralentir la maturation, empêchant des aliments comme l'ail, le gingembre, les oignons ou les pommes de terre de germer.

135. Comme ils empêchent les organismes nuisibles de se développer et de se reproduire, les rayonnements ionisants sont également utilisés comme traitement phytosanitaire pour permettre le commerce au-delà des limites de la quarantaine. On peut par exemple s'en servir pour veiller à ce que des parasites significatifs d'un point de vue économique, tels que les mouches des fruits et les charançons, ne puissent pas se propager et s'établir sur de nouveaux territoires au fil du commerce des fruits et légumes frais.

⁴ *Microbiological hazards in spices and dried aromatic herbs: Meeting report* (Microbiological Risk Assessment Series No. 27, FAO/WHO, Rome, 2022).



FIG. F.5. Matériel de traitement des aliments émettant des électrons de faible énergie. La technologie Laatu utilise deux lampes à électrons de faible énergie (poignées rouges au centre de l'image) pour traiter les ingrédients séchés en les faisant tomber dans un flux d'électrons. Capable de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 80 % par rapport à la stérilisation à la vapeur, elle propose une solution rentable de réduction de la charge microbienne. (Photo : Bühler)

136. L'Agence et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aident les États Membres (figure F.6) à mettre en place et à développer leurs services d'irradiation des aliments, pour ainsi réduire les pertes et le gaspillage alimentaires et faciliter le commerce des épices séchées et des fruits et produits de la mer frais et congelés. Ainsi, le Viet Nam, qui a récemment protégé ses exportations de mangues, de pitayas et de litchis frais vers les États-Unis d'Amérique, d'une valeur annuelle de 20 millions de dollars des États-Unis, se met maintenant à développer ses relations commerciales avec l'Australie.

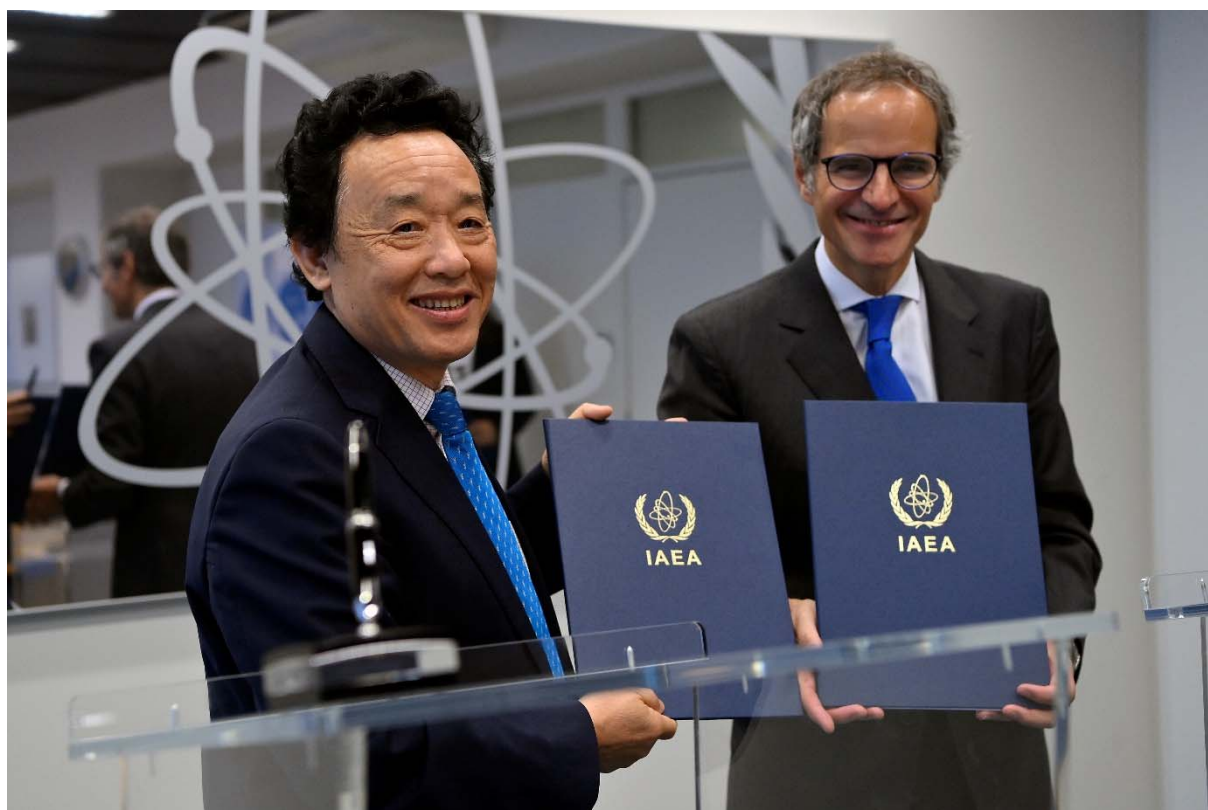


FIG. F.6. Le 31 octobre 2022, le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et le Directeur général de la FAO, Qu Dongyu, ont signé, au Siège de l'Agence à Vienne (Autriche), un mémorandum d'accord sur le renforcement de la coopération entre la FAO et l'AIEA aux fins de l'application pacifique de la technologie nucléaire dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture. (Photo : AIEA)

Tendances

137. L'usage d'irradiateurs à sources se répand. Leur « montée en puissance » tient autant à leurs avantages économiques qu'à leurs avantages pratiques. Contrairement aux irradiateurs gamma, ils peuvent être allumés et éteints et donc émettre des faisceaux de rayonnements à la demande. Ils permettent ainsi d'éviter les problèmes d'approvisionnement, de sûreté et de sécurité (transport, entreposage et stockage définitif) associés aux radio-isotopes. Bien que l'irradiation gamma soit une technologie simple, fiable et éprouvée qui restera disponible pendant de nombreuses années encore, d'autres technologies aident à compléter la panoplie des moyens disponibles et permettent une utilisation plus large de l'irradiation des aliments.

138. Dans le cadre de recherches coordonnées, l'Agence a aidé les États Membres à mettre en place de nouvelles applications pratiques de l'irradiation des aliments à l'aide d'irradiateurs à sources⁵. Parmi les nouvelles avancées dans le domaine, on peut citer la mise au point d'outils capables de simuler le processus d'irradiation des aliments et de déterminer rapidement les meilleurs paramètres de traitement. Des établissements en Chine et au Viet Nam ont conçu, construit, testé et installé de nouveaux dispositifs pour aider les centres commerciaux d'irradiation par faisceaux d'électrons de haute énergie à modéliser

⁵ *Development of Electron Beam and X Ray Applications for Food Irradiation: Final Report of a Coordinated Research Project (IAEA-TECDOC-2008, Vienna, 2022).*

et à calculer les distributions de doses pour différentes configurations de chargement. Grâce à ces dispositifs, il est possible de déterminer à l'avance les réglages optimaux, ce qui permet ensuite d'accélérer les tests dans les installations et, en fin de compte, de réduire les temps d'arrêt des faisceaux et d'améliorer la productivité. Des experts de l'Université de Tsinghua (Chine) ont poussé le concept plus loin en travaillant à l'élaboration d'un produit commercial avec l'entreprise de technologie NUCTECH⁶. Ces outils, tout comme d'autres qui sont actuellement mis au point ailleurs, visent à faciliter l'application des bonnes pratiques et à améliorer la productivité dans les installations d'irradiation aux rayons gamma et aux rayons X, ainsi que dans les installations à faisceaux d'électrons.

139. Les recherches menées à l'Université A&M Texas (États-Unis), un centre collaborateur de l'Agence, se concentrent sur les méthodes efficaces et rapides d'estimation de la dose de réduction décimale (D10) pour les micro-organismes pathogènes dans plusieurs environnements distincts. D10 est la dose de rayonnement nécessaire à la destruction de 90 % d'une population microbienne viable initiale. En la multipliant, on peut calculer une dose d'irradiation stérilisante efficace. Les travaux financés par l'Agence à l'Université A&M Texas sont la preuve que la recherche appliquée peut s'adapter à l'évolution des besoins – en l'occurrence, celui d'améliorer les techniques qui contribuent à éviter le transfert d'agents pathogènes par les aliments, et donc à prévenir les pandémies d'origine alimentaire.

