

Conférence générale

GC(57)/INF/2

31 juillet 2013

Distribution générale

Français

Original : anglais

Cinquante-septième session ordinaire

Point 18 de l'ordre du jour provisoire
(GC(57)/1 et Add.1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2013

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus essentiellement en 2012.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2013* passe en revue les domaines suivants : applications énergétiques, données atomiques et nucléaires, accélérateurs et réacteurs de recherche, et sciences et applications nucléaires. Une documentation complémentaire au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2013* est disponible en anglais sur le site web de l'Agence¹ concernant la technologie de production nucléaire d'hydrogène et les enseignements préliminaires tirés de l'accident de Fukushima Daiichi en vue du développement d'une technologie de centrale nucléaire avancée.
- Des informations sur les activités de l'Agence dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires figurent également dans le Rapport annuel de l'AIEA pour 2012 (GC(57)/3), en particulier dans la partie Technologie, et dans le Rapport sur la coopération technique pour 2012 (GC(57)/INF/4).
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations faites par le Conseil des gouverneurs et d'autres observations communiquées par les États Membres.

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC57/Agenda/index.html>

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2013

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. La capacité de production d'énergie d'origine nucléaire dans le monde est passée à 372,1 GWe en 2012 avec, en fin d'année, 437 réacteurs en exploitation. Trois nouveaux réacteurs ont été raccordés au réseau, et deux réacteurs qui avaient été mis « à l'arrêt à long terme » ont été redémarrés. Trois réacteurs seulement ont été mis à l'arrêt définitivement en 2012, contre 13 en 2011. Soixante-sept nouveaux réacteurs étaient en construction à la fin de l'année, soit un nombre qui reste relativement élevé. On prévoit une forte hausse de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans le monde - entre 23 % et 100 % d'ici à 2030 -, même si les projections de l'Agence pour 2030 sont de 1 à 9 % inférieures à celles de 2011. L'essentiel de la croissance devrait intervenir dans les pays qui ont déjà des centrales nucléaires en exploitation, plus particulièrement en Extrême-Orient où la projection de croissance est la plus forte.
2. Bien que quelques pays aient reporté leur décision de démarrer un programme électronucléaire, d'autres s'y sont tenus. En juillet 2012, les Émirats arabes unis sont devenus le premier pays en 27 ans à entreprendre la construction de leur première centrale nucléaire. En outre, d'autres pays, dont le Bélarus et la Turquie, ont avancé dans cette voie en 2012.
3. Il ressort de l'édition 2011 du Livre rouge – *Uranium : Ressources, production et demande* – publié conjointement par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et par l'AIEA, que les estimations des ressources classiques identifiées d'uranium, d'un coût de récupération inférieur à 130 \$/kg d'U, ont légèrement baissé par rapport à l'édition précédente, alors que la production d'uranium dans le monde s'est sensiblement accrue, essentiellement du fait d'une augmentation de la production au Kazakhstan. De nouvelles ressources recensées en 2011 concernent un grand nombre de gisements d'uranium en Afrique. Le prix au comptant de l'uranium, qui était de 135 \$/kg d'U à la fin de 2011, est descendu à quelque 110 \$/kg d'U au second semestre de 2012. À la fin de 2012, ce prix est remonté à quelque 115 \$/kg d'U. Quoi qu'il en soit, les prix à long terme pour l'uranium sont restés stables à quelque 158 \$/kg d'U.
4. L'usine d'enrichissement par diffusion Georges Besse en France, qui a fermé en juin 2012 a été remplacée par Georges Besse II. En septembre 2012, la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) a délivré à Global Laser Enrichment, filiale de GE-Hitachi Nuclear Energy, la toute première licence de construction et d'exploitation pour une installation d'enrichissement par laser à grande échelle.

5. En juillet 2012, l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique a achevé la construction d'une installation intégrée pour des essais inactifs du traitement thermique de combustible usé à oxydes. Les essais de démarrage ont commencé en août.

6. Dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, la mise au point de trois installations de stockage géologique est à l'étude au Canada : l'installation sur le site de Bruce pour les DFA et les DMA de Ontario Power Generation ; le site des laboratoires de Chalk River pour les DFA et les DMA ; et un troisième site, pas encore défini, au Canada, destiné au dépôt pour combustible nucléaire irradié et centre d'expertise. En Espagne, Villar de Cañas a été officiellement choisi en décembre comme site pour l'entreposage centralisé du combustible nucléaire usé du pays. Toujours en décembre, Posiva en Finlande a déposé une demande de licence de construction d'un dépôt, auprès du gouvernement finlandais, pour son installation de stockage définitif du combustible usé à Olkiluoto, qui devrait être mise en service en 2020.

7. La construction d'un nouveau réacteur de recherche, un réacteur polyvalent de 5 MW a démarré en 2012 en Jordanie. En janvier 2013, on recensait 247 réacteurs de recherche en exploitation. L'AIEA a continué d'appuyer les efforts accomplis au niveau mondial pour réduire au minimum l'utilisation de combustible à l'uranium hautement enrichi (UHE) dans les réacteurs de recherche. En septembre 2012, le réacteur de recherche polonais Maria a été converti pour l'utilisation d'uranium faiblement enrichi (UFE) à la place d'uranium hautement enrichi (UHE). Le réacteur de recherche mexicain TRIGA MARK III a été converti à l'utilisation d'UFE à la place d'UHE et son dernier combustible à l'UHE a été réexpédié aux États-Unis en mars 2012. En décembre 2012, tout l'UHE a été retiré définitivement d'Autriche à la suite de la conversion complète du réacteur viennois TRIGA au combustible à l'UFE. Grâce aux opérations menées en Autriche et au Mexique, tout le combustible à l'UHE pour réacteurs TRIGA a été retiré des applications nucléaires civiles dans le monde. En 2012, dans le cadre du programme de renvoi du combustible d'origine russe pour réacteurs de recherche, l'AIEA a aidé au rapatriement de près de 110 kg de combustible neuf à l'UHE de l'Institut de physique et de technologie de Kharkov (Ukraine), d'environ 20 kg de combustible usé à l'UHE de l'Institut de recherche nucléaire de Kiev, de près de 100 kg de combustible usé à l'UHE d'Ouzbékistan et de Pologne et de 27 kg de combustible neuf à l'UHE de Pologne.

8. Les applications nucléaires traitées dans le présent rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire révèlent trois domaines de grand intérêt actuel : l'utilisation des technologies nucléaires pour améliorer la sécurité sanitaire des aliments et la sécurité alimentaire ; les nouveautés dans la lutte contre le cancer et les technologies nucléaires pour faire face aux retombées du changement climatique.

9. L'irradiation des aliments, qui consiste à exposer les denrées à des rayons ionisants dans des conditions contrôlées, permet de renforcer la sécurité sanitaire des aliments et la sécurité alimentaire. Les installations d'irradiation utilisent couramment le cobalt 60 ou le césium 137 pour émettre des rayons gamma. Toutefois, il s'avère difficile de développer l'irradiation des aliments au moyen de ces radio-isotopes car il est compliqué de se procurer, d'expédier et de réceptionner des sources radio-isotopiques. Ceci explique que les technologies des faisceaux d'électrons et des rayons X, qui utilisent l'électricité pour produire des rayons ionisants, suscitent de plus en plus d'intérêt. Ces technologies offrent la possibilité de développer sensiblement l'utilisation de l'irradiation des aliments pour accroître la sécurité sanitaire des aliments mais aussi les disponibilités alimentaires mondiales en réduisant les pertes et les déchets alimentaires.

10. La sécurité sanitaire des aliments est très préoccupante après un rejet de radioactivité dû à un accident nucléaire. Les techniques nucléaires sont utilisées pour élaborer des pratiques de terrain et de laboratoire harmonisées qui permettent aux autorités agricoles d'évaluer efficacement et systématiquement la sécurité sanitaire des aliments le plus vite possible après un événement nucléaire.

Il ressort des enseignements tirés des accidents que la communication et la gestion des données relatives à l'alimentation et l'agriculture ont besoin d'être améliorées, en particulier lorsque plusieurs pays sont touchés et qu'une approche coordonnée s'impose.

11. La radiothérapie, qui vise à délivrer une dose de rayonnement exacte à une tumeur en endommageant le moins possible les tissus sains voisins, est un traitement efficace du cancer. Les avancées récentes dans la radiothérapie utilisant des photons présentent des avantages potentiellement importants par rapport à la radiothérapie classique, notamment une meilleure distribution des doses, une toxicité réduite, une administration rapide du traitement et un contrôle local plus précis, autant de facteurs qui augmentent les chances de survie. Les thérapies utilisant les particules, notamment la thérapie par faisceaux de protons et la thérapie par faisceaux d'ions carbone, connaissent un intérêt croissant depuis 20 ans et se développent de plus en plus. La curiethérapie tridimensionnelle est une autre avancée en radiothérapie ; elle consiste à placer des sources radioactives au contact ou à l'intérieur de la tumeur ou encore dans des cavités de l'organisme. L'utilisation de ces technologies avancées engendre des coûts supplémentaires non négligeables qu'il convient de mettre en balance avec les avantages potentiels qu'elle présente sur le recours aux méthodes classiques.

12. La manipulation de la matière au niveau atomique et moléculaire pour concevoir de nouveaux matériaux, dispositifs et structures est appelée la nanotechnologie. La médecine est un champ d'application intéressant pour la nanotechnologie. Des propriétés particulières de certaines nanostructures pourraient aider à lutter contre le cancer au moyen d'approches inédites. Cette avancée a donné naissance à la nanomédecine, domaine nouveau qui recouvre les applications médicales de la nanotechnologie. En ciblant les cellules cancéreuses, des nanosystèmes spécialement conçus peuvent servir de vecteurs pour l'administration de médicaments capables de délivrer des doses élevées de radionucléides à l'intérieur des cellules malignes sans toucher les tissus sains, réduisant ainsi considérablement les effets secondaires qui accompagnent généralement un bon nombre des thérapies anticancéreuses actuelles.

13. Les techniques nucléaires sont importantes pour comprendre le changement climatique, en prédire le cours futur et s'adapter à ses impacts. Dans le milieu marin, les impacts du changement climatique, comme l'acidification des océans, affectent les pêcheries, l'aquaculture côtière, les récifs coralliens et d'autres ressources côtières. Les technologies nucléaires apportent des réponses à quelques-unes des questions scientifiques élémentaires sur les interactions entre les conditions ambiantes qui règnent dans les océans et les écosystèmes et organismes marins. L'utilisation à la fois de radionucléides et d'isotopes stables a permis de mieux comprendre le phénomène de l'oscillation australe El Niño survenu pendant une période remontant à plusieurs millénaires. Les techniques nucléaires servent aussi à étudier les impacts de l'acidification des océans sur les écosystèmes marins et la biodiversité.

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2012, il y avait 437 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans le monde, totalisant une capacité de production de 372,1 GWe² (voir tableau A-1). Cela représente une

² 1 GWe correspond à un milliard de watts d'énergie électrique.

légère augmentation de quelque 3,3 GWe de la capacité totale par rapport à 2011. Il y a eu trois nouveaux raccordements au réseau : Ningde 1 (1 000 MWe) en Chine, Shin-Wolsong 1 (960 MWe) et Shin-Kori 2 (960 MWe) en République de Corée. De plus, deux tranches arrêtées, Bruce 1 et 2 (772 MWe chacune) ont été reconnectées au réseau au Canada.

2. L'impact de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi a continué à se faire sentir en 2012 avec un nombre relativement faible de mises en chantier de nouveaux réacteurs. Il y a eu sept mises en chantier en 2012 : Fuqing 4, Shidaowan 1, Tianwan 3 et Yangjiang 4 en Chine, Shin-Ulchin 1 en République de Corée, Baltiisk 1 en Fédération de Russie, et Barakah 1 aux Émirats arabes unis (Fig. A-1). Bien que ce chiffre soit supérieur à celui de 2011, les mises en chantier ont tout de même été beaucoup moins nombreuses qu'en 2010, année record avec 16 nouveaux chantiers, nombre en constante augmentation depuis 2003.



FIG. A-1. Chantier de la centrale Barakah 1 aux Émirats arabes unis (Photo : ENEC).

3. En revanche, en 2012, trois réacteurs seulement ont été officiellement déclarés en mise à l'arrêt définitive : Gentilly 2 au Canada, Oldbury A1 et Wylfa 2 au Royaume-Uni. Ils ont été exploités respectivement pendant 30 ans, 45 ans et 41 ans. Cela fait beaucoup moins que les 13 mises à l'arrêt en 2011.

4. Au 31 décembre 2012, 67 réacteurs étaient en construction, nombre qui reste relativement élevé (Fig. A-2). Comme les années précédentes, l'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (voir le tableau A-1), en Chine en particulier. De fait, sur le nombre total de réacteurs en construction, pas moins de 47 sont en Asie, de même que 38 des 48 nouveaux réacteurs qui ont été dernièrement raccordés au réseau.



FIG. A-2. Construction à la centrale de Shin Kori 3 en République de Corée.

5. Aux États-Unis, des autorisations ont été délivrées pour la première fois depuis trente ans en 2012 en vue de la construction et de l'exploitation de quatre AP1000 aux centrales de Vogtle et de V.C. Summer.

6. On s'intéresse de plus en plus dans le monde à l'exploitation à long terme des centrales existantes. L'Agence a organisé en mai 2012 à Salt Lake City, dans l'Utah (États-Unis d'Amérique), la troisième Conférence internationale sur la gestion de la durée de vie des centrales nucléaires, qui a été parrainée par le Département de l'énergie (DOE) et la Commission de la réglementation nucléaire (NRC). Plus de 350 participants représentant 38 États Membres et trois organisations internationales ont assisté à la conférence et ont discuté de l'impact de l'accident de Fukushima Daiichi sur la gestion de la durée de vie des centrales et sur leur exploitation à long terme.