140. En ce qui concerne l'évolution des technologies d'irradiation, il est à noter que l'accent tend à être mis sur la capacité à modifier et à adapter l'énergie des faisceaux dans les irradiateurs à sources. Par exemple, les faisceaux de faible énergie (électrons de faible énergie ou rayons X mous), dont l'énergie se mesure en kiloélectronvolts (keV), peuvent être utilisés dans des lampes d'irradiation relativement compactes qui peuvent être logées en toute sûreté dans des boîtiers ou d'autres dispositifs. Il est ainsi possible de procéder à l'irradiation des aliments dans les usines, car les appareils peuvent être intégrés aux lignes de production alimentaire. S'ils ne peuvent pas traverser un aliment de bout en bout, les électrons de faible énergie peuvent traiter efficacement ceux qui présentent principalement des micro-organismes à la surface ou juste en dessous, comme des œufs en coquille (figures F.7 et F.8), des morceaux de viande et de volaille crus, ou encore des graines séchées (herbes et épices). Il est aussi possible de recourir aux rayons X mous lorsqu'il s'agit de traiter de petites portions alimentaires.

⁶ Qin H., Yang, G., Kuang, S., Wang, Q., Liu, J., Zhang, X., Li C., Han, Z., Li, Y., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 143 (2018) 8–13.

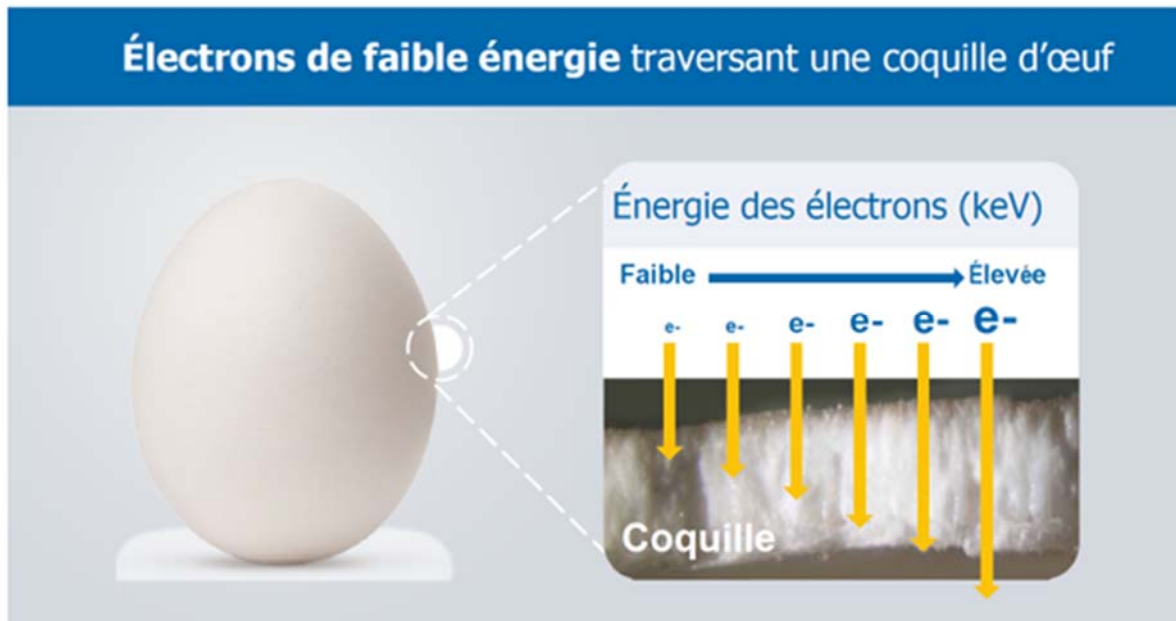


FIG. F.7 Démonstration de l'utilisation d'électrons de faible énergie (e^-) avec différents niveaux d'énergie pour transpercer une coquille d'œuf à différentes profondeurs. Il s'agit de s'assurer que les électrons peuvent détruire les salmonelles qui se trouvent à la surface de la coquille d'œufs entiers frais ou juste en dessous.

(Illustration : AIEA, d'après les travaux de N. Takaoka, Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, Japon)

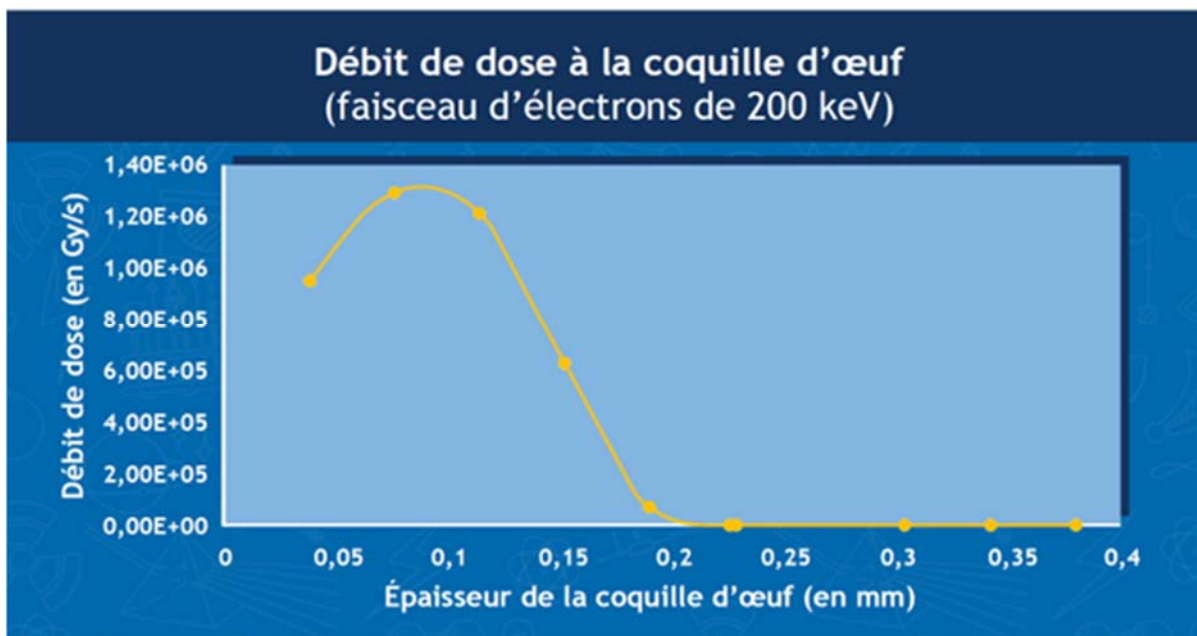


FIG. F.8 Modélisation de simulation pour estimer la portée d'électrons de faible énergie (200 keV) dans les coquilles d'œufs et déterminer s'il est possible de cibler les salmonelles à une profondeur inférieure à 0,2 mm.

(Graphique : AIEA, d'après les travaux de Y. Liu, H. Qin, H. Shi de NUCTECH Ltd. et H. Zhang de l'Université de Tsinghua, Chine)

141. D'après les recherches menées, les électrons de faible énergie peuvent améliorer la qualité de certains aliments et sont un moyen de décontamination microbiologique en surface et près de la surface qui a de l'avenir. Par exemple, la société de génie alimentaire Bühler a mis au point un système de chute libre pour faire passer des ingrédients séchés à travers un faisceau d'électrons de faible énergie (< 300 keV). Cette méthode permet d'assurer le contrôle et le maintien de la contamination microbiologique à des niveaux acceptables^{7,8}. Un irradiateur compact illustre bien l'essor de l'utilisation de rayons X mous pour les petits lots. Généralement employé pour stériliser les instruments médicaux, il a fait l'objet de recherches à l'Institut de technologie avancée des rayonnements de l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique à des fins de traitement des aliments. L'objectif des chercheurs était d'utiliser une technologie à faisceau de faible énergie à laquelle les hôpitaux avaient aisément accès pour fournir aux patients immunodéprimés des aliments respectant des normes d'hygiène particulièrement strictes. Cette technologie à rayons X mous (160 keV) s'est montrée capable de garantir que les légumes frais coupés répondaient à ces normes.

142. Un projet de recherche coordonnée de l'Agence sur l'irradiation des aliments au moyen d'irradiateurs sources innovants dotés de faisceaux de faible énergie, qui est en cours, a pour objectif premier de surmonter les difficultés techniques et d'accroître le potentiel des nouvelles technologies faisant appel aux faisceaux de faible énergie. Les pays participant à des projets de coopération technique dans les régions Afrique et Asie-Pacifique ont déjà exprimé leur intérêt pour l'irradiation par faisceaux de faible énergie et leur désir de voir cette technologie se transformer en une solution commercialement viable dans le monde entier.

G. Technologie des radio-isotopes et des rayonnements

G.1. Évolution des radiopharmaceutiques théranostiques

Situation

143. Les agents théranostiques combinent un radionucléide servant au diagnostic du cancer associé à un autre radionucléide utilisé pour la cancérothérapie. Bien que certains radioisotopes émettent individuellement des éléments adaptés à la théranostique au cours de leur décroissance, il est courant, en général, d'en associer deux (figure G.1).