7. La tendance à augmenter la puissance et à renouveler ou proroger les licences d'exploitation des réacteurs s'est poursuivie en 2012 dans de nombreux pays. En France, l'Autorité de sûreté nucléaire a accepté de renouveler pour 10 ans au-delà des 30 ans de fonctionnement la licence d'exploitation de la tranche 2 à la centrale nucléaire de Bugey, ce qui constitue la troisième autorisation de ce type délivrée en France. Au Royaume-Uni, l'Autorité du déclassement nucléaire a reçu l'autorisation de poursuivre jusqu'en septembre 2014 l'exploitation de la tranche Wylfa 1 en y transférant du combustible partiellement usé de la tranche 2. Aux États-Unis, la NRC a renouvelé pour 20 années supplémentaires la licence d'exploitation des tranches nucléaires de Pilgrim et de Columbia, portant à 73 le nombre total de renouvellements de licence approuvés dans le pays depuis 2000. De plus, 13 demandes de renouvellement de licence sont actuellement à l'examen. En outre, la NRC a approuvé en 2012 six demandes d'augmentation de la puissance et en examine actuellement 16 de plus.

8. Deux réacteurs ont été mis à l'arrêt, temporairement du moins, à cause des effets du vieillissement. Lors d'un arrêt programmé à la centrale de Doel 3 en Belgique, des inspections en service ont vérifié par ultrasons qu'il n'y avait pas de fissuration sous le revêtement de la cuve sous pression du réacteur. Les inspections n'ont permis de relever aucun défaut sous revêtement mais ont mis en évidence de nombreuses anomalies quasi-laminaires dans les parties inférieure et supérieure des enveloppes du cœur. Une inspection similaire effectuée en septembre à Tihange 2 a mis en évidence des anomalies similaires, mais à un degré moindre. En conséquence, les réacteurs Doel 3 et Tihange 2 ont été maintenus à l'arrêt à froid à la fin de l'année, le temps que la compagnie d'électricité procède à une évaluation d'ingénierie pour déterminer si l'un ou/et l'autre des deux réacteurs pouvaient être remis en service de manière sûre.

9. En Belgique, compte tenu du nombre inhabituellement élevé de signes relevés dans les réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2, l'Agence fédérale de contrôle nucléaire a réuni un groupe d'experts internationaux dans les domaines suivants : technologie des cuves de réacteurs, essais non destructifs, mécanismes de fracture, évaluation selon le code ASME XI, évaluation déterministe de la sûreté et évaluation probabiliste de la sûreté.

10. Au Japon, les tranches Ohi 3 et 4 ont été redémarrées en juillet 2012 ; ce sont les deux premières tranches à être remises en service après l'accident de Fukushima Daiichi survenu en mars 2011. Tout au long de l'année, il a été débattu de l'avenir de l'électronucléaire au Japon. Après la victoire aux élections nationales en décembre du parti libéral-démocrate, le nouveau premier ministre, Shinzo Abe, a annoncé que le gouvernement ré-examinerait le bouquet énergétique national dans les années à venir et reverrait la politique en matière d'énergie nucléaire qui avait été annoncée par le gouvernement précédent.

11. L'électronucléaire reste une option importante pour accroître la production d'électricité dans les pays dont les besoins en énergie augmentent, et des mesures importantes ont été prises en 2012 par les pays qui envisagent l'option nucléaire. Le 18 juillet 2012, les Émirats arabes unis sont devenus le

premier pays en 27 ans à lancer le chantier de leur première centrale nucléaire, lorsque la Société de l'énergie nucléaire des Émirats arabes unis (ENEC) a procédé à la première coulée de béton, après avoir reçu de l'Autorité fédérale de réglementation nucléaire une licence de construction. La tranche Barakah 1 doit en principe être mise en service en 2017 et trois tranches supplémentaires sont prévues pour 2020.

12. Plusieurs autres pays ont pris des mesures concrètes en 2012 en vue de construire leur première centrale nucléaire. En juin 2012, le Bélarus a accueilli une mission INIR (Examen intégré de l'infrastructure nucléaire) qui a conclu que le pays serait bientôt prêt à se doter d'un programme électronucléaire. Le Bélarus a signé en juillet 2012 un contrat avec la société russe Atomstroyexport pour les travaux de terrassement du site et pour construire deux réacteurs de puissance refroidis et modérés par eau (VVER). La Turquie, qui a signé en 2010 un contrat de construction de quatre tranches VVER 1200 sur le site d'Akkuyu, progresse aussi avec son programme. Elle a aussi annoncé à la session de 2012 de la Conférence générale qu'elle envisageait de construire une deuxième centrale sur le site de Sinop et qu'elle était en négociation avec des vendeurs. D'autres pays ont aussi confirmé qu'ils avaient l'intention de poursuivre avec la mise au point d'un programme électronucléaire national ; ils ont continué à mettre en place une infrastructure et envisagent de conclure éventuellement des arrangements contractuels. Quelques autres États Membres se préparent activement pour se doter d'un programme électronucléaire mais ils n'ont pas encore pris la décision définitive de passer à la phase de mise en œuvre.

13. En plus du Bélarus, deux autres missions INIR ont été menées en 2012, l'une en Jordanie et l'autre au Vietnam. La mission de suivi INIR effectuée en janvier en Jordanie a permis d'examiner le plan d'action national élaboré à la suite des recommandations faites lors de la première mission INIR en août 2009. On a noté que des progrès avaient été faits en Jordanie depuis 2009, surtout dans les activités liées au projet de centrale nucléaire. La mission INIR au Vietnam a été menée à bien en décembre.

14. Les missions INIR de l'Agence s'inscrivent dans un ensemble de services à l'appui du développement énergétique durable. Outre les missions INIR, l'Agence aide les États Membres intéressés à accroître leurs capacités d'analyse et de planification de leur système énergétique national ; elle aide aussi ceux qui se sont dotés d'un programme électronucléaire ou qui envisagent cette option, à accroître les capacités de planification stratégique à long terme de leur système électronucléaire. En 2012, les outils de l'Agence pour l'analyse et la planification des systèmes énergétiques nationaux ont été utilisés dans plus de 125 États Membres. Plus de 650 analystes et planificateurs du secteur énergétique de 69 pays ont été formés à l'utilisation de ces outils. Dans le cadre de la planification stratégique à long terme de systèmes d'énergie nucléaire, le Projet international de l'Agence sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) offre une méthodologie, d'autres outils, une formation et une assistance pour effectuer des évaluations des systèmes d'énergie nucléaire (NESA). En 2011–2012, des NESA étaient entreprises, ou se poursuivaient, au Bélarus, en Indonésie, au Kazakhstan et en Ukraine.

15. L'Agence optimise son assistance en matière de formation en coopérant avec des centres nationaux à travers le monde. En juillet, elle a signé un arrangement pratique avec l'institut international d'enseignement nucléaire (KINGS) de la Compagnie d'électricité de Corée (KEPCO). La mission de cet institut est de faciliter l'accès, pour les étudiants et les employés étrangers, au système coréen de formation théorique et pratique sur les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire. L'arrangement pratique pose les bases d'une coopération en ce qui concerne le recrutement d'étudiants internationaux, le programme d'études et le fonctionnement du programme de séminaires et de vulgarisation. En octobre 2011, l'Agence a signé avec l'Autorité chinoise de l'énergie atomique un arrangement pratique de coopération dans le domaine de la sûreté de construction de centrales

nucléaires. Cet arrangement prévoit une collaboration renforcée dans ce domaine entre l'Agence et le Centre international de formation à la construction en Chine.

16. Environ 82 % des réacteurs commerciaux en exploitation sont des réacteurs modérés et refroidis par eau ordinaire, 11 % des réacteurs modérés et refroidis par eau lourde, 3 % des réacteurs refroidis par gaz et 3 % des réacteurs refroidis par eau et modérés par graphite (Fig. A-3). Deux réacteurs sont modérés et refroidis par métal liquide.

Nombre de réacteurs

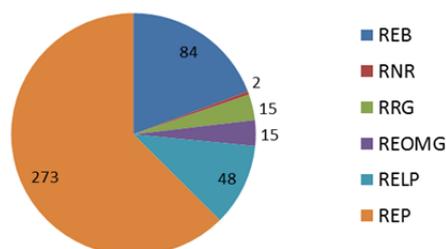


FIG. A-3. Répartition actuelle des types de réacteurs. (REB : réacteur à eau bouillante ; RNR : réacteur à neutrons rapides ; RRG : réacteur refroidi par gaz ; REOMG : réacteur à eau ordinaire modéré au graphite ; RELP : réacteur à eau lourde sous pression ; REP : réacteur à eau sous pression).

17. Bien que le secteur ait toujours par le passé recherché les économies d'échelle, les réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP) suscitent de plus en plus d'intérêt, en partie parce qu'ils permettent des investissements moindres, plus souples et graduels avec le temps. « Faible » signifie moins de 300 MWe. « Moyenne » signifie entre 300 et 700 MWe. Quelque 45 concepts innovants de RFMP sont à différents stades de recherche-développement. Un certain nombre d'entre eux sont présentés dans les paragraphes suivants.

18. L'Argentine met au point le réacteur CAREM 25, modèle de REO sous pression de type intégré de faible puissance, avec tous les composants du circuit primaire à l'intérieur de la cuve du réacteur et une puissance électrique de 150 à 300 MWe. Les travaux de terrassement du site pour un prototype de centrale CAREM de 27 MWe ont démarré en septembre 2011.

19. En Chine, la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) met au point l'ACP100, un petit réacteur avancé intégré à eau sous pression de 100 MW(e), qui pourra aussi servir à la production de chaleur et au dessalement de l'eau de mer. Elle travaille également à la conception de l'ACP600, un réacteur avancé à eau sous pression à deux boucles de 600 MW(e) qui convient aux réseaux électriques de faible capacité.

20. En France, le Groupe DCNS met au point Flexblue, un concept modulaire de petite unité et transportable de 160 MWe. Fonctionnant au fond des mers, ce réacteur refroidi par eau utilise des technologies navales, offshore et nucléaires passives pour tirer profit de la mer, qui constitue une source froide infinie et disponible en permanence.

21. Au Japon, un REO de 350 MWe avec circuit primaire intégré appelé réacteur modulaire intégré (RMI) a été mis au point. Des tests de validation, des travaux de recherche-développement pour les composants et les méthodes de conception, et la mise au point d'un modèle de base sont exigés avant l'octroi de la licence. En outre, le Japon met au point le 4 S, réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium liquide, sans rechargement sur place. Ce concept offre actuellement deux niveaux de puissance, 30 MWth et 135 MWth.

22. Le modèle de réacteur avancé modulaire intégré (SMART) de la République de Corée a une capacité thermique de 330 MWth et est destiné au dessalement nucléaire. Le modèle type a été approuvé par Commission nationale de la sûreté nucléaire en 2012.

23. La Fédération de Russie construit deux réacteurs KLT-40S de 35 MWe montés sur barge qui sont destinés à la cogénération (production d'électricité et de chaleur industrielle). Le type KLT-40S est basé sur le modèle commercial du réacteur de propulsion navale KLT-40 et est une variante avancée du réacteur qui alimente les brise-glaces nucléaires. Le réacteur ABV-6M de 8,6 MWe en est au stade de la conception détaillée. Il s'agit d'un réacteur à eau ordinaire sous pression de type intégré à circulation naturelle du caloporteur primaire. Le réacteur RITM-200 de 8,6 MWe, actuellement au stade de la conception détaillée, est un réacteur de type intégré à circulation forcée destiné aux brise-glaces nucléaires. La Fédération de Russie envisage aussi de construire plusieurs réacteurs SVBR-100 en 2013. Le SVBR-100 est un petit réacteur à neutrons rapides innovant dont le caloporteur est un alliage au plomb (eutectique plomb bismuth) et dont la puissance est de 100 MWe.

24. Aux États-Unis, quatre petits réacteurs modulaires (SMR) à eau sous pression de type intégré sont à l'étude : le mPower, le NuScale, le SMR de Westinghouse et le SMR 160 de Holtec. Le mPower est composé de deux à six modules de 180 MWe. NuScale Power envisage de commercialiser une centrale nucléaire comprenant jusqu'à 12 modules de 45 MWe. Le SMR de Westinghouse est un modèle conceptuel de 225 MWe incluant des systèmes de sûreté passive et des composants éprouvés de l'AP-1000. Les études ont aussi démarré sur un modèle plus récent de SMR, le SMR 160, réacteur de 160 MWe fonctionnant en convection naturelle et ne nécessitant donc ni pompe pour le refroidissement, ni sources d'alimentation électrique externes. GE-Hitachi est en train de mettre au point PRISM, un réacteur surgénérateur à neutrons rapides à métal liquide de 311 MWe, avec enceinte enterrée sur isolateurs sismiques et système passif de refroidissement par air en tant que source froide ultime.

25. En Inde, Le réacteur avancé à eau lourde (RAEL) de 304 MWe, mis au point par le Centre de recherche atomique Bhabha (BARC) en est à la phase de conception détaillée. Il utilisera du combustible à mélange d'oxydes (MOX) d'UFE et de thorium et intégrera des tubes de force verticaux et des dispositifs de sauvegarde. Le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe (PFBR-500) en est au stade final de construction à Kalpakkam. Les mise en service et démarrage sont prévus pour le premier trimestre 2013. L'Inde a aussi quatre RELP de 700 MWe et un RSNR de 500 MWe actuellement en construction.