144. À titre d'exemple, en médecine nucléaire, on peut citer la combinaison d'iode 123 émettant des particules gamma et d'iode 131 émettant des particules bêta qui constituent ainsi un agent théranostique utilisé pour le diagnostic et le traitement des troubles thyroïdiens. Grâce à la disponibilité de paires assorties de radioisotopes qui se prêtent au diagnostic pour les uns et à la thérapie pour les autres (par exemple, le gallium 68 et le lutécium 177), les méthodes théranostiques sont appliquées plus fréquemment depuis dix ans. Comme ils présentent des propriétés chimiques similaires, les radiopharmaceutiques au lutécium et au gallium peuvent avoir une conception identique ou similaire (chélate plus un ligand de ciblage, comme divers peptides, anticorps ou petites molécules organiques). Associé à un vecteur radiomarqué au gallium 68 ciblant une tumeur aux fins de l'établissement d'un diagnostic par tomographie à émission de positons (TEP), un tel produit permet de diagnostiquer des tumeurs et de procéder à leur caractérisation in-vivo, facilitant ainsi le dépistage par TEP,

⁷ Laatu: *Non-thermal, in-plant microbial reduction solution for dry foods* (Bühler, 2019).

⁸ Schottroff, F., Lasarus, T., Stupak, M., Hajslova, J., Fauster, T., Jäger, H., Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Vol. 14 1 (2021) 380–395.

l'établissement pré-thérapeutique de la preuve de l'expression de la cible, la stadification du cancer et la sélection de patients pour une radiothérapie systémique. L'utilisation d'un radiopharmaceutique au lutécium 177 marqué par le même vecteur favorise une prise en charge sélective et personnalisée du cancer d'un patient dans le cadre d'une radiothérapie systémique ciblée au niveau moléculaire.

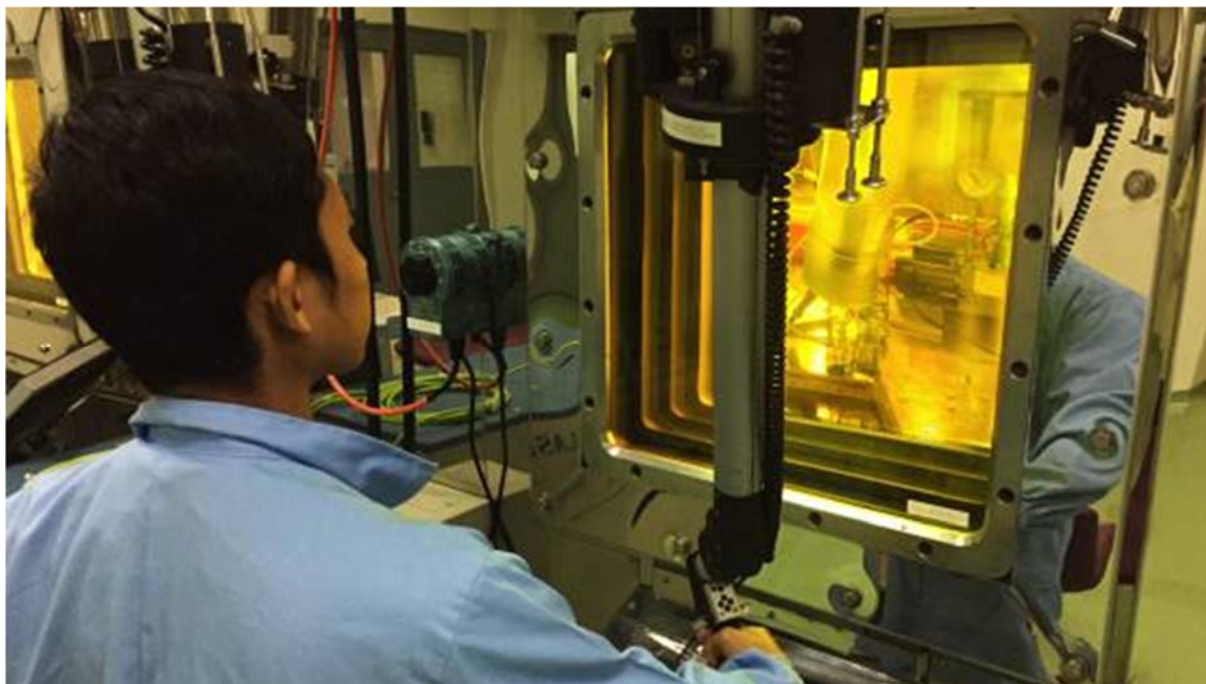


FIG. G.1. La production de radiopharmaceutiques théranostiques faisant appel à divers radio-isotopes et molécules porteuses est en cours dans au moins 80 États Membres dans le monde.

145. Actuellement, les peptides et inhibiteurs d'enzymes au gallium 68 et au lutécium 177 sont utilisés avec succès comme vecteurs pour traiter des tumeurs neuroendocriniennes et le cancer de la prostate. Cependant, il faut encore trouver un meilleur appariement pour le lutécium 177, à savoir un radionucléide à visée diagnostique ayant davantage de propriétés chimiques similaires que le gallium 68, ainsi que des paires de nouveaux émetteurs de particules alpha, bêta ou Auger et d'agents de diagnostic assortis.

Tendances

146. Pour tirer pleinement parti du potentiel des paires théranostiques en médecine nucléaire et améliorer les résultats des soins pour les patients, il faut mener davantage de travaux de recherche-développement sur les radiopharmaceutiques et les radio-isotopes. L'objectif est d'obtenir des paires de radionucléides plus assorties, d'utiliser au mieux des fragments chélateurs plus stables et d'étendre le nombre de vecteurs de ciblage spécifiques par voie biologique et biochimique.

147. La production de radiopharmaceutiques au lutécium 177 est possible sous forme « avec porteur » et « sans porteur », toutes deux actuellement produites dans des réacteurs de recherche. Depuis 2022, le lutécium 177 avec porteur peut également être produit dans les réacteurs nucléaires, au moyen d'une technologie mise au point par Framatome et utilisée pour la première fois au Canada à la centrale nucléaire de Bruce. Du fait de sa période radioactive moyenne, de ses émissions de particules bêta à des fins thérapeutiques et de rayons gamma pour l'imagerie diagnostique, le lutécium 177, déjà très présent dans les applications de médecine nucléaire, a permis à de nombreux chercheurs et scientifiques de mettre au point de nouveaux radiopharmaceutiques théranostiques. Grâce à l'arrivée récente de molécules de ciblage (peptides, fragments d'anticorps et petites molécules), de nouvelles activités et de nouveaux plans en rapport avec la mise au point d'agents sont en cours dans le monde entier.

148. Les radiopharmaceutiques théranostiques ont déjà trouvé leur place en milieu hospitalier pour le traitement du cancer. Cependant, les cliniciens ont besoin de radio-isotopes supplémentaires et nouveaux en raison des récents progrès de l'imagerie moléculaire, comme la TEP-tomodensitométrie et la TEP-imagerie par résonance magnétique, et de la thérapie ciblée (avec des émetteurs de particules alpha et bêta). De nouvelles paires de radio-isotopes destinées à des applications théranostiques, telles que les radio-isotopes du terbium qui peuvent servir à une large gamme d'applications tant diagnostiques par tomographie d'émission monophotonique que thérapeutiques (bêta- et alphathérapie), sont à l'étude (figure G.2).

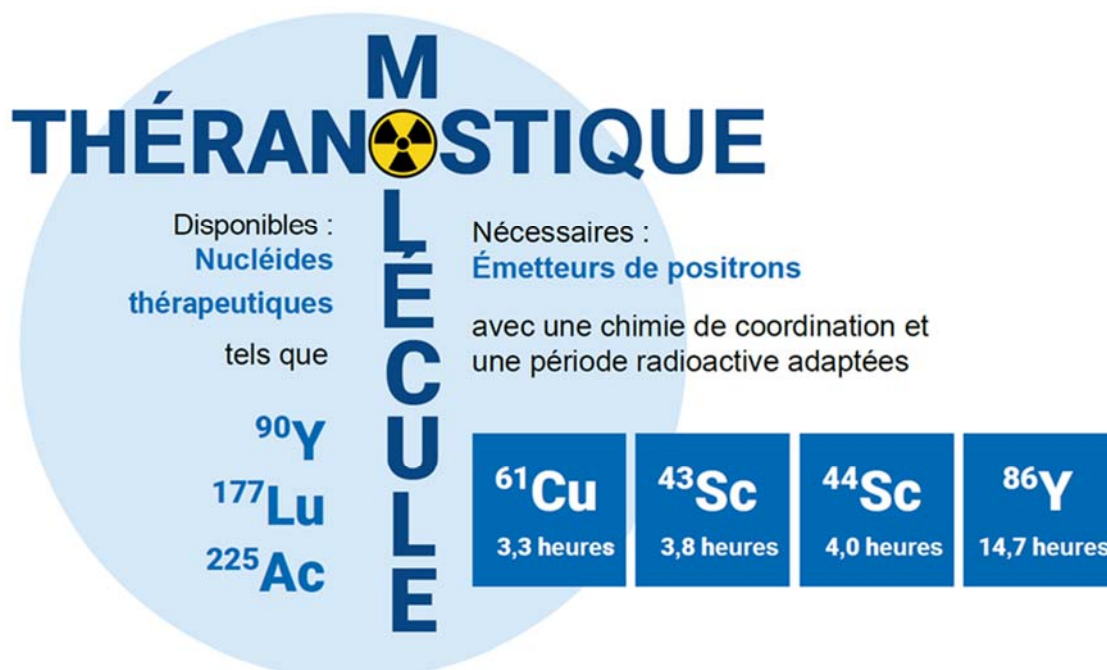


FIG. G.2. Schéma montrant les radioisotopes théranostiques qui permettront de perfectionner la mise au point de radiopharmaceutiques. [Illustration : AIEA, d'après les travaux de F. Rösch, Université Johannes Gutenberg de Mayence (Allemagne)]

149. Grâce aux évolutions technologiques dans le domaine de la production de radionucléides, la liste de ceux qui présentent un bon potentiel d'intégration dans les applications radiopharmaceutiques s'étoffe. Pourtant, les concepteurs de radiopharmaceutiques continuent de chercher comment administrer efficacement un radionucléide sélectionné à une cible moléculaire à l'intérieur d'une cellule. Une formule optimisée, une caractérisation détaillée et des évaluations précliniques sont nécessaires pour l'élaboration et l'application de nouveaux modes d'administration plus efficaces de produits théranostiques améliorés sur le plan pharmacocinétique et ayant des effets secondaires limités.

H. Santé humaine

H.1. L'intelligence artificielle au service du contourage et de la planification en radiothérapie

Situation

150. La radiothérapie est une pièce maîtresse du traitement du cancer : environ la moitié des patients atteints de cette maladie en ont besoin à un moment ou à un autre. La radio-oncologie a évolué rapidement au cours des dernières décennies, grâce aux innovations survenues en matière de matériel de radiothérapie, d'imagerie tridimensionnelle et de technologie de l'information, ainsi qu'à l'enrichissement des connaissances en biologie du cancer. De nouvelles techniques d'administration et les modalités d'imagerie associées faisant appel à l'intelligence artificielle ont permis l'application de radiothérapies de précision largement optimisées et ont contribué à améliorer le contrôle tumoral et les soins anticancéreux. Leur utilisation devrait permettre de réduire la variabilité inter-observateurs et de faire gagner du temps aux cliniciens.

151. L'exécution des tâches au cours d'une radiothérapie est un processus complexe composé de plusieurs étapes chronophages, exécutées par différents groupes de personnel, qui influent sur la qualité du traitement et donc sur l'évolution de l'état de santé des patients. Il y a une pénurie mondiale de personnels de santé, notamment de radio-oncologues, de physiciens médicaux et de manipulateurs en radiothérapie. L'Agence recommande un radio-oncologue pour 250 cas de cancer⁹, ce qui a peu de chances d'advenir dans la majorité des États Membres au cours des prochaines décennies. L'intelligence artificielle pourrait apporter une solution au besoin croissant de ressources humaines.

152. L'administration d'une radiothérapie passe non seulement par un bon ciblage de la tumeur, mais aussi par la protection des tissus et structures sains afin de réduire le plus possible les dommages et les effets secondaires. Une étape essentielle du processus de préparation à la radiothérapie est le contourage, qui consiste à délimiter les organes, les tissus normaux et la tumeur, en général d'après des directives et des atlas anatomiques faisant l'objet d'un consensus (figure H.1).

⁹ *Setting Up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects* (IAEA, 2008) (*Mise en place d'un programme de radiothérapie : aspects cliniques, physique médicale, radioprotection, sûreté*), en anglais uniquement.



FIG. H.1. L'Agence forme des professionnels de santé de services de radiothérapie et de médecine nucléaire, plus particulièrement grâce à des méthodes innovantes et rentables.

(Photo : AIEA)

153. Plusieurs outils disponibles ou en cours d'élaboration sont destinés à accroître l'efficacité du contourage, processus chronophage, comme l'auto-contourage par atlas pour diminuer la variabilité des contours. Un algorithme sélectionne l'image la plus similaire à celle du patient, puis les contours de l'atlas sont intégrés aux contours du patient par voie d'enregistrement d'imagerie déformable. Plus récemment, de grands ensembles de données cliniques anonymisées contenant des données de qualité sur le contourage de patients ont servi à mettre au point des algorithmes d'apprentissage profond basés sur l'intelligence artificielle.

Tendances

154. L'intelligence artificielle peut contribuer à améliorer la qualité et la normalisation des différentes étapes d'une radiothérapie et à en accélérer l'exécution, offrant la possibilité d'administrer plus sûrement et plus précisément des doses de rayonnement. Elle se développe rapidement en milieu clinique et devrait transformer le paradigme de planification d'une radiothérapie, processus complexe impliquant de nombreux groupes de spécialistes qui deviendrait automatisé. Il est essentiel que des prestataires de santé bénéficient de la formation nécessaire pour utiliser et contrôler dans des conditions de sûreté les systèmes qui y sont liés, tout comme il est indispensable que le grand public en comprenne les avantages et les risques associés.

155. La sélection et le contourage des volumes des tumeurs cancéreuses cibles et des organes à risque constituent une étape clé de la radiothérapie moderne. Les concepts et les termes définissant le volume tumoral macroscopique (GTV), le volume cible clinique (CTV) et les organes à risque ne cessent d'évoluer. Si le contourage reste principalement manuel, les tâches relevant du contourage automatique peuvent être exécutées à l'aide d'un atlas anatomique et d'une méthodologie d'apprentissage profond. L'auto-contourage par atlas se base sur un ensemble de cas préparés et délinéés par tomographie

(CT). L'apprentissage profond est une technique d'apprentissage automatique fondée sur des réseaux neuronaux profonds qui permet de créer un modèle susceptible d'apprendre et de s'améliorer avec l'expérience et le temps. Des logiciels d'auto-contourage par atlas et apprentissage profond sont disponibles sur le marché.

156. Bien que les performances de l'auto-segmentation par apprentissage profond dans les études menées soient très prometteuses, le bénéfice clinique réel est largement méconnu. Il est possible que le contourage nécessite encore des manipulations ou des vérifications manuelles de la part de l'homme, et il faut continuer à former et à mettre en pratique les lignes directrices en matière de délimitation malgré le recours à l'auto-segmentation en milieu clinique. Dans certaines situations, les décisions qui doivent être fondées sur d'autres paramètres que les seules informations données par l'imagerie limitent le recours à l'intelligence artificielle pour la segmentation.

157. Le problème peut être résolu par l'intelligence hybride qui combine les atouts de l'intelligence naturelle et de l'intelligence artificielle pour la segmentation des organes dans les images obtenues par CT à l'aide de cinq modules distincts¹⁰. Cette approche aboutit à des résultats similaires à ceux obtenus par des spécialistes du contourage, mais avec des gains de temps appréciables (figure H.2).

158. Une récente présentation par l'Agence de la situation en matière de technologie nucléaire et d'intelligence artificielle, des difficultés rencontrées et des opportunités qui y sont liées souligne la nécessité de définir les rôles et les responsabilités des spécialistes de la radiothérapie et de proposer un cadre clair pour la sélection, la mise en service, l'application des technologies fondées sur l'intelligence artificielle, ainsi que pour la communication des données et l'assurance de la qualité en continu y afférentes¹¹.

159. L'Agence contribuera à l'élaboration d'un cadre destiné à aider les États Membres à recourir à l'intelligence artificielle pour le contourage. Au titre de cet appui, un projet de recherche coordonnée entrepris en 2022 étudie l'efficacité des interventions de formation en ligne des capacités de contourage assisté par l'IA en radiothérapie, notamment pour les cancers de la tête et du cou. Bien que la possible perte des connaissances des médecins, des physiciens médicaux ou des manipulateurs en radiothérapie soit encore un souci, l'intelligence artificielle semble améliorer la qualité tout en faisant gagner du temps. Compte tenu de la pénurie mondiale de soignants en oncologie, sa contribution accrue au contourage, fondée sur une réglementation appropriée, serait une avancée positive.