26. Bien que la production d'électricité soit de loin la fonction principale des réacteurs en exploitation actuellement, un certain nombre d'entre eux servent aussi au dessalement, à la production de chaleur industrielle et au chauffage urbain (Fig A-4). Parmi les autres utilisations non électriques possibles à l'avenir, on peut citer : la production d'hydrogène pour, premièrement, améliorer les ressources pétrolières de faible qualité comme les sables bitumineux tout en compensant les émissions de carbone associées au reformage du méthane à la vapeur, deuxièmement, appuyer la production à grande échelle de combustibles liquides synthétiques à partir de la biomasse, du charbon ou d'autres sources de carbone et, troisièmement, servir directement de combustible pour véhicules, le plus probablement des véhicules utilitaires légers hybrides rechargeables à pile à hydrogène.

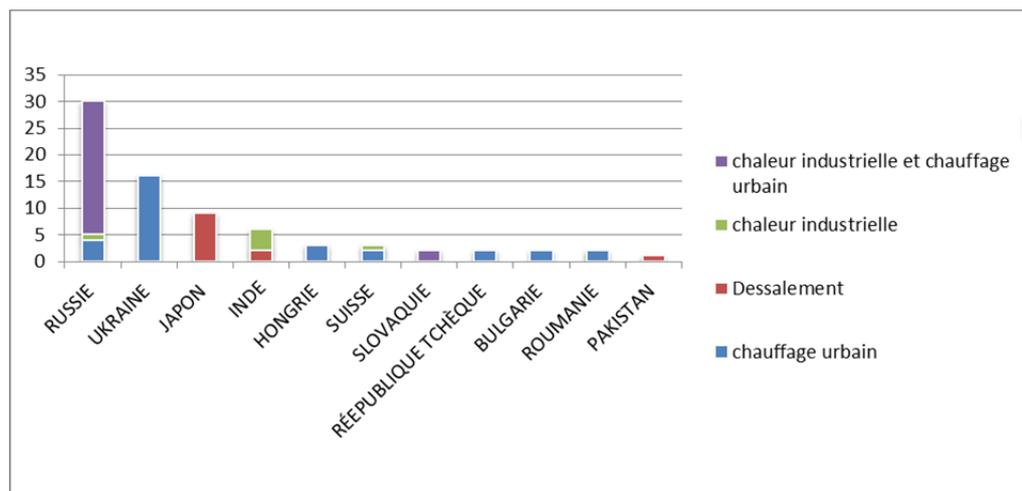


FIG. A-4. Nombre de réacteurs actuellement utilisés pour des applications non électriques et pour la production d'électricité.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2012)^a

Pays	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2012		Expérience d'exploitation totale en 2012	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
Afrique du Sud	2	1 860			12,4	5,1	56	3
Allemagne	9	12 068			94,1	16,1	790	2
Argentine	2	935	1	692	5,9	4,7	68	7
Arménie	1	375			2,1	26,6	38	4
Belgique	7	5 927			38,5	51	254	7
Brésil	2	1 884	1	1 245	15,2	3,1	43	3
Bulgarie	2	1 906			14,9	31,6	153	3
Canada	19	13 500			89,1	15,3	634	5
Chine	17	12 860	29	28 844	92,7	2	141	7
Corée, République de	23	20 739	4	4 980	143,5	30,4	404	1
Émirats arabes unis			1	1 345				
Espagne	8	7 560			58,7	20,5	293	6
États-Unis d'Amérique	104	102 136	1	1 165	770,7	19	3 834	8
Fédération de Russie	33	23 643	11	9 297	166,3	17,8	1 091	4
Finlande	4	2 752	1	1 600	22,1	32,6	135	4
France	58	63 130	1	1 600	407,4	74,8	1 874	4
Hongrie	4	1 889			14,8	45,9	110	2
Inde	20	4 391	7	4 824	29,7	3,6	377	3
Iran, République islamique d'	1	915			1,3	0,6	1	4
Japon	50	44 215	2	2 650	17,2	2,1	1 596	4
Mexique	2	1 530			8,4	4,7	41	11
Pakistan	3	725	2	630	5,3	5,3	55	8
Pays-Bas	1	482			3,7	4,4	68	0
République tchèque	6	3 804			28,6	35,3	128	10
Roumanie	2	1 300			10,6	19,4	21	11
Royaume-Uni	16	9 231			64	18,1	1 511	8
Slovaquie	4	1 816	2	880	14,4	53,8	144	7
Slovénie	1	688			5,2	36	31	3
Suède	10	9 395			61,5	38,1	402	6
Suisse	5	3 278			24,4	35,9	189	11
Ukraine	15	13 107	2	1 900	84,9	46,2	413	6
Total ^{b, c}	437	372 069	67	64 252	2 346,2		15 246	9

^a. Données tirées du Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'AIEA

^b. Note : Le total inclut les chiffres suivants pour Taïwan (Chine) :

6 réacteurs (5 028 MWe) en service ; 2 réacteurs (2 600 MWe) en construction ;

40,4 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 19% de la production électrique totale.

^c. L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (81 ans), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) et à Taïwan (Chine) (188 ans et un mois).

A.2. L'avenir de l'électronucléaire

27. L'accident de Fukushima Daiichi devrait ralentir ou retarder la croissance électronucléaire, mais pas l'inverser. Chaque année, l'Agence publie deux projections actualisées, une basse et une haute, de la croissance mondiale de l'électronucléaire. L'actualisation 2012 des projections haute et basse indique une hausse de la capacité électronucléaire de 23 % d'ici à 2030 dans la projection basse et de 100 % dans la projection haute. Toutefois, le taux de croissance est plus lent que celui qui a été projeté en 2011, en particulier dans la projection basse.

28. La projection haute suppose que les crises financière et économique actuelles seront surmontées assez rapidement et que les anciens taux de croissance économique et de demande d'électricité reviendront, notamment en Extrême-Orient. Elle suppose aussi l'application au niveau mondial de politiques rigoureuses de lutte contre le changement climatique. La projection basse suppose que les tendances actuelles se poursuivront avec peu de changements des politiques affectant l'électronucléaire. Elle ne suppose pas que tous les objectifs nationaux fixés pour l'électronucléaire seront atteints. C'est une projection prudente mais plausible. Les projections sont effectuées au niveau régional plutôt que national. La projection basse pour 2012 prend en compte une éventuelle baisse de la part de l'électronucléaire dans le bouquet énergétique du Japon.

29. Dans la projection basse, la puissance électronucléaire mondiale installée passe à 456 GWe en 2030, soit 9 % de moins que ce qui a été projeté l'année précédente. Dans la projection haute actualisée, la puissance nucléaire installée en 2030 atteint 740 GWe, soit une hausse qui fait environ 1 % de moins que la hausse projetée en 2011. Par rapport aux projections précédentes qui ne prenaient pas en compte l'accident de Fukushima Daiichi, la projection basse a été réduite de 16 % tandis que la projection haute affiche une baisse plus modérée de 8 %. La projection basse indique un retard de 10 ans par rapport à la croissance prévue avant Fukushima ; la capacité qui avait été projetée pour 2020 avant l'accident est à présent projetée pour 2030.

30. La croissance s'observera essentiellement dans les régions qui exploitent déjà des centrales nucléaires. La croissance projetée est la plus forte en Extrême-Orient – de 83 GWe à la fin de 2012, la capacité nucléaire atteint 153 GWe en 2030 dans la projection basse et 274 GWe dans la projection haute. C'est en Europe occidentale que l'écart entre les projections basse et haute est le plus grand. Dans la projection basse, la capacité électronucléaire de cette région chute de 114 GWe à la fin de 2012 à 70 GWe en 2030. Dans la projection haute, elle atteint 126 GWe. En Amérique du Nord, la projection basse affiche une légère baisse de capacité, qui passe de 115 GWe à la fin de 2012 à 111 GWe en 2030. La projection haute annonce une augmentation, jusqu'à 148 GWe.

31. Les autres régions ayant d'importants programmes électronucléaires sont l'Europe orientale, le Moyen-Orient et l'Asie du Sud. L'électronucléaire se développe dans ces régions à la fois dans les projections basse et haute – atteignant des niveaux de 2 à 4 GWe de moins que ceux qui ont été projetés avant l'accident.

L'électronucléaire et le développement durable

32. L'énergie joue un rôle central dans la réalisation des objectifs de développement durable. Les choix que les pays feront dans les années qui viennent en ce qui concerne les combustibles et les technologies énergétiques pourraient déterminer dans une large mesure à quel rythme le monde ancrera son avenir dans la durabilité. Une conférence internationale importante, la Conférence des Nations Unies sur le développement durable (connue aussi sous le nom de Rio+20), s'est tenue en juin 2012 à Rio de Janeiro (Brésil) pour examiner les progrès accomplis en matière de développement durable depuis la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (Sommet « Planète Terre ») de 1992 et pour tracer les grandes lignes d'action aux niveaux national, régional et mondial. Le document final de Rio+20, *L'avenir que nous voulons*, définit des voies de développement couvrant un éventail de choix individuels et collectifs et examine plusieurs questions prioritaires, notamment l'accès à l'énergie propre pour tous et l'assurance que l'énergie produite ne contribue pas au changement climatique.

33. En novembre-décembre 2012, la 18^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 18) s'est tenue à Doha (Qatar), parallèlement à la 8^e session de la Conférence des Parties au protocole de Kyoto. Les Parties au protocole de Kyoto sont convenues d'une deuxième période d'engagement, de 2013 à 2020. Sans cet engagement, le monde n'aurait eu aucun accord international prévoyant de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) et, sans limitation de ces émissions, les très faibles émissions imputables à l'énergie d'origine nucléaire ne présentent aucun intérêt économique. Les législations nationales ou régionales limitant ces émissions (comme dans l'UE) auraient été maintenues, mais les avancées pour l'obtention de limites plus strictes et plus étendues auraient été réduites à néant.

34. Face à la multiplication des facteurs influant sur les choix énergétiques, il devient de plus en plus difficile de concevoir des stratégies énergétiques nationales adaptées aux besoins de développement et à la prestation de services énergétiques modernes et durables pour tous. Premièrement, il faut effectuer une évaluation globale de toutes les options possibles pour l'offre et la demande d'énergie en termes d'impacts sociaux, économiques et environnementaux. De nombreux États Membres, en particulier les pays en développement, n'ont pas les compétences et l'expérience voulues pour mettre en place une expertise locale à cette fin. Deuxièmement, les sources d'énergie à bas carbone, comme l'énergie nucléaire, réduisent le plus possible les gaz à effet de serre liés à la production d'énergie et atténuent l'impact négatif du dérèglement climatique sur le développement.

35. Lorsqu'ils examinent les choix énergétiques qui sont les leurs, nombreux sont les pays considèrent l'électronucléaire comme option. L'intérêt dont continue de bénéficier l'électronucléaire s'explique notamment par l'augmentation de la demande mondiale en énergie mais aussi par les préoccupations liées au changement climatique, aux prix instables des combustibles fossiles et à la sécurité des approvisionnements énergétiques.

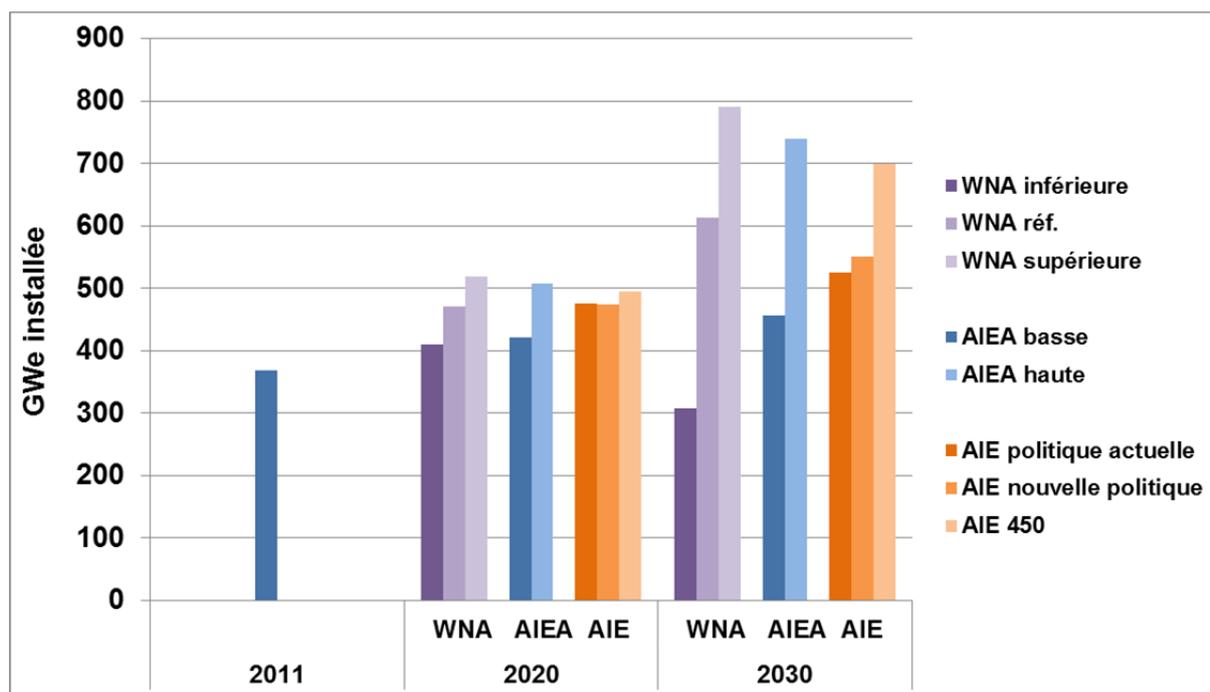


FIG. A-5. Comparaison des projections de l'électronucléaire effectuées par l'AIEA (bleu), l'Association nucléaire mondiale (WNA) dans son rapport « *The Global Nuclear Fuel Market* » pour 2011 (violet) et l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans « *Perspectives énergétiques mondiales 2012* » (orange).

36. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) publie aussi des projections de la croissance électronucléaire mondiale. Le rapport de l'AIE *Perspectives énergétiques mondiales 2012* prévoit, dans le cadre de son « scénario nouvelles politiques », que la capacité de production nucléaire mondiale atteindra quelque 550 GWe en 2030. Cette prévision de l'AIE est inférieure de 7 % à celle de l'an dernier et est comparable à la baisse affichée dans la projection basse de l'AIEA par rapport à l'édition précédente. La figure A-5 compare les projections 2012 de l'Agence, les scénarios 2012 de l'AIE et les projections 2011 de l'Association nucléaire mondiale (WNA). Les scénarios de projection haute de ces trois organisations donnent des résultats similaires, de même que les scénarios de projection basse de l'AIEA et de l'AIE.

A.3. Cycle du combustible³

A.3.1. Ressources et production d'uranium

37. En 2012, l'Agence et l'AEN de l'OCDE ont publié la dernière édition du « Livre rouge », *Uranium 2011 : Ressources, production et demande*. L'édition de 2011 a estimé à 5,3 millions de tonnes (Mt d'U) les ressources classiques identifiées d'uranium dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kg d'U. Ce chiffre est inférieur de 1,4 % à l'estimation donnée dans l'édition précédente (publiée en 2010). En outre, les ressources récupérables à des coûts compris entre 130 et 260 \$/kg d'U étaient évaluées à 1,8 Mt d'U, ce qui porte à 7,1 Mt d'U le total des ressources classiques identifiées dont le coût de récupération est inférieur à 260 \$/kg d'U. Le prix de

³ On trouvera de plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant le cycle du combustible dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2012>) et à l'adresse suivante : www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste.

l'uranium au comptant, après avoir atteint son plus haut niveau sur deux ans au début de 2011, a baissé à la suite de l'accident de Fukushima et a fini l'année à 135 \$/kg d'U. Au second semestre de 2012, les prix au comptant étaient tombés à 110 \$/kg d'U en raison de l'incertitude entourant le programme nucléaire du Japon, mais ils ont terminé l'année à environ 115 \$/kg d'U. Les prix à long terme de l'uranium sont cependant demeurés aux alentours de 158 \$/kg d'U.

38. Les ressources totales non découvertes (ressources pronostiquées et spéculatives) indiquées dans le Livre rouge dépassaient 10,43 Mt d'U, soit une légère hausse par rapport aux 10,40 Mt d'U indiquées dans l'édition précédente. Les ressources classiques non découvertes étaient estimées à plus de 6,2 Mt d'U d'un coût inférieur à 130 \$/kg d'U, plus 0,46 Mt d'U supplémentaire d'un coût variant entre 130 et 260 \$/kg d'U. Selon les estimations, il y aurait en outre 3,7 Mt d'U de ressources spéculatives dont les coûts de production n'avaient pas encore été précisés.

39. Des ressources supplémentaires ont été signalées en 2011 dans un grand nombre de gisements d'uranium en Afrique — à savoir au Botswana, au Malawi, au Mali, en Namibie, en République islamique de Mauritanie, en République-Unie de Tanzanie et en Zambie — où les activités de prospection d'uranium sont restées soutenues. Une étude de faisabilité est entreprise actuellement pour le projet de la rivière Mkuju en République-Unie de Tanzanie. Le Comité du patrimoine mondial de l'UNESCO a approuvé une modification de la délimitation de la réserve tanzanienne de Selous, ce qui ouvre la voie à la mise en valeur du site uranifère de la Mkuju. Toutefois, la société Uranium One doit encore demander un permis d'exploitation minière pour ce projet de mine. Des ressources supplémentaires ou nouvelles ont également été signalées en 2012 pour la Colombie, le Guyana, le Paraguay, le Pérou et la Suède.

40. Les ressources non classiques d'uranium et le thorium viennent s'ajouter à cette base de ressources. Les ressources non classiques comprennent notamment l'uranium potentiellement récupérable associé à des phosphates, à des minerais non ferreux, à la carbonatite, au schiste noir et au lignite, qui sont des ressources à partir desquelles l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit mineur, ainsi que l'uranium provenant de l'eau de mer. Actuellement, très peu de pays notifient les ressources non classiques. Selon les estimations actuelles, la quantité d'uranium potentiellement récupérable est de l'ordre de 8 Mt d'U. Uranium Equities a annoncé que son installation mobile de démonstration pour la récupération d'uranium à partir d'acide phosphorique par la technique de l'échange d'ions (procédé PhosEnergy) a commencé à être testée en juin 2012. En septembre 2012, elle a fait savoir que les essais de fonctionnement avaient été probants et que plus de 90 % de l'uranium avait été récupéré au cours de l'opération. Une étude technique sur le procédé PhosEnergy a été commandée.

41. Le gouvernement finlandais a, en mars 2012, accordé une autorisation pour l'extraction d'uranium en tant que sous-produit à la mine de nickel de Talvivaara exploitée par la compagnie minière Talvivaara à Sotkamo, dans l'est de la Finlande (Fig. A-6). Pour que l'on puisse commencer à produire de l'uranium, il faut encore que l'Agence administrative régionale de l'État pour le nord de la Finlande délivre un permis environnemental et le Centre de radioprotection et de sûreté nucléaire un permis de démarrage. La société Cameco fournit une assistance technique à Talvivaara pour la conception, la construction, la mise en service et l'exploitation du circuit d'extraction de l'uranium. Les ressources non classiques sont de 22 000 tonnes d'U.



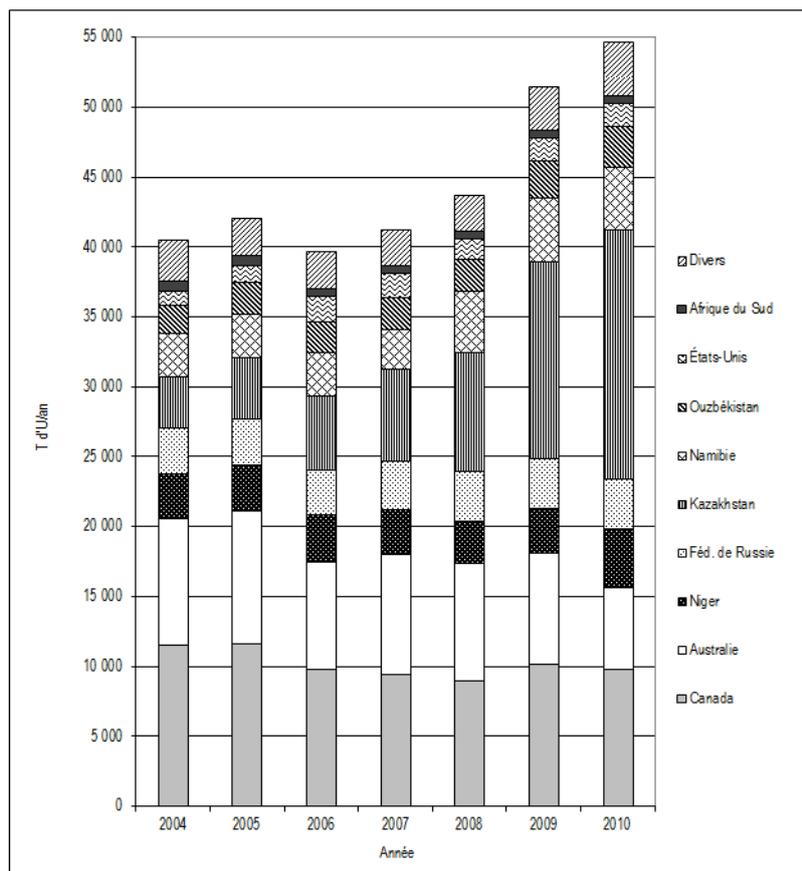
FIG. A-6. Mine d'uranium de Talvivaara (Finlande).

42. Les ressources mondiales de thorium sont estimées à 6-7 millions de tonnes. Bien que le thorium ait été utilisé comme combustible dans le cadre d'une démonstration, il reste encore beaucoup à faire avant de pouvoir le considérer comme susceptible de remplacer l'uranium. Au Canada, Candu Énergie a signé un accord avec trois filiales de la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) en août 2012 en vue d'étendre leur coopération pour l'étude du recours au thorium et à l'uranium recyclé comme combustibles de remplacement pour les nouveaux réacteurs CANDU. Cet accord marque la troisième phase de la coopération entre le Canada et la Chine, qui a commencé en 2008.

43. L'eau de mer en tant que source d'uranium non classique a fait l'objet d'études étendues. Aux États-Unis, le Laboratoire national d'Oak Ridge a indiqué qu'il avait mis au point de nouveaux matériaux adsorbants. On irradie des nattes de fibres HiCap, caractérisées par une grande superficie, puis on les fait réagir avec des composés chimiques ayant une affinité pour l'uranium. Ces fibres possédaient une capacité d'adsorption cinq fois plus élevée, adsorbaient plus rapidement et présentaient une sélectivité supérieure. Des chercheurs de l'Université d'Alabama expérimentent l'utilisation de fibres à base de chitine – biopolymère à chaîne longue qui peut être extrait de carapaces de crevettes.

44. Les données concernant les dépenses de prospection et de mise en valeur de mines dans le monde sont indiquées dans le Livre rouge jusqu'en 2010 inclus. Elles ont atteint 2,076 milliards de dollars en 2010, en augmentation de 22 % par rapport aux chiffres de 2008 indiqués dans l'édition précédente du Livre rouge.

45. La production d'uranium en 2010, année la plus récente prise en compte dans le Livre rouge, s'est établie à 54 670 t d'U (Fig. A-7). L'Australie, le Canada et le Kazakhstan représentaient 62 % de la production mondiale. Ces trois pays plus les États-Unis, la Fédération de Russie, la Namibie, le Niger et l'Ouzbékistan en représentaient 92 %. La WNA évalue la production à 54 610 t d'U en 2011 et à 52 222 t d'U en 2012.



Note : les chiffres pour l'Inde, la Namibie, le Pakistan et la Roumanie sont des estimations

FIG. A-7. Production mondiale récente d'uranium (Source : Uranium 2011 : Ressources, production et demande).

46. La lixiviation in situ (LIS)⁴ a dépassé l'extraction souterraine comme principale méthode de production en 2009 et sa part dans la production mondiale totale devrait continuer d'augmenter à l'avenir. En 2012, il y a eu plusieurs agrandissements de mines LIS au Kazakhstan, qui ont porté sa production annuelle à quelque 2 250 t d'U.

47. Seules quelques mines d'uranium ont commencé à produire ces dernières années (par exemple en Australie en 2011 et au Niger en 2010). Un centre de production par LIS est en construction à Khiagda (Fédération de Russie) depuis 2010. L'infrastructure ferroviaire a été modernisée et une nouvelle usine de traitement et des installations de production d'acide sulfurique ont été achevées. Ce centre sera capable de produire 1 800 t d'U par an d'ici 2018. En Namibie, la troisième phase d'agrandissement de la mine de Langer Heinrich de la société Paladin a été achevée en 2012 et a porté sa production annuelle à 2 000 t d'U. La quatrième phase d'agrandissement fera passer sa production annuelle à 3 900 t d'U. En raison de la situation actuelle du marché, Areva a retardé la mise en valeur de la mine de Trekkopje en Namibie.

48. En Australie, l'interdiction qui empêchait l'extraction d'uranium dans le Queensland depuis 1982, lorsque la mine de Mary Kathleen a cessé de produire, a été levée par le gouvernement de l'État en octobre 2012. En Australie méridionale, la société Quasar Resources a annoncé qu'elle

⁴ La méthode classique, ou souterraine, consiste à extraire le minerai du sol, puis à le traiter pour en retirer les minéraux recherchés. Dans le cas de la LIS, on laisse le minerai en place dans le sol et on en extrait les minéraux en les dissolvant à l'aide d'une solution de lixiviation qui est ensuite pompée vers la surface où les minéraux peuvent être récupérés dans la solution. En conséquence, la surface n'est guère perturbée et aucun résidu ou stérile n'est produit.

commencera les opérations d'extraction par LIS dans les gisements de Four Mile East et de Four Mile West en 2013. En août 2012, BHP Billiton a annoncé qu'elle étudiera une solution de remplacement moins capitalistique pour la conception de l'agrandissement de la mine à ciel ouvert d'Olympic Dam afin d'améliorer l'économie du projet. En conséquence, la société n'a pas été en mesure d'approuver l'agrandissement d'Olympic Dam avant le délai du 15 décembre 2012 fixé dans l'accord. En Australie occidentale, la mine d'uranium de Wiluna de Toro Energy a obtenu l'approbation environnementale définitive du gouvernement de l'État.

49. Au Canada, AREVA Resources a obtenu l'approbation environnementale en août 2012 pour son projet concernant le gisement de Midwest. Ce projet prévoit la mise en valeur d'une mine à ciel ouvert, la construction d'une route réservée au transport entre la mine de Midwest et l'usine de McClean Lake et un accroissement de la capacité de production de l'usine JEB à McClean Lake conformément à la cadence de traitement prévue du minerai de la mine de Midwest.

50. Aux États-Unis, la construction des installations de LIS de l'Uranerz Energy Corporation à Nichols Ranch dans le Wyoming a débuté en août 2012. Uranerz a annoncé en novembre 2012 qu'elle disposait de toutes les autorisations et licences réglementaires pour l'aménagement et l'exploitation de la mine de Nichols Ranch. En octobre 2012, Ur-Energy a obtenu l'approbation réglementaire définitive pour la mine d'uranium de Lost Creek. Par ailleurs, l'Uranium Energy Corp a obtenu tous les permis nécessaires pour la mise en exploitation par LIS de sa mine d'uranium de Goliad dans le sud du Texas. Toutefois, une exemption d'aquifère⁵ doit encore être obtenue avant que les activités de récupération de l'uranium puissent être entreprises.