¹⁰ Udupa J. K., Liu T., Jin C., et al. Combining natural and artificial intelligence for robust automatic anatomy segmentation: Application in neck and thorax auto-contouring, *Medical Physics* (2022).

¹¹ *Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology* (IAEA, Vienna, 2022).

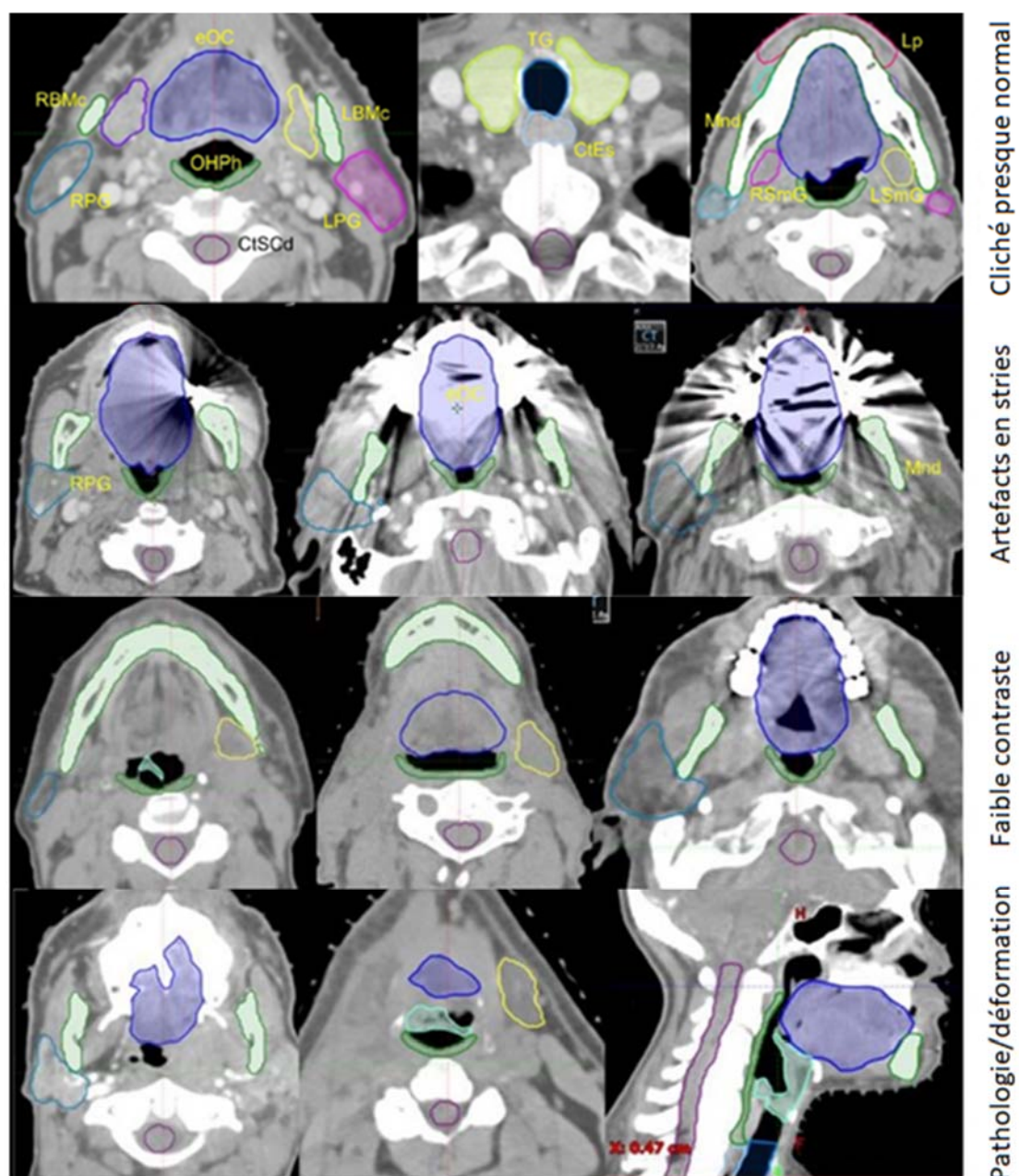


FIG. H.2. Scanners du cou par CT présentant des écarts de qualité d'image, par ex., artefacts de stries, contraste médiocre et distorsion de formes, qui peuvent poser problème. En pareil cas, l'intelligence hybride peut être une modalité efficace de contournage en radiothérapie. (Photo : Physique médicale, 2022)

I. Environnement marin

I.1. Nouveaux contaminants préoccupants

Situation

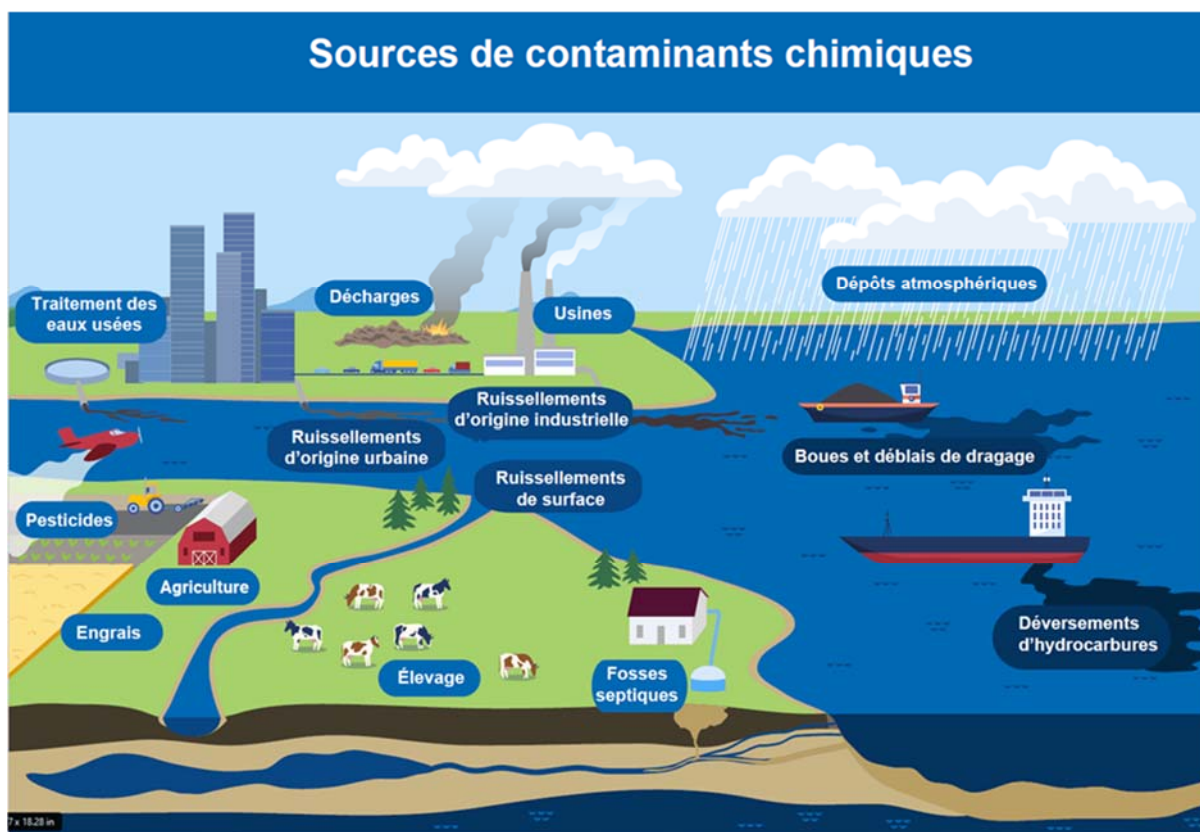
160. Il se fabrique dans le monde, selon les estimations, plus de 140 000 produits chimiques synthétiques et de nouvelles substances chimiques d'origine anthropique font constamment leur apparition. La fréquence d'utilisation et l'importance des volumes de production de ces substances chimiques, qui peuvent nuire aux écosystèmes et à la santé humaine, devraient tripler d'ici à 2050. Une poignée d'entre elles, souvent désignées sous le vocable « substances prioritaires », sont soumises aux dispositions réglementaires des États Membres, qui en assurent le suivi dans le milieu marin. Pour autant, seule une petite fraction des effets toxiques observés dans l'environnement aquatique peut être attribuée à la présence de ces substances prioritaires connues¹².

161. Dans ce contexte, les substances détectées dans l'environnement qui échappent aux programmes de surveillance réglementaire, suscitent une inquiétude grandissante. Bien que l'on sache ou que l'on soupçonne que ces nouveaux contaminants préoccupants ont des conséquences préjudiciables pour les écosystèmes et la santé humaine, leur évolution et leurs effets biologiques sont mal connus. Le problème concerne notamment les plastifiants, les produits ignifuges, les substances fluorées « anti-adhésives » (souvent surnommés « produits chimiques éternels »), les pesticides, les produits pharmaceutiques et les produits d'hygiène corporelle. Le traitement des effluents industriels et domestiques, les lixiviats provenant des décharges, les ruissellements de surface, le fumier et les biosolides appliqués sur les terres agricoles ainsi que les dépôts atmosphériques sont autant de sources de nouveaux contaminants préoccupants dans l'environnement aquatique (figure I.1). Les substances hautement persistantes, bioaccumulables dans les organismes et ayant des propriétés toxiques sont particulièrement inquiétantes pour la santé des écosystèmes marins.

162. Les laboratoires de l'environnement marin de l'AIEA à Monaco ont mis au point des méthodes d'analyse destinées à cibler des composés spécifiques au sein de groupes de nouveaux contaminants préoccupants dans divers milieux marins tels que l'eau, les sédiments et le biote. Le recours, tout au long du processus d'analyse, à des analogues isotopiquement marqués des contaminants ciblés permet, en y associant des techniques de détection par spectrométrie de masse, de mesurer avec précision lesdits contaminants à l'état de traces et d'ultra-traces. Ces méthodes dites d'« analyse par dilution isotopique » jouent un rôle essentiel pour caractériser l'existence et la répartition géographique des menaces chimiques connues et émergentes dans les réseaux alimentaires marins et les produits de la mer, en particulier dans les régions peu étudiées, de manière à apporter aux responsables des preuves scientifiques qui viendront éclairer leurs décisions.

163. Cela étant, les signaux d'alerte d'une « pandémie silencieuse » sont clairs et bien présents. Le problème du nombre sans cesse croissant de nouveaux produits chimiques synthétiques qui apparaissent sur le marché mondial est aggravé par le manque de connaissances quant à leur identité chimique. En outre, malgré la multiplication des preuves attestant de l'omniprésence de ces produits chimiques dans l'environnement aquatique, les mesures de surveillance, d'évaluation et de gestion sont insuffisantes.

¹² Voir Brack, W., Klamer, H.J.C., Alda, M.L.D. et Barcelo, D., Effect-directed analysis of key toxicants in European river basins : A review, Environmental Science Pollution Research, Vol. 14(1) (2007).



*FIG. I.1. De plus en plus de nouveaux produits chimiques synthétiques sont libérés dans l'environnement. Des techniques innovantes d'échantillonnage de l'eau et d'examen à des fins d'analyse peuvent aider les scientifiques à déterminer et à quantifier les incidences de ces polluants sur les écosystèmes et la santé humaine.
(Illustration : Rudzhan/stock.adobe.com, modifiée par l'AIEA)*

Tendances

164. Des stratégies plus globales de surveillance des contaminants chimiques connus et d'identification de nouvelles substances potentiellement dangereuses dans l'environnement marin sont en cours d'élaboration. Les outils innovants d'échantillonnage de l'eau et les progrès réalisés dans les techniques de spectrométrie de masse permettent, en se conjuguant, de dépister plus précisément un grand nombre de polluants connus ou suspectés comme tels et d'identifier des produits chimiques inconnus.

165. Les techniques d'échantillonnage passif, désormais considérées comme des outils fiables, robustes et rentables pour la surveillance de la qualité de l'eau, offrent une solution particulièrement attrayante pour relever un certain nombre de défis que pose la pollution chimique qui touche plus spécialement l'environnement aquatique. Les dispositifs auxquels elles font appel consistent simplement à utiliser soit un matériau unique, tel qu'une feuille de caoutchouc silicone, soit un matériau fixé à l'arrière de membranes perméables sur lesquelles viendront s'accumuler les polluants chimiques lorsque ces dispositifs seront déployés dans l'environnement aquatique (figure I.2).



*FIG. I.2. Dispositifs d'échantillonnage passif prêts à être installés en mer.
(Photo : Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science, Royaume-Uni)*

166. Les dispositifs d'échantillonnage passif permettent d'effectuer des prélèvements de masses d'eau en continu sur des périodes allant de plusieurs jours à plusieurs mois. Il est ainsi possible d'accumuler des contaminants chimiques en des quantités plusieurs milliers de fois supérieures aux niveaux généralement mesurés dans l'eau, ce qui facilite la détection là où le prélèvement traditionnel instantané de petits volumes d'échantillons n'est pas assez sensible.

167. En marquant ces dispositifs d'échantillonnage passif, avant leur déploiement, avec des isotopes stables sous forme de composés de référence au deutérium et au carbone 13, il est possible de quantifier exactement les volumes d'eau prélevée et de mesurer les contaminants au fil du temps. Ces dispositifs ont un autre avantage, à savoir que l'échantillonnage ne porte ici que sur la fraction des substances chimiques librement dissoute en phase aqueuse, ce qui donne une représentation plus exacte des contaminants biodisponibles susceptibles d'être absorbés par les organismes. Ils peuvent même être mis à profit pour cibler spécifiquement les polluants organiques susceptibles de se bioaccumuler dans les réseaux alimentaires marins.

168. Associés à des instruments d'analyse de pointe basés sur des techniques de séparation chromatographique et de spectrométrie de masse à haute résolution et de haute précision, ils peuvent détecter des milliers de substances chimiques présentes dans l'environnement marin et faciliter l'identification de composés jusqu'alors inconnus. Ils peuvent servir de systèmes d'alerte précoce très

efficaces pour avertir de la présence dans l'environnement marin de nouveaux contaminants préoccupants ; ils peuvent être déployés dans des régions éloignées ou peu étudiées et être facilement convoyés vers les laboratoires d'analyse.

169. Ces percées des méthodes d'échantillonnage de l'eau et de techniques perfectionnées d'examen à des fins d'analyse peuvent se révéler maintenant très utiles pour résoudre certains des problèmes que posent les mélanges complexes de nouveaux contaminants préoccupants présents dans l'environnement marin. Elles contribueront à remédier au manque de connaissances sur la présence de polluants chimiques anthropiques, leurs déplacements dans les écosystèmes et leurs incidences ultérieures sur les fonctions des écosystèmes marins, afin de garantir que leur rejet dans le milieu marin puisse être géré le plus tôt possible.

I.2. Nouveaux radiotraceurs de la circulation océanique au service d'une meilleure compréhension et modélisation du transport des polluants et des changements océaniques et climatiques

Situation

170. Cela fait à présent des dizaines d'années que l'on rejette en mer des radionucléides divers et variés. Si complexe puisse-t-elle être, la répartition spatio-temporelle de ces rejets est toujours liée à quatre phénomènes généraux : la fonction/source des intrants, la décroissance radioactive, la biogéochimie et les processus océaniques. Dans la mesure où ils sont transportés dans l'atmosphère et l'hydrosphère par différentes voies physiques, chimiques et biologiques, l'observation de l'évolution de leur répartition océanique permet d'obtenir des informations uniques sur la nature et l'ampleur des processus en jeu.

171. Des radionucléides artificiels se répandent dans l'environnement marin depuis les années 1940 du fait de diverses activités, notamment la production d'énergie nucléaire et la mise au point, la production et les essais d'armes nucléaires. Leurs rejets ont été méticuleusement consignés depuis, et de nombreux travaux de recherche visent à étudier comment s'opère leur transport et ce qu'il advient d'eux dans le milieu marin et à déterminer si, utilisés en tant que traceurs, ils peuvent aider à mieux comprendre divers processus marins et océaniques. La compréhension de ces mécanismes peut ouvrir la voie à l'évaluation des conséquences néfastes desdits rejets sur l'environnement ou la santé humaine ; elle contribuerait aussi à donner une petite idée des incidences des futurs rejets de radionucléides, en particulier de ceux qui ne sont pas planifiés.

172. Compte tenu de la grande diversité des contextes historiques et géographiques qui ont présidé à l'introduction de ces substances et étant donné la disparité de leurs comportements environnementaux, chaque traceur éclaire une partie différente du spectre des processus de transport océanique (figure I.3). Ces attributs, alliés à toute une série de caractéristiques géochimiques telles que la période et l'affinité des particules, font des radionucléides introduits artificiellement des outils extrêmement utiles pour une meilleure appréhension des caractéristiques des océans et le suivi des polluants.