51. En 2012, la production d'uranium n'a couvert qu'environ 77 % des besoins estimés des réacteurs dans le monde (67 990 t d'U)⁶, le reste l'ayant été grâce à cinq sources secondaires : les stocks militaires d'uranium naturel, les stocks d'uranium enrichi, l'uranium retraité provenant de combustible usé, le combustible à mélange d'oxydes (MOX), dans lequel l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium provenant de combustible usé retraité, et le réenrichissement de résidus d'uranium appauvri. Au rythme de consommation estimé pour 2012, les 5,3 Mt d'U devraient durer 78 ans. Cela soutient avantageusement la comparaison avec les réserves d'autres matières premières (cuivre, zinc, pétrole et gaz naturel, par exemple), dont la durée varie entre 30 et 50 ans.

A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible

52. Six pays (Canada, Chine, États-Unis, Fédération de Russie, France et Royaume-Uni) exploitent à l'échelle commerciale des usines de conversion d'octoxyde de triuranium (U_3O_8) en hexafluorure d'uranium (UF_6) et de petites installations de conversion sont en exploitation en Argentine, au Brésil, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran. Un procédé de volatilisation des fluorures par voie sèche est utilisé uniquement aux États-Unis, toutes les autres installations de conversion utilisant un procédé par voie humide. La capacité annuelle mondiale de conversion est restée aux alentours de 76 000 tonnes d'uranium naturel (t d'U sous forme d' UF_6). Il faut cependant s'attendre à ce que cela change beaucoup avec la construction d'usines nouvelles en France (Comurhex II d'AREVA (Fig. A-8)) et aux États-Unis (usine Metropolis de Honeywell). La demande totale de

⁵ Un élément important de la Loi fédérale des États-Unis sur l'eau potable réside dans le fait qu'elle permet d'extraire des minéraux par LIS dans certaines parties de couches géologiques qui peuvent aussi être exploitées pour l'approvisionnement en eau potable. L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis doit délivrer une exemption d'aquifère pour chaque site minier avant qu'une récupération par LIS puisse avoir lieu.

⁶ WNA - World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements, avril 2012 (<http://worldnuclear.org/info/reactors0412.html>). Page consultée le 7 mai 2012.

services de conversion (pour une teneur de rejet des usines d'enrichissement⁷ de 0,25 % d'uranium 235) est actuellement de l'ordre de 60 000 à 64 000 t d'U/an. La construction d'une nouvelle usine au Kazakhstan dans le cadre d'une entreprise commune entre Kazatomprom et la société canadienne Cameco devrait débiter d'ici 2018. Cette usine sera implantée sur le même site que l'usine métallurgique Ulba à Ust-Kamenogorsk. Elle devrait avoir une capacité de production annuelle de 12 000 t d'UF₆.



FIG. A-8. Usine de conversion COMURHEX II en construction en France. Sa mise en service progressive devrait intervenir en 2013-2014.

53. La capacité mondiale d'enrichissement est actuellement d'environ 65 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande annuelle totale d'environ 45 millions d'UTS. Des usines commerciales sont en service en Chine (CNNC), en France (AREVA), en Fédération de Russie (Société nationale d'énergie atomique Rosatom) et aux États-Unis (USEC et Groupe URENCO). Le Groupe URENCO exploite des usines de centrifugation en Allemagne, aux États-Unis, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni (Fig. A-9). Il existe aussi de petites installations d'enrichissement en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran.



FIG. A-9. Installation d'enrichissement de l'URENCO à Capenhurst (Royaume-Uni)

54. Deux nouvelles installations industrielles d'enrichissement par centrifugation sont en projet, toutes deux aux États-Unis : l'installation d'AREVA à Eagle Rock et l'American Centrifuge Plant. Un permis a été délivré en septembre 2012 pour la construction par Global Laser Enrichment,

⁷ La teneur de rejet, c'est-à-dire la concentration d'uranium 235 dans la fraction appauvrie, détermine indirectement le volume de travail requis sur une quantité d'uranium donnée afin d'obtenir une teneur donnée dans le produit. Une augmentation de la teneur de rejet associée à une quantité déterminée et une teneur déterminée de l'uranium enrichi produit se traduit par une baisse du volume d'enrichissement requis mais accroît les besoins en uranium naturel et en conversion, et vice-versa. La teneur de rejet peut varier considérablement et modifiera la demande de services d'enrichissement.

filiale de GE-Hitachi, d'une installation industrielle d'enrichissement par laser en Caroline du Nord (États-Unis). Cette usine devrait pouvoir produire 6 millions d'UTS par an et enrichir l'uranium jusqu'à 8 % en poids en uranium 235.

55. L'Argentine reconstitue ses capacités d'enrichissement par diffusion gazeuse à Pilcaniyeu. Elle importe actuellement des services d'enrichissement des États-Unis.

56. En France, l'usine Georges Besse d'enrichissement par diffusion d'EURODIF, qui était en service depuis 1979, a fermé en juin 2012. Elle est remplacée par l'usine Georges Besse II, située sur le même site, mais avec une composition différente des actionnaires. Sa capacité installée est actuellement de 1,5 million d'UTS/an et il est prévu de la porter à 7,5 millions d'UTS d'ici 2016. AREVA est l'actionnaire majoritaire des deux entreprises.

57. La Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) a mis en service commercial des cascades de centrifugeuses améliorées au village de Rokkasho, dans la préfecture d'Aomori, en mars 2012. L'extension de sa capacité pour la porter de 150 000 à 1,5 million d'UTS/an et la construction au Japon d'une nouvelle usine faisant appel à la technologie russe de centrifugation en vertu d'un accord entre Rosatom et Toshiba sont à l'examen.

58. La capacité mondiale de déconversion⁸ est restée d'environ 60 000 t d'UF₆/an en 2012.

59. Aux États-Unis, la NRC a délivré une licence en octobre 2012 à l'International Isotopes Fluorine Products pour la construction et l'exploitation d'une installation de déconversion d'uranium appauvri dans le Nouveau-Mexique. Cette installation, qui s'appellera Fluorine Extraction Process and Depleted Uranium Deconversion Plant (FEP/DUP), fera appel au procédé breveté par la société pour l'extraction du fluor.

60. La demande annuelle de services de fabrication de combustible pour réacteurs à eau ordinaire (REO) s'est maintenue aux alentours de 7 000 t d'uranium enrichi dans les assemblages combustibles, mais devrait atteindre environ 8 000 t d'U par an d'ici 2015. Dans le cas des réacteurs à eau lourde sous pression (REL P), les besoins se sont chiffrés à 3 000 t d'U/an. Il existe actuellement plusieurs fournisseurs en concurrence pour la plupart des types de combustibles. La capacité mondiale de fabrication de combustible s'est maintenue aux alentours de 13 500 t d'U/an (uranium enrichi dans les éléments combustibles et grappes de combustible) pour le combustible des REO et de 4 000 t d'U par an (uranium naturel dans les éléments combustibles et grappes de combustible) pour le combustible des REL P. Dans le cas du combustible à l'uranium naturel destiné aux REL P, l'uranium est purifié et converti en oxyde d'uranium (UO₂) en Argentine, au Canada, en Chine, en Inde et en Roumanie.

61. En Chine, la capacité de production annuelle de l'usine de fabrication de combustible de la CNNC à Yibin était d'environ 600 t d'U en 2012. Celle de l'usine de la CNNC située à Baotou, en Mongolie intérieure, qui fabrique des assemblages combustibles pour les REL P CANDU de Qinshan, est portée actuellement de 200 à 400 t d'U/an. Une nouvelle usine est en construction à Baotou pour la fabrication de combustible destiné aux réacteurs AP1000 de la Chine. Par ailleurs, en 2012, la Société nationale de production de zirconium et d'hafnium pour le nucléaire (WEC) a commencé à mettre en service une nouvelle installation de production d'éponge de zirconium à Nantong (Chine). Cette nouvelle usine produira le zirconium de qualité nucléaire utilisé dans la fabrication des tubes d'assemblages combustibles, en fournissant à la fois le marché chinois par l'intermédiaire de la WEC et le marché mondial par celui de Westinghouse.

⁸ Pour fabriquer du combustible à l'uranium enrichi, il faut reconvertir l'UF₆ en poudre d'UO₂. C'est la première étape de la fabrication de combustible enrichi. Elle est appelée reconversion ou déconversion.

62. L'installation de fabrication de combustible prévue au Kazakhstan, qui devrait avoir une capacité de 1 200 t d'U par an, est une coentreprise entre AREVA et Kazatomprom, dont l'achèvement est fixé à 2014.

63. En Ukraine, la construction d'une usine de fabrication de combustible pour réacteurs WWER-1000, d'une capacité annuelle prévue de 400 t d'U en 2015, a commencé à proximité de Smoline. Cette installation sera construite par la société de combustible TVEL en tant que coentreprise entre la Fédération de Russie et l'Ukraine, dans laquelle cette dernière détiendra 50 % des actions plus une.

64. Les opérations de recyclage d'uranium retraité et de combustible MOX offrent une source d'approvisionnement secondaire en combustible nucléaire. Actuellement, environ 100 t d'uranium retraité par an sont produites pour AREVA à Elektrostal (Fédération de Russie). Une chaîne de l'usine d'AREVA à Romans (France) recycle annuellement environ 80 tonnes de métal lourd (t de ML) d'uranium retraité en combustible destiné aux REO français. La capacité mondiale actuelle de fabrication de combustible MOX avoisine 250 t de ML, les principales installations étant situées en France, en Inde et au Royaume-Uni et quelques installations plus petites en Fédération de Russie et au Japon.

65. L'Inde et la Fédération de Russie fabriquent du combustibles MOX destiné aux réacteurs à neutrons rapides. En Fédération de Russie, une installation de fabrication de combustible MOX pour le réacteur à neutrons rapides BN-800 est en construction à Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26). La Fédération de Russie dispose aussi d'installations pilotes à l'Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires (NIAR) de Dimitrovgrad et à la centrale de Mayak à Ozersk.

66. Ailleurs, on fabrique du combustible MOX destiné à des REO. Au Royaume-Uni, la capacité de l'usine MOX de Sellafield a été ramenée de 128 à 40 t de ML/an et, en août 2011, l'Autorité du déclassement nucléaire a annoncé qu'elle avait réévalué les perspectives de l'usine et qu'elle la fermerait. D'autres usines de fabrication de combustible MOX sont en construction aux États-Unis pour utiliser les surplus de plutonium de qualité militaire. À l'heure actuelle, une trentaine de REO utilisent du combustible MOX dans le monde.

Assurance de l'approvisionnement

67. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'UFE de l'AIEA. En 2012, le Secrétariat de l'Agence a poursuivi les travaux concernant les dispositions financières, juridiques et techniques ainsi que les évaluations de sites aux fins de la création de cette banque. Celle-ci sera située à l'usine métallurgique d'Ulba au Kazakhstan. Des contributions d'un montant de plus de 150 millions de dollars ont été annoncées par des États Membres, l'UE et la Nuclear Threat Initiative (NTI) pour la création de la banque d'UFE. À la fin de 2012, les contributions annoncées par la Norvège (5 millions de dollars), les États-Unis (environ 50 millions de dollars), la NTI (50 millions de dollars) et le Koweït (10 millions de dollars) avaient été entièrement versées ; l'UE avait versé 20 millions d'euros sur les 25 millions promis, et l'on mettait la dernière main aux arrangements nécessaires avec les Émirats arabes unis (10 millions de dollars)⁹.

⁹ Les autres mécanismes d'assurance de l'approvisionnement qui sont actuellement en place sont décrits dans l'édition de 2012 du Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire.

A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible nucléaire

Combustible nucléaire utilisé et retraitement

68. Deux stratégies différentes sont mises en œuvre pour la gestion du combustible nucléaire utilisé. L'une d'elles consiste à le retraiter afin d'en extraire des matières utilisables (uranium et plutonium) pour du combustible neuf. L'autre consiste à considérer le combustible utilisé comme un déchet et à l'entreposer en attendant de le stocker définitivement. Actuellement, des pays comme la France, la Chine, l'Inde et la Fédération de Russie retraitent la majeure partie de leur combustible utilisé, tandis que d'autres, comme le Canada, la Finlande et la Suède ont opté pour le stockage définitif direct. La majorité des pays n'ont pas encore choisi de stratégie. Ils entreposent leur combustible utilisé et se tiennent au courant des faits nouveaux concernant ces deux solutions.

69. Parmi les nouveaux développements à signaler en 2012, qui seront décrits brièvement dans les paragraphes suivants, figurent la demande d'autorisation présentée en Finlande par Posiva pour la construction d'un dépôt, le fait que le Canada a cessé de solliciter les communautés intéressées pour le choix du site du Dépôt pour combustible nucléaire irradié et le Centre d'expertise parce qu'il avait besoin de temps pour répondre pleinement aux 21 expressions d'intérêt déjà soumises et un rapport de la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis dans lequel une nouvelle approche consensuelle pour le choix du site des installations de gestion des déchets nucléaires du pays et un nouvel organisme chargé exclusivement de mettre en œuvre le programme de gestion des déchets ont notamment été recommandés. La mise en œuvre des recommandations de la Commission exigera des modifications importantes de la législation américaine régissant les déchets radioactifs.

70. En 2012, quelque 10 000 t de ML ont été déchargées sous forme de combustible utilisé de tous les réacteurs de puissance en exploitation. En décembre 2012, la quantité totale cumulée de combustible utilisé déchargé dans le monde était d'environ 360 500 t de ML, dont quelque 250 700 t de ML sont entreposées dans des installations situées sur le site ou hors du site de réacteurs. Moins d'un tiers de la quantité cumulée de combustible utilisé qui a été déchargée dans le monde, soit environ 109 800 t de ML, a déjà été retraité. En 2012, la capacité mondiale de retraitement commercial, répartie dans quatre pays (Fédération de Russie, France, Inde et Royaume-Uni), était d'environ 4 800 t de ML/an.

71. En Décembre, Villar de Cañas a officiellement été retenu pour accueillir une installation d'entreposage du combustible nucléaire utilisé en Espagne (Fig. A-10). Ce site a été considéré comme approprié sur les plans de la géologie, de la sismologie, de la météorologie, de l'hydrologie, de sa géométrie et du risque pour les centres de population locaux. L'installation accueillera les châteaux de transport d'assemblages combustibles utilisés qui sont entreposés actuellement dans chacune des centrales nucléaires espagnoles, ainsi que les déchets vitrifiés provenant de la centrale de Vandellós et actuellement entreposés en France.



FIG. A-10. Visualisation de l'installation d'entreposage de combustible usé devant être construite à Villar de Cañas.

72. En Inde, la construction à Kalpakkam de l'installation du cycle du combustible du réacteur à neutrons rapides se poursuit. Les aiguilles de combustible MOX destinées au futur prototype de surgénérateur à neutrons rapides sont en cours de fabrication dans l'Installation de fabrication de combustibles avancés du Centre de recherche atomique Bhabha à Tarapur.

73. Au Japon, la JNFL a annoncé, en septembre 2012, qu'elle poursuivrait la construction de l'usine de retraitement de Rokkasho d'une capacité de 800 t de ML/an, qui avait été interrompue à la suite du séisme et du tsunami du 11 mars 2011. Il est prévu d'achever les travaux en octobre 2013.

74. En République de Corée, l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique a achevé la construction de l'installation PRIDE (démonstration intégrée en inactif du traitement thermique) en juillet 2012 dans le cadre du projet d'installation de démonstration pour le traitement thermique¹⁰ de combustibles usés à oxydes. Les essais de démarrage de l'installation PRIDE ont commencé en août 2012 et se poursuivent par des essais de fonctionnement opérationnels et fonctionnels des systèmes d'exploitation et d'utilités, qu'il est prévu d'achever au début de 2013.

75. Au Royaume-Uni, l'exécution des contrats de retraitement en cours à l'usine de retraitement de combustible THORP de Sellafield devraient s'achever d'ici 2018. L'Autorité de déclassé nucléaire a confirmé que l'on fermerait alors cette installation en vue de son déclassé plutôt que d'effectuer les travaux de développement de l'infrastructure nécessaires pour en prolonger la durée de vie.

Gestion des déchets radioactifs

76. Les déchets radioactifs résultent de l'emploi des techniques nucléaires pour la production d'énergie, des activités de recherche, des applications médicales et industrielles ainsi que des utilisations militaires passées et actuelles. Pour gérer les déchets radioactifs de manière sûre, il faut disposer de capacités d'entreposage suffisantes et finalement les stocker définitivement. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs sont en service

¹⁰ L'expression « traitement thermique » renvoie aux méthodes non aqueuses de retraitement des combustibles nucléaires dans lesquelles les matières sont extraites et affinées sans H₂O à températures élevées.

ou en projet dans le monde entier. En décembre 2012, 464 installations d'entreposage et 154 installations de stockage définitif étaient en service dans le monde¹¹ (Fig. A-11).



FIG. A-11. Installation d'entreposage intermédiaire de déchets HABOG (Pays-Bas).

Estimations des stocks mondiaux

77. Le stock mondial de déchets radioactifs déclarés comme étant entreposés en 2011 (dernière année pour laquelle on dispose de données) était d'environ 68 millions de mètres cubes¹² (tableau A-2). Le volume cumulé de déchets radioactifs stockés définitivement jusqu'en 2011 était d'environ 76 millions de mètres cubes, y compris quelque 29 millions de mètres cubes de déchets liquides injectés dans des puits profonds et environ 4 000 mètres cubes de déchets solides de haute activité provenant principalement de Tchernobyl qui étaient stockés définitivement. L'accumulation annuelle de déchets de haute activité (DHA) traités reste assez constante, avec un taux moyen d'accumulation d'environ 850 mètres cubes par an dans le monde (combustible utilisé non compris).

¹¹ D'après les informations communiquées par les États Membres à la Base de données de l'AIEA sur la gestion des déchets (NEWMDB), accessible en ligne à l'adresse <http://newmdb.iaea.org/>.

¹² Estimations établies à l'aide des données provenant de la NEWMDB de l'AIEA et d'autres sources dans le cas des pays qui n'en communiquent pas à la NEWMDB.

Tableau A-2. Estimation mondiale du stock de déchets radioactifs pour 2011 (données les plus récentes)¹³

Classe de déchets	Entreposage¹⁴ [mètres cubes]	Stockage définitif cumulé [mètres cubes]
Déchets de très faible activité (DTFA)	153 000¹⁵	113 000
Déchets de faible activité (DFA)	56 663 000¹⁶	64 792 000¹⁷
Déchets de moyenne activité (DMA)	8 723 000	10 587 000
Déchets de haute activité (DHA)	2 743 000	72 000¹⁸

Sources : NEWMDB (2012), rapports officiels nationaux et données librement accessibles.

Évolutions nationales concernant les options de stockage définitif

78. De nombreuses installations de stockage définitif de déchets ont été construites et sont exploitées aujourd'hui pour les déchets de très faible, faible et moyenne activité et la construction de certaines installations de stockage définitif de combustible nucléaire usé devrait débuter prochainement. Les installations en service comprennent les installations de stockage définitif en tranchées pour les DTFA (en Espagne, en France et en Suède, par exemple) ou pour les DFA dans les régions arides (comme en Afrique du Sud, en Argentine, aux États-Unis et en Inde) ; les installations construites en surface ou à faible profondeur pour les DFA (par exemple en Chine, en Espagne, en France, en Inde, au Japon, en République tchèque, au Royaume-Uni, en Slovaquie et en Ukraine) ; les installations

¹³ Les chiffres du tableau A-2 sont des estimations et non un compte exact des quantités de déchets radioactifs actuellement gérées dans le monde. En outre, il existe des différences intrinsèques entre les estimations des quantités entreposées d'une année sur l'autre à cause des facteurs suivants : a) variations de masse et de volume au cours du processus de gestion ; b) variations dans les données communiquées et modifications ou corrections apportées à leurs propres données par les États Membres ; et c) adjonction de nouveaux États Membres à la base de données.

¹⁴ Les déchets traités et conditionnés passent par diverses étapes de manipulation durant leur entreposage et avant d'être stockés définitivement. La masse et le volume des déchets radioactifs changent donc continuellement au cours de leur gestion avant stockage définitif. Ceci peut expliquer les écarts constatés dans les quantités estimées de déchets entreposés d'une année sur l'autre.

¹⁵ L'estimation relative aux DTFA est très inférieure à celle concernant les DFA parce que de nombreux États Membres détenant d'importants volumes de déchets n'ont pas défini de classe pour les DTFA. Nombre de ces États Membres sont cependant en train de réévaluer les classes de déchets qu'ils ont définies afin de les aligner davantage sur les classes recommandées dans la publication intitulée « *Classification of Radioactive Waste* » (collection Normes de sûreté de l'AIEA n° GSG-1, 2009), en sorte que ce chiffre augmentera probablement à l'avenir, ce qui conduira à une baisse correspondante dans la catégorie des DFA.

¹⁶ L'estimation concernant les DFA entreposés ne comprend pas environ 4×10^8 m³ de déchets liquides de faible activité contenus dans des réservoirs spéciaux qui ne sont pas isolés du milieu environnant, car ils ne satisfont pas de ce fait à la définition du terme « entreposage » telle qu'elle figure dans le *Glossaire de sûreté de l'AIEA* (2007). C'est la raison pour laquelle la question de savoir si ces déchets doivent être inclus dans cette estimation n'est toujours pas tranchée.

¹⁷ La différence sensible dans l'estimation du volume cumulé de DFA et de DMA stockés définitivement par rapport au rapport précédent tient à l'inclusion des estimations de la Fédération de Russie.

¹⁸ Ce volume de déchets de haute activité inclut à la fois les déchets liquides stockés définitivement qui ont été indiqués par la Fédération de Russie et environ 4 000 m³ de déchets radioactifs solides indiqués par l'Ukraine, qui sont considérés comme entreposés provisoirement en attendant qu'un concept/emplacement ou une solution plus durable ait été trouvé. Le stockage définitif de DHA résultait de l'assainissement d'urgence à la tranche 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl.

construites sous la surface pour les déchets de faible et moyenne activité (DFMA) (en Suède et en Finlande, par exemple) ; les puits de stockage définitif de DFA utilisés aux États-Unis ; et les installations de stockage géologique destinées à recevoir des DFMA (en Allemagne et aux États-Unis, par exemple). Les options de stockage définitif pour les déchets de matières radioactives naturelles varient suivant les réglementations nationales et vont des installations de stockage définitif en tranchées aux installations construites sous la surface (en Norvège, par exemple).

79. Pour les sources scellées retirées du service, les options de stockage définitif comprennent leur stockage avec d'autres déchets dans des installations appropriées ou leur stockage dans des puits spéciaux, solution qui est à l'étude dans plusieurs pays dont l'Afrique du Sud, le Ghana, la Malaisie et les Philippines.

80. Des mesures ont été prises en vue de l'octroi d'autorisations pour des installations de stockage géologique de DHA et/ou de combustible usé en Finlande, en France et en Suède.

81. En Belgique, l'argumentaire de sûreté établi par l'Organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF/NIRAS) pour son projet d'installation de stockage en surface ou à proximité de la surface de Dessel a fait l'objet d'un examen international par des pairs organisé par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE ; les conclusions de cet examen, publiées en septembre 2012, étaient globalement positives.

82. Au Canada, des installations de stockage géologique sont envisagées sur trois sites : le site de Bruce pour les DFA et les DMA de l'Ontario Power Generation ; le site des laboratoires de Chalk River pour les DFA et les DMA ; et un troisième site, pas encore déterminé, pour le Dépôt canadien pour combustible nucléaire irradié et son centre d'expertise. Les études et les travaux de conception de l'installation du site de Bruce sont en partie achevés. L'Énergie atomique du Canada limitée étudie actuellement si le site des laboratoires de Chalk River pourrait convenir. Pour ce qui est du troisième site, la phase des expressions d'intérêt de la part des communautés souhaitant participer au processus de sélection pour le Dépôt canadien pour combustible nucléaire irradié et son centre d'expertise a été suspendue par la Société de gestion des déchets nucléaires le 30 septembre 2012 afin de concentrer les efforts sur l'exécution des études détaillées requises dans les communautés qui avaient déjà manifesté officiellement leur intérêt à cette date ou avant.

83. Le plan à moyen terme de la Chine pour la gestion de ses DFMA prévoit la mise en service de cinq sites régionaux de stockage définitif d'une capacité totale d'environ un million de m³ d'ici 2020. Deux sites déjà en service, qui sont situés l'un près de Yumen dans le nord-ouest de la province de Gansu et l'autre près de la centrale nucléaire de Daya Bay dans le sud de la province de Guangdong, possèdent respectivement une capacité de 20 000 et de 80 000 m³, qui pourra être portée à 200 000 et 240 000 m³ à l'avenir. Le troisième site, situé dans le sud-ouest de la Chine, est en construction. Les travaux sur les deux derniers sites, qui se trouvent dans le nord et l'est de la Chine, n'ont pas encore débuté.

84. En Finlande, Posiva progresse dans la construction de l'installation souterraine de recherche d'Onkalo. En décembre, elle a soumis au gouvernement finlandais une demande d'autorisation pour la construction d'un dépôt sur le site d'Olkiluoto dans l'intention de commencer à y stocker définitivement des déchets en 2020.

85. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) prépare la phase industrielle de son projet de stockage réversible Cigéo pour les DMA et les DHA, qui devrait être achevée en 2025, et a entamé une analyse de faisabilité et un processus formel d'engagement des parties prenantes avant de présenter une demande d'autorisation. Andra a par ailleurs publié l'édition de 2012 de l'inventaire national des déchets radioactifs indiquant les caractéristiques, le volume et l'emplacement des déchets nationaux existants.

86. En Allemagne, le gouvernement a annoncé en novembre 2012 que tous les travaux d'exploration et d'étude effectués dans l'installation d'entreposage de déchets radioactifs de Gorleben en vue d'en faire un site permanent seront interrompus jusqu'à ce qu'une décision politique ait été prise quant à son avenir – poursuite des travaux d'exploration, moratoire ou fermeture.

87. Dans l'installation de stockage définitif de Bataapáti, en Hongrie, qui est conçue pour accueillir 40 000 m³ de DFMA de centrales nucléaires, les travaux d'aménagement des rampes d'accès au dépôt (Fig. A-12), des tunnels de service et des deux premières casemates de stockage définitif ont été achevés. Lors de la cérémonie d'inauguration en décembre, un premier colis de déchets contenant neuf fûts enrobés dans du béton ont été mis en place dans l'installation (Fig. A-13). Le concept opératoire prévoit la construction de nouvelles casemates de stockage parallèlement aux opérations de mise en place de déchets dans celles qui existent déjà.



FIG. A-12. Rampe d'accès à l'installation nationale de stockage définitif de déchets radioactifs de Bataapáti (Hongrie).



FIG. A-13. Mise en place du premier colis de déchets dans l'installation de stockage définitif de Bataapáti (Hongrie).

88. En République de Corée, il est prévu actuellement d'achever en juin 2014 la construction de l'installation de stockage définitif de Gyeongju, conçue pour accueillir 100 000 fûts de DFMA dans des silos.

89. L'Agence lituanienne de gestion des déchets radioactifs a achevé les études de site et examine les options de conception pour une installation prévue de stockage en surface ou à proximité de la surface d'une capacité d'environ 100 000 m³ de DFMA à courte période.

90. En Fédération de Russie, le gouvernement a approuvé trois documents fondamentaux sur la gestion des déchets radioactifs à l'appui des activités menées dans le domaine de l'énergie nucléaire, de l'assainissement et de la remédiation des sites contaminés ainsi que de l'extraction et du traitement de matières minérales et organiques à forte teneur en radionucléides naturels. Des travaux relatifs à la création d'installations de stockage définitif des déchets radioactifs ont en outre débuté. Des études de conception sont menées actuellement en vue de la création d'un laboratoire souterrain dans le massif granitoïde de Nizhnekanskiy (à une profondeur de 500 m) dans la région de Krasnoyarsk en Sibérie. Ce laboratoire étudiera la possibilité de stocker définitivement des déchets de haute et moyenne activité à longue période sur le site. L'installation de stockage définitif doit entrer en service en 2021. En outre, des travaux de conception préliminaires (études géologiques et techniques) ont été effectués pour une installation de stockage de DFA et de DMA à courte période dans le nord-ouest de la Fédération de Russie. La première installation commerciale d'entreposage à sec hors du site d'un réacteur a commencé à fonctionner en 2011 sur le site du Combinat minier et chimique, Entrepôt à sec, Stade I, de Zheleznogorsk, Karasnoyarsk.

91. En juin 2012, l'équipe internationale nommée par l'AEN a mené à bonne fin un examen concluant de la demande d'autorisation pour la création d'un dépôt géologique et d'une usine d'encapsulation à Oskarshamn présentée par la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires, qui compte que l'installation commencera à fonctionner d'ici 2025.

92. En Ukraine, il est prévu d'accroître de 120 000 m³ la capacité de l'installation ukrainienne de stockage de DFMA de Buryakovka créée à la suite de l'accident de Tchernobyl, qui est actuellement d'environ 700 000 m³, dans le cadre d'un projet de reconstruction financé par la Commission européenne.

93. Aux États-Unis, une nouvelle installation de stockage de déchets radioactifs située dans le comté d'Andrews, au Texas, a commencé à fonctionner en avril 2012. Elle accepte les DFA provenant du Texas et du Vermont et ceux du gouvernement fédéral. Cette installation du type à tranchées peu profondes comprend deux dépôts adjacents de conception analogue, un pour les déchets commerciaux, l'autre pour les déchets du gouvernement fédéral.

94. Un certain nombre d'opérations ont été menées avec succès pour enlever des sources scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et les placer sous contrôle en les transférant dans une installation nationale d'entreposage de déchets radioactifs ou dans un autre établissement où ils pouvaient être entreposés dans des conditions adéquates. Avec le concours direct de l'Agence, 125 sources retirées du service, dont un vieil irradiateur gamma, ont été récupérées au Honduras et transférées dans l'installation nationale d'entreposage. Toujours avec le concours direct de l'Agence, deux irradiateurs gamma ont été récupérés, décontaminés, caractérisés, emballés et transportés d'une casemate contaminée vers un établissement offrant des conditions d'entreposage plus sûres au Costa Rica en février 2012. Afin de garantir un entreposage plus sûr à long terme, plusieurs sources de curiethérapie au radium 226 et au césium 137 retirées du service ont été conditionnées au Honduras et au Costa Rica en novembre 2012. Par ailleurs, le rapatriement depuis l'Uruguay d'un irradiateur indien contenant 15 sources de haute activité retirées du service a été mené à bonne fin en septembre 2012 avec le concours direct de l'Agence et en coopération avec le Fonds pour la non-prolifération et le désarmement des États-Unis et l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale.

Déchets radioactifs hérités du passé

95. D'importants travaux sont en cours pour éliminer les séquelles des activités nucléaires menées pendant la guerre froide. Depuis plus de quinze ans, le Groupe de contact d'experts de l'Agence pour les initiatives internationales relatives à l'héritage nucléaire en Fédération de Russie (CEG) se révèle être un cadre efficace pour l'échange d'informations et la coordination des programmes concernant l'héritage nucléaire en Fédération de Russie. En 2012, un de ses plus grands succès a résidé dans le déchargement du combustible du réacteur refroidi par métal liquide d'un sous-marin en novembre. La Fédération de Russie, grâce à un important concours de partenaires du CEG, a démantelé, après en avoir déchargé le combustible, la majorité des 200 sous-marins déclassés et il n'en reste plus que cinq à démanteler. On est en train de sceller les réacteurs des sous-marins déchargés de leur combustible et de les placer dans des installations d'entreposage à long terme. Une de ces installations a été achevée en 2011 dans le nord-ouest de la Fédération de Russie. Une deuxième a été inaugurée en mai 2012 dans l'extrême est de la Fédération de Russie et a reçu son premier compartiment de réacteur à entreposer en septembre (Fig. A-14). Un programme analogue est exécuté aux États-Unis, où 114 sous-marins et navires nucléaires ont été démantelés.



FIG. A-14. Démantèlement d'un sous-marin nucléaire.

96. Le CEG donne maintenant la priorité à la sûreté de la gestion et de l'enlèvement du combustible usé et des déchets des anciennes bases navales. Deux centres régionaux de conditionnement et d'entreposage de déchets radioactifs sont en construction dans le nord-ouest et l'extrême est de la Fédération de Russie. En outre, un programme international de récupération de puissants générateurs thermoélectriques à radioisotopes (GTR) qui étaient utilisés pour la navigation (batteries d'accumulateurs de phares, par exemple) le long des côtes de la Fédération de Russie est actuellement mis en œuvre avec succès. La majorité des 1007 GTR du pays ont maintenant été récupérés et il n'en reste que 75.

Gestion des déchets radioactifs : remédier à l'accident de Fukushima Daiichi

97. L'accident de Fukushima Daiichi a suscité d'importants défis en ce qui concerne la gestion à la fois des déchets radioactifs qui se trouvent sur le site et de ceux qui sont répandus sur une vaste superficie hors du site (Fig. A-15). Les déchets se trouvant sur le site comprennent d'importants volumes d'eau de mer fortement contaminée dans les bâtiments réacteurs et les salles des machines ainsi que divers déchets solides tels que débris, arbres abattus, terre et métaux, qui contiennent principalement des radionucléides du césium mais aussi de fortes concentrations d'autres produits de fission et peut-être des traces de transuraniens. Hors du site, les déchets comprennent de grandes quantités de débris contaminés résultant de la destruction provoquée par le tsunami et de très grandes quantités de matériaux contaminés résultant des activités programmées d'assainissement/de remédiation à grande échelle dans les zones urbaines, agricoles, forestières et aquatiques les plus touchées par les rejets de césium radioactif (Fig. A-16).

98. L'eau fortement radioactive qui s'est accumulée dans les bâtiments réacteurs et les salles des machines est traitée continuellement dans les installations d'épuration mise en place dans le cadre d'une collaboration locale et internationale afin d'en éliminer le césium. L'eau traitée a été entreposée dans des cuves ou réutilisée pour refroidir le cœur des réacteurs après dessalement. En novembre 2012, le volume cumulé d'eau traitée était d'environ 500 000 m³. Des installations devant servir à éliminer diverses substances radioactives autres que le césium ont été mises en place et sont prêtes à entrer en service. Les principaux défis actuels dans ce domaine sont constitués notamment par l'entreposage de très gros volumes d'eau traitée et l'infiltration continue d'eaux souterraines dans les bâtiments, qui oblige à traiter et à entreposer des volumes sans cesse croissants d'eau contaminée. Les déchets solides accumulés sur le site ont été entreposés dans des installations provisoires et l'on procède actuellement à un échantillonnage et à des analyses en vue de déterminer les caractéristiques des déchets et les options pour leur gestion ultérieure.

99. L'enlèvement des débris de combustible dans les réacteurs endommagés (« déchargement ») soulève un certain nombre de problèmes techniques. Cette tâche doit être exécutée dans des conditions d'exposition à des doses de rayonnements très élevées à l'intérieur des bâtiments réacteurs. Pour le déchargement, il faudra donc mettre au point et déployer des outils spéciaux, manipuler les équipements à distance et recourir à des techniques de pointe. Il sera nécessaire de concevoir des dispositifs pour examiner avec soin l'état de contamination ou des techniques de télécommande et de robotique pour les activités de décontamination (par exemple, lavage, nettoyage/aspiration, brossage/burinage superficiel et peinture/pulvérisation d'agents de décontamination) afin de prévenir une exposition superflue des travailleurs. Il est prévu de mener les travaux de recherche-développement concernant ces dispositifs et technologies dans le cadre d'une collaboration multinationale entre des experts et établissements internationaux.

100. La Loi de 2011 sur les mesures spéciales à prendre face à une pollution radioactive est entrée pleinement en vigueur le 1^{er} janvier 2012 au Japon. On se fonde sur cette loi pour la planification et la mise en œuvre de la décontamination hors du site et pour la collecte, le transfert, l'entreposage provisoire et le stockage définitif des déchets. Il est procédé à une décontamination dans 104 municipalités au total. Celles-ci se trouvent dans un rayon de 20 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ou dans des zones où la dose annuelle d'exposition aux rayonnements dépasse 20 mSv. En août 2012, 78 des 104 municipalités avaient achevé leur décontamination. Par ailleurs, d'intenses efforts sont déployés en vue de trouver un emplacement pour une installation d'entreposage provisoire d'ici un an et de la mettre en service dans un délai de trois ans. Le stockage définitif devrait être assuré dans un délai de 30 ans à compter du début de l'entreposage provisoire.



FIG. A-15. Centrale de Fukushima Daiichi de la TEPCO (octobre 2011)



FIG. A-16. Entreposage provisoire de terre enlevée dans le cadre du projet type de remédiation à l'école élémentaire Tominari de Date, octobre 2011.

Déclassement

101. En décembre 2012, 142 réacteurs de puissance avaient été mis définitivement à l'arrêt. Ce chiffre comprenait 18 réacteurs de puissance qui avaient été déclarés comme entrant dans la phase de déclasserement ou qui ont été arrêté définitivement en 2012. Au total, 16 réacteurs de puissance ont maintenant été complètement démantelés, 52 étaient en cours de démantèlement, 59 étaient maintenus en attente sûre ou en attente de démantèlement final, trois étaient placés sous massif de protection et pour 12 autres la stratégie de démantèlement n'avait pas encore été définie.

102. Plus de 400 réacteurs de recherche et assemblages critiques sont maintenant déclassés ou sont en cours de démantèlement. Plusieurs centaines d'autres installations nucléaires, telles que des installations de gestion des déchets radioactifs ou du cycle du combustible nucléaire, ont été déclassées ou sont en cours de démantèlement.

103. La mise en œuvre des projets de déclasserement de réacteurs de puissance a progressé sensiblement en Espagne, aux États-Unis, en France, au Royaume-Uni et en Ukraine. Le montage en cours de la nouvelle enveloppe de confinement sûre pour la quatrième tranche de la centrale nucléaire

de Tchernobyl et le démantèlement des internes du réacteur¹⁹ à la centrale nucléaire José Cabrera en Espagne offrent des exemples de réalisations techniques dans ce domaine (Fig. A-17 et A-18). Toutefois, malgré les progrès accomplis dans plusieurs pays, il faut accélérer la mise en œuvre des projets de démantèlement dans certains États Membres dont les infrastructures nucléaires sont moins développées.



FIG. A-17. Démantèlement des internes du réacteur (à gauche) à la centrale nucléaire Jose Cabrera (à droite) (Photo : ENRESA).



FIG. A-18. Montage de la nouvelle enveloppe de confinement sûre pour la quatrième tranche à la centrale de Tchernobyl (Photo : centrale nucléaire de Tchernobyl).

104. En matière de déclassement, il subsiste des défis considérables, tels que la disponibilité de fonds et d'options de stockage définitif pour les déchets, à laquelle s'ajoute l'accès à des ressources techniques et humaines appropriées, notamment dans le cas des centrales nucléaires qui ont été fermées à la suite d'un accident grave. Le déclassement en cours de la centrale nucléaire de Tchernobyl et le déclassement futur de celle de Fukushima Daiichi en fournissent les exemples les plus connus. En outre, l'absence de cadre juridique et réglementaire approprié demeure un obstacle important dans certains pays.

105. Au Japon, la feuille de route à moyen et long termes pour le déclassement de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a été actualisée en août 2012. Le document *Progress Status of Mid-and-long Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Units 1-4*,

¹⁹ Les « internes de réacteur nucléaire » sont des structures importantes placées à l'intérieur d'une cuve de réacteur qui remplissent une ou plusieurs fonctions, telles que support du cœur, maintien de l'alignement du combustible, orientation du fluide de refroidissement primaire, protection radiologique de la cuve du réacteur et guidage de l'instrumentation interne du cœur.

TEPCO²⁰, publié par le centre de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire du Conseil gouvernemental-TEPCO pour l'intervention à moyen et long termes, a été établi afin de décrire le cadre de l'ensemble des activités requises pour le déclasser la centrale et la gestion des déchets connexes (Fig. A-19).

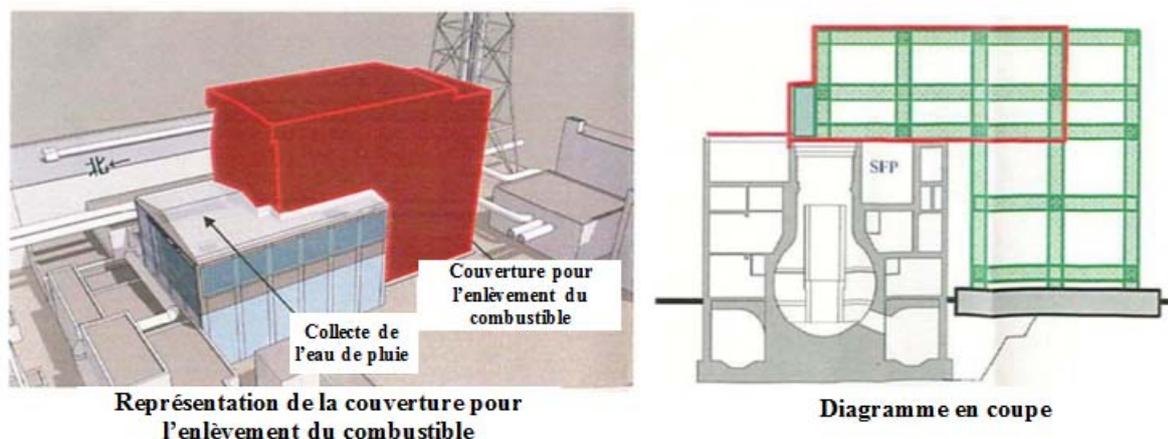


FIG. A-19. Couverture de protection pour l'enlèvement du combustible de la piscine à combustible usée de la tranche 4 à Fukushima Daiichi.

A.4. Sûreté

106. En 2012, les débats relatifs à la sûreté des centrales nucléaires ont été centrés en grande partie sur la détermination et la mise à profit des enseignements qui pouvaient être retirés de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011. Bien qu'il reste encore des enseignements à en tirer, des plans d'action appliquant ceux que l'on a déjà recueillis ont été élaborés et sont mis en œuvre aux niveaux tant national qu'international. Adopté par la Conférence générale en septembre 2011, le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire définit un programme de travail pour renforcer le cadre mondial dans ce domaine. Il définit 12 mesures principales²¹. Il est possible que d'autres enseignements soient tirés et, selon que de besoin, incorporés dans les mesures proposées grâce à une actualisation du Plan d'action.

107. En 2012, l'Agence a organisé trois réunions internationales d'experts en rapport avec le Plan d'action, qui ont porté sur la sûreté des réacteurs et du combustible usé à la lumière de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, en mars, sur l'amélioration de la transparence et de l'efficacité de la communication en cas d'urgence nucléaire ou radiologique, en juin, et sur la protection contre les séismes et les tsunamis extrêmes à la lumière de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, en septembre. En outre, la Conférence ministérielle de Fukushima sur la sûreté nucléaire organisée du 15 au 17 décembre 2012 par le Japon en coparrainage avec l'Agence, a contribué au renforcement de la sûreté nucléaire dans le monde entier en partageant avec la communauté internationale, aux niveaux des ministres et des experts, les nouvelles connaissances et leçons tirées de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi.

²⁰ http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20120625_01a.pdf

²¹ On trouvera le texte du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire à l'adresse suivante : http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/GC55Documents/French/gc55-14_fr.pdf

108. Sur le plan opérationnel, le niveau de sûreté des centrales nucléaires à travers le monde reste élevé, comme le montrent les indicateurs de sûreté recueillis par l'AIEA et l'Association mondiale des exploitants nucléaires. La figure A-20 indique le nombre total d'arrêts d'urgence ou de mises à l'arrêt non programmés de réacteurs de puissance pour 7 000 heures de fonctionnement en régime critique. On s'en sert couramment comme indicateur de succès dans l'amélioration de la sûreté des centrales. Ainsi qu'il ressort de cette figure, des améliorations constantes, mais pas aussi spectaculaires que dans les années 1990, ont été apportées ces dernières années. L'accroissement entre 2010 et 2011 est lié au nombre élevé d'arrêts non programmés déclenchés par le séisme de mars 2011 au Japon.

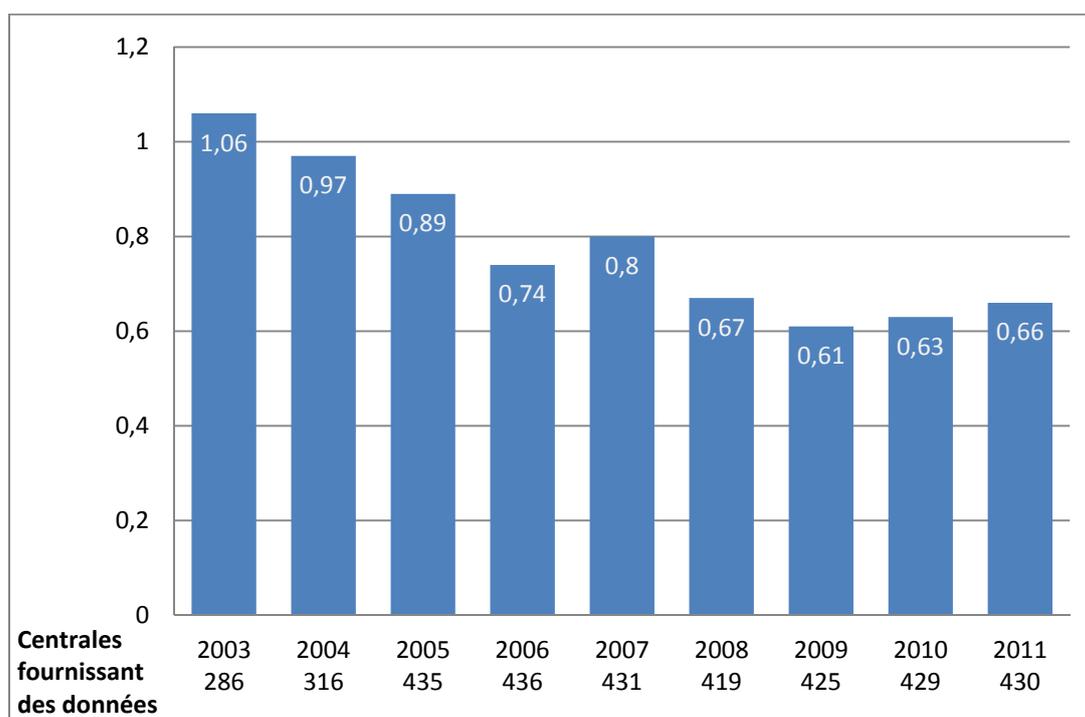


FIG. A-20. Nombre total d'arrêts d'urgence non programmés de réacteurs de puissance, qu'ils soient automatiques ou manuels, pour 7 000 heures de fonctionnement en régime critique. Source : PRIS (Système d'information sur les réacteurs de puissance) de l'Agence, <http://www.iaea.org/pris>.

109. On trouvera des informations supplémentaires sur la sûreté nucléaire dans le *Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire 2013* ou dans le *Rapport annuel de l'AIEA 2011*.

B. Données atomiques et nucléaires²²

110. Des données nucléaires et atomiques exactes sont capitales pour tous les secteurs de la recherche et de l'innovation dans le domaine nucléaire. Elles sont essentielles à de nombreuses applications comme l'électronucléaire (fission), les réacteurs de recherche, la fusion nucléaire, la médecine, les essais non destructifs et le contrôle radiologique de l'environnement.

²² Depuis le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012, les faits nouveaux concernant la fission et la fusion avancées sont évoqués une année sur deux, en alternance avec ceux concernant les données atomiques et nucléaires. Cela permet de décrire les tendances et les événements importants de manière plus approfondie.

111. Les travaux sur les données nucléaires sont menés à travers le monde par des centres de données régionaux. L'un des centres clés se trouve à l'Agence ; on peut aussi citer la Banque de données de l'AEN à Paris, le Centre russe de données nucléaires à Obninsk et le Centre national de données nucléaires des États-Unis situé au Laboratoire national de Brookhaven. L'Agence coordonne deux réseaux qui relient ces centres, le Réseau international de centres de données sur les réactions nucléaires (NRDC) et le Réseau international des évaluateurs de données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux (NSDD). Le NRDC est essentiellement chargé de la base de données expérimentales sur les réactions nucléaires (EXFOR) tandis que le NSDD supervise le Fichier de données évaluées sur la structure nucléaire (ENSDF) et entreprend des évaluations horizontales pertinentes. Ces bases de données, qui sont constamment mises à jour, apportent des contributions essentielles aux travaux de recherche-développement en science et technologie nucléaires, pour les applications énergétiques et non énergétiques.

112. L'année dernière, la communauté internationale des utilisateurs de données a envisagé de modifier le format de stockage des données nucléaires. Les possibilités techniques actuelles permettraient de modifier le format standard et de passer de la vieille « carte perforée » utilisée actuellement à un langage moderne structuré comme XML. S'il est avalisé, ce changement constituerait une innovation décisive.

113. Le Colloque international sur la dosimétrie des réacteurs (ISR-14), organisé en mai 2011 aux États-Unis d'Amérique, a mis en exergue l'importance des données dosimétriques pour la détermination exacte des spectres et des fluences neutroniques. Si le Fichier international de dosimétrie des réacteurs (IRDF) de l'Agence a servi de référence en la matière pendant de nombreuses années, il a été récemment remplacé par un nouveau fichier de dosimétrie, le Fichier international de dosimétrie des réacteurs et de fusion (IRDF-F), aussi conçu par l'Agence pour une vaste gamme d'applications, dont la fusion. Il est prévu que l'IRDF-F sera validé et perfectionné selon les besoins au cours des toutes prochaines années, notamment dans le cadre de travaux coordonnés par l'Agence.

114. Des fichiers de données évaluées viennent étayer les programmes dont on se sert pour concevoir des dispositifs, élaborer des argumentaires de sûreté et mener des travaux de science fondamentale. En 2011 et 2012, trois nouvelles versions de tels fichiers ont été rendues publiques à travers le monde : ENDF/B-VII.1 (États-Unis), JEFF-3.1.2 (Europe) et JENDL-4.0 (Japon). On compte qu'au cours des toutes prochaines années, ces fichiers seront validés et mis à l'essai sur une grande échelle, ce qui permettra d'en détecter les éventuels défauts et de procéder à d'autres expériences et calculs pour faciliter la mise au point de versions améliorées. La figure B-1 donne un exemple de données, y compris les incertitudes, pour la réaction de capture neutronique sur le tungstène qui ont été tirées des trois bases de données. Ce diagramme a été produit par un logiciel que l'Agence a mis au point pour faciliter les comparaisons visuelles et la diffusion de données nucléaires provenant de sources très diverses.

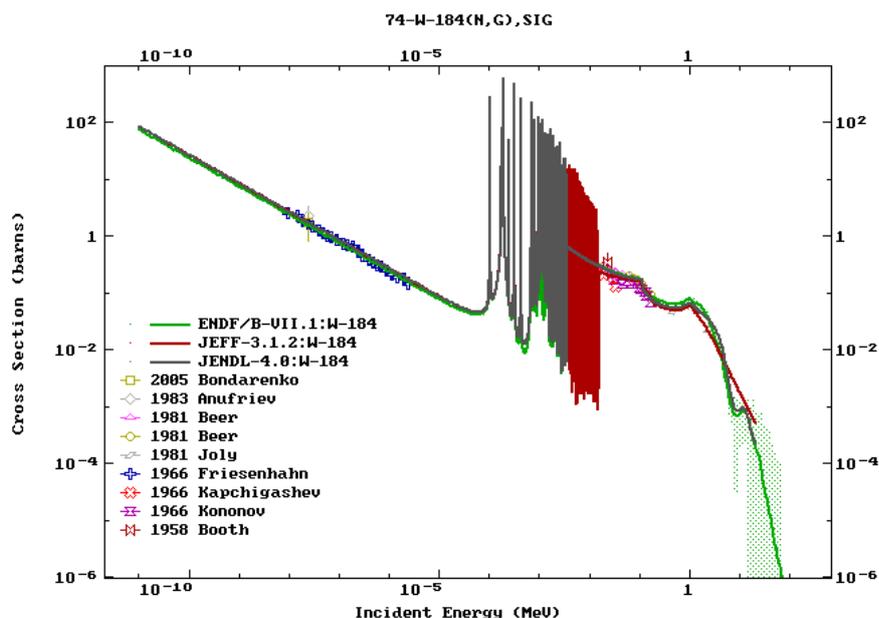


FIG. B-1. Exemple de données extraites de trois bibliothèques de données évaluées récemment comprenant certaines données expérimentales tirées de l'EXFOR. La zone pointillée à droite montre comment il est possible de représenter les informations concernant les incertitudes tirées de l'ENDF/B-VII.1.

115. Les fichiers de données évaluées mentionnés ci-dessus parviennent à maturation, la plupart des données convergeant. Il reste néanmoins plusieurs domaines où les lacunes sont connues, mais celles-ci sont en règle générale d'une ampleur telle qu'il est difficile de les combler dans le cadre d'un seul projet d'évaluation. La collaboration internationale peut être une solution et l'AEN a déjà beaucoup fait dans le cadre de ses activités de coopération à l'évaluation des données nucléaires en publiant 30 rapports. Pour faire bien mieux en la matière, il a été proposé d'introduire un nouveau paradigme de travail afin d'accélérer les progrès concernant les données évaluées sur les réactions nucléaires appelé l'Organisation internationale de collaboration pour une bibliothèque de données évaluées. Initialement, une série de six isotopes prioritaires, à savoir ^1H , ^{16}O , ^{56}Fe , $^{235,238}\text{U}$ et ^{239}Pu , sera étudiée. Ceci devrait déboucher sur des évaluations définitives qui pourront être prises en compte dans tous les projets et, à l'avenir, pourrait permettre l'étude d'un plus grand nombre de données nucléaires, sous la conduite d'organismes internationaux comme l'AEN et l'AIEA.

116. La fusion est une source d'énergie potentielle majeure. Le projet de Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER)²³ vise à démontrer la faisabilité scientifique et technologique ainsi que les caractéristiques de sûreté de l'énergie de fusion à des fins pacifiques. Il consiste à construire un dispositif de la taille d'une centrale qui devrait démontrer