Circulation thermohaline

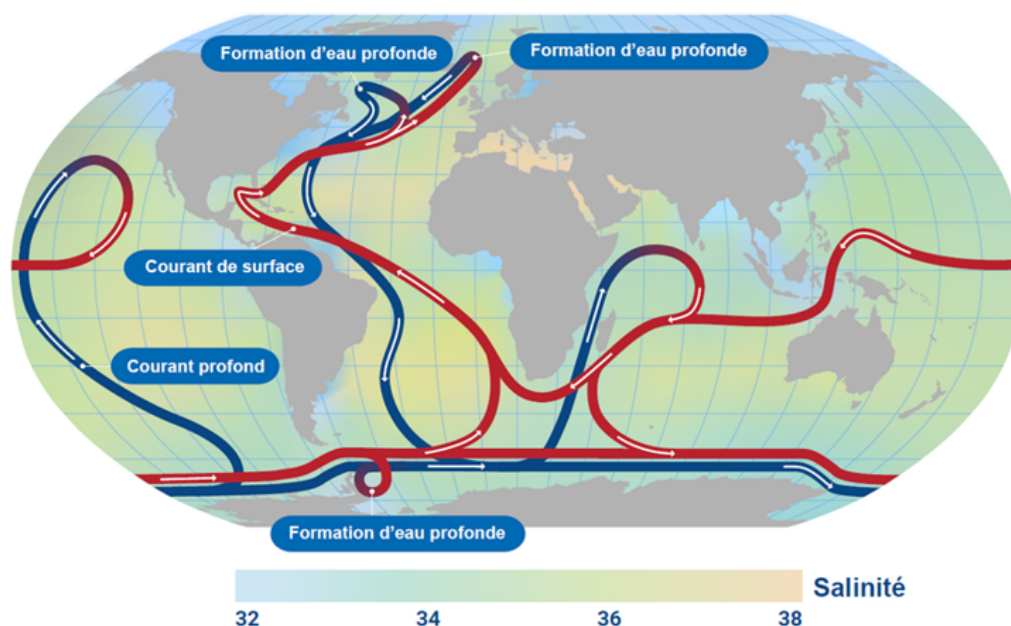


FIG. I.3. La circulation thermohaline, également appelée tapis roulant océanique mondial, est un important mécanisme qui entraîne le déplacement et le mélange de l'eau des océans. Des radiotraceurs peuvent être utilisés pour le suivi du parcours des eaux de mer. (Illustration : NASA Earth Observatory, modifiée par l'AIEA)

173. L'utilisation de radiotraceurs grâce aux techniques nucléaires, notamment le comptage de décroissance / mesure de masse et l'activation par réactions nucléaires, est également précieuse pour comprendre les écosystèmes marins et côtiers. Ces techniques permettent de surveiller l'absorption et la bioamplification de contaminants radioactifs et non radioactifs tels que les microplastiques et le méthylmercure. Elles servent aussi à identifier l'origine, suivre les trajectoires et comprendre le devenir de la pollution du milieu marin par les microplastiques dans le cadre des projets relevant de l'initiative NUTEC Plastics (Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique) de l'Agence. Elles contribuent également à identifier et quantifier les biotoxines présentes dans les produits de la mer, à prendre la mesure des conséquences de l'acidification des océans sur les organismes calcifiants et à évaluer les processus métaboliques liés à la hausse des températures.

174. L'enrichissement des ensembles de données mondiales fait de la modélisation des écosystèmes marins une méthodologie d'analyse importante en termes d'intégration des connaissances, des données et des informations, qui permettra de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes ainsi que la migration et le transport des contaminants. Les radionucléides artificiels sont d'un grand concours pour tester la validité de ces modèles en ce qu'ils fournissent des données de mesure établies à partir de la réalité du terrain. La compréhension des processus responsables du transport des contaminants dans les océans est nécessaire pour pouvoir prédire les conséquences que l'action de l'homme aura sur l'environnement et pour prendre des décisions politiques judicieuses quant aux activités futures.

Tendances

175. À leurs débuts, les mesures effectuées dans l'environnement marin produisaient des données éparses et parfois peu fiables. Des techniques très poussées et les nouvelles technologies ont permis de mesurer des concentrations infimes de matières, mais ont été aussi source de difficultés logistiques en

cas d'échantillons de grand volume et à l'origine d'éventuels graves problèmes de contamination croisée.

176. Eu égard aux faibles concentrations de radionucléides dans les échantillons de l'environnement en général et à la petite taille des échantillons disponibles, il a fallu mettre au point des techniques efficaces. Le passage du comptage de la décroissance radioactive au comptage des atomes à l'aide de méthodes de spectrométrie de masse, telles que la spectrométrie de masse par accélérateur (SMA), la spectrométrie de masse à source plasma à couplage inductif, la spectrométrie de masse résonance ionique, la spectrométrie de masse des ions secondaires et la spectrométrie de masse à thermo-ionisation, constitue un tournant majeur dans la technologie radioanalytique.

177. Les progrès notables de la SMA récemment réalisés en termes d'efficacité de détection et de suppression des interférences isobariques ont également ouvert la voie à l'analyse d'autres radionucléides à longue période à des concentrations environnementales ultra-faibles (figure I.4).

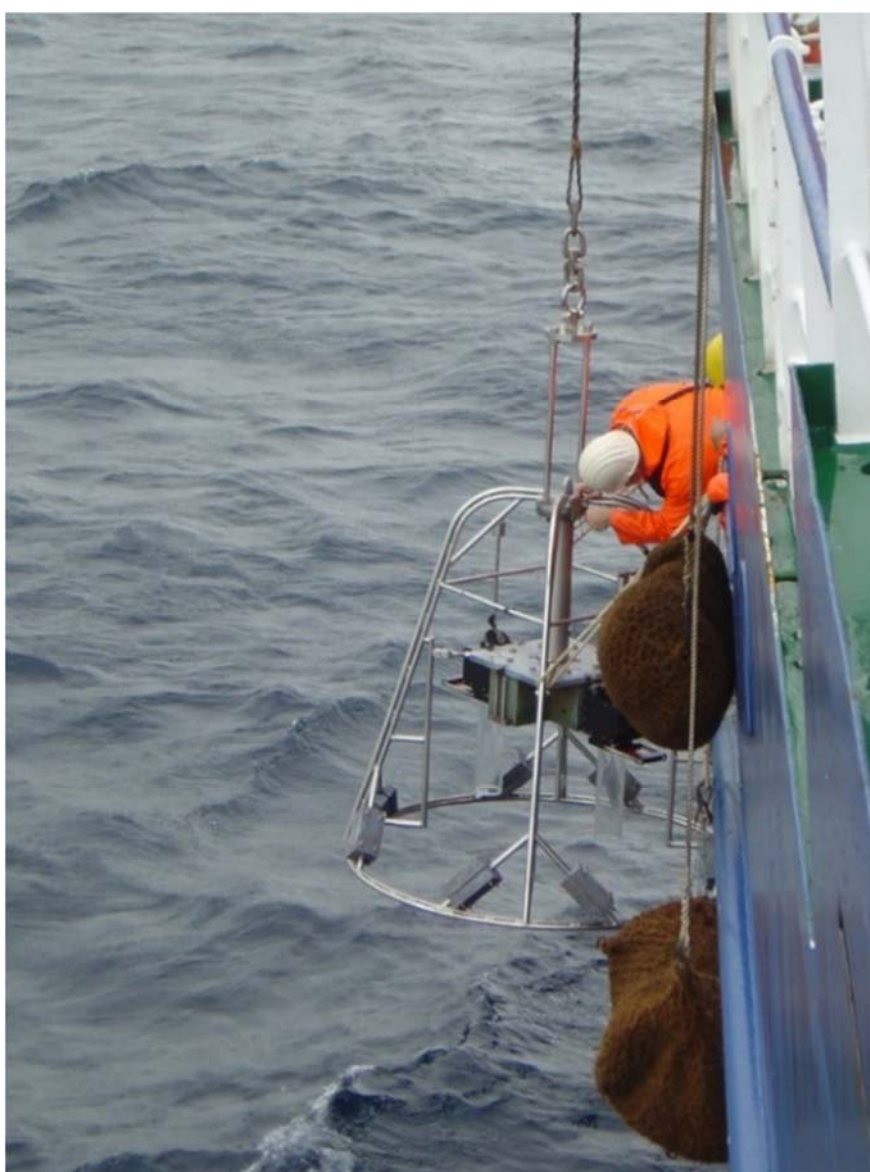


FIG. I.4. Mise en place d'une sonde multiple pour la collecte d'échantillons de sédiments non perturbés aux fins de l'analyse des polluants et des signes du changement climatique. Les sédiments conservent des informations chronologiques, et les radiotraceurs servent à dater les événements passés enregistrés dans ces archives naturelles. (Photo : AIEA)

178. Les longues périodes propres au technétium 99, à l'iode 129, à l'uranium 236, au neptunium 237, au plutonium 239 et au plutonium 240 confèrent à ces éléments une grande importance pour les applications des traceurs dans les études des processus de circulation océanographique à grande échelle. Les études menées sur les processus de transport de masses d'eau ont mis au premier plan l'iode 129 et l'uranium 236 du fait de leur nature soluble dans l'eau de mer et en raison de la possibilité offerte, grâce aux nouveaux progrès des techniques de mesure, de les détecter à des concentrations extrêmement faibles. Contrairement aux techniques classiques de spectrométrie de masse, les systèmes de SMA déterminent les concentrations à partir d'un petit volume d'échantillons d'eau de mer moyennant l'application de procédures chimiques simples et rapides assorties de limites de détection des plus performantes (c'est-à-dire des rapports atomiques iode 129/iode 127 et uranium 236/uranium 238 de 10^{-13} , voire moins).

179. Les technologies radioanalytiques ultra-sensibles ont toujours joué un rôle clé dans les sciences marines. L'évolution ultérieure des nouvelles technologies de comptage d'atomes isolés ouvrira la voie à des recherches scientifiques nouvelles et passionnantes.

180. Des avancées prometteuses se dessinent en ce qui concerne les techniques d'analyse ultra-sensibles par laser, la détection des isotopes ultra-traces des gaz nobles, les sources d'ions positifs pour les accélérateurs tandem et les technologies de piégeage d'ions. Les progrès technologiques permettront de passer de l'analyse d'échantillons en vrac à l'analyse isotopique de composés spécifiques grâce au couplage en ligne d'instruments d'analyse. Il serait ainsi possible de disposer d'une technologie de comptage d'atomes isolés pour de nombreux radionucléides, ce qui constituerait une percée de taille dans l'analyse ultra-sensible des radionucléides dans le milieu marin.

Annexe

Tableau A-1. Situation de l'électronucléaire dans le monde – 2022 ^a

Pays	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2022		Expérience d'exploitation totale en 2022	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
Afrique du Sud	2	1 854			10,1	4,9	76	3
Allemagne	3	4 055			31,9	5,8	834	8
Argentine	3	1 641	1	25	7,5	5,4	97	2
Arménie	1	416			2,6	31,0	55	3
Bangladesh			2	2 160				
Bélarus	1	1 110	1	1 110	4,4	11,9	2	2
Belgique	6	4 936			41,7	46,4	324	4
Bésil	2	1 884	1	1 340	13,7	2,5	63	3
Bulgarie	2	2 006			15,8	32,5	173	3
Canada	19	13 624			81,7	12,9	903	0
Chine	54	52 181	20	20 284	395,4	5,0	513	2
Corée, République de	25	24 489	3	4 020	167,5	30,4	644	9
Égypte			2	2 200				
Émirats arabes unis	3	4 011	1	1 310	19,3	6,8	4	0
Espagne	7	7 123			56,2	20,3	368	2
États-Unis d'Amérique	92	94 718	2	2 234	772,2	18,2	4 825	9
Fédération de Russie	37	27 727	3	2 700	209,5	19,6	1 447	7
Finlande	5	4 394			24,2	35,0	176	2
France	56	61 370	1	1 630	282,1	62,6	2 449	0
Hongrie	4	1 916			15,0	47,0	150	2
Inde	19	6 290	8	6 028	42	3,1	594	11
Iran, République islamique d'	1	915	1	974	6,0	1,7	11	4
Japon	10	9 486	2	2 653	51,9	6,1	2 020	6
Mexique	2	1 552			10,5	4,5	61	11
Pakistan	6	3 262			22,2	16,2	98	9
Pays-Bas	1	482			3,9	3,3	78	0
République tchèque	6	3 934			29,3	36,7	188	10
Roumanie	2	1 300			10,2	19,3	41	11
Royaume-Uni	9	5 883	2	3 260	43,6	14,2	1 658	9
Slovaquie	4	1 868	2	880	14,8	59,2	184	7
Slovénie	1	688			5,3	42,8	41	3
Suède	6	6 937			50,0	29,5	486	0
Suisse	4	2 973			23,2	36,4	236	11
Türkiye			4	4 456				
Ukraine ^e	15	13 107	2	2 070	n.d.	n.d.	563	6
Monde entier ^{b,c}	438 ^d	393 823 ^d	58	59 334	2 486,6	n.d.	19 764	11

Note : « n.d. » signifie « non disponible ».

^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 à la fin de juin 2023.

^b Le total inclut les chiffres suivants pour Taïwan (Chine) : 3 tranches, 2 859 MWe en service et 22,9 TW·h d'électricité fournie, soit 9,1 % du bouquet énergétique.

^c L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois) et en Lituanie (43 ans et 6 mois), ainsi que des centrales à l'arrêt et des centrales en service à Taïwan (Chine) (239 ans et 8 mois).

^d Le nombre total inclut les tranches dont l'exploitation reste suspendue : Inde (4 tranches : 639 MWe) et Japon (23 tranches, 22 193 MWe).

^e La production totale d'électricité n'inclut pas les réacteurs ukrainiens, car les données d'exploitation n'ont pas été communiquées pour l'année 2022 au moment de la publication.

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	161	5 1
Analyse par activation neutronique	116	5 0
Production de radio-isotopes	82	4 1
Imagerie neutronique	69	3 7
Irradiation de matériaux/du combustible	68	2 6
Diffusion neutronique	44	2 8
Géochronologie	24	2 1
Transmutation (dopage de silicium)	23	1 5
Transmutation (gemmes)	20	1 2
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	15	1 2
Fourniture de données nucléaires	16	9
Autres ^c	116	3 4

^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 233 réacteurs de recherche considérés (223 en service, 10 provisoirement à l'arrêt, en décembre 2022).

^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.

Liste des abréviations

ALFRED	Réacteur européen avancé de démonstration à neutrons rapides à caloporteur plomb
ALPS	Système avancé de traitement des liquides
ANSTO	Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires
ATF	Combustible résistant aux accidents
ATF-TS	Combustibles de technologie avancée et combustibles résistant aux accidents
BNCT	Thérapie par capture de neutrons par le bore
Combustible TRISO	Combustible tristructurel isotropique
COP27	Conférence de 2022 des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
COVID-19	Maladie à coronavirus 2019
CT	Tomodensitométrie
CTV	Volume cible clinique
D10	Dose de réduction décimale
DEMO	Centrale de démonstration à fusion
DOE	Département de l'énergie
DTT	Tokamak de test de divertor
EDXRF	Fluorescence X à dispersion d'énergie
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GC-IMS	Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de mobilité ionique
GTV	Volume tumoral macroscopique
GW	Gigawatt
GWe	Gigawatt électrique
HALEU	Uranium faiblement enrichi de forte densité
HPR1000	Hualong 1
HTR-PM	Réacteur modulaire à lit de boulets à haute température
IA	Intelligence artificielle
IFMIF	Installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion
IMSR	Réacteur intégral à sels fondus
INIR	Examen intégré de l'infrastructure nucléaire
keV	Kiloélectronvolt

KSTAR	Tokamak supraconducteur expérimental avancé de Corée
LIDAR	Détection et télémétrie par la lumière
MeV	Mégaélectronvolt
MMR	Microréacteur modulaire
MOX	Mélange d'oxydes
MWe	Mégawatt électrique
NHSI	Initiative d'harmonisation et de normalisation nucléaires
NIF	Installation nationale d'ignition
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PRC	Projet de recherche coordonnée
PRIS	Système d'information sur les réacteurs de puissance
RARG	Réacteur avancé refroidi par gaz
R-D	Recherche-développement
RDD	Recherche, développement et démonstration
REO	Réacteur à eau ordinaire
REP	Réacteur à eau sous pression
RESC	Réacteur refroidi par eau supercritique
RFMP	Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires
RNR-Na	Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
RNR-Pb	Réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb
RSF	Réacteur à sels fondus
RSF	Réacteur rapide à sels fondus
SMA	Spectrométrie de masse par accélérateur
SMART	Réacteur avancé modulaire intégré
STEP	Tokamak sphérique pour la production d'énergie
t ML	Tonne de métaux lourds
TEP	Tomographie à émission de positons
TW·h	Térawatt-heure
UE	Union européenne
UFE	Uranium faiblement enrichi
UHE	Uranium hautement enrichi



IAEA

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

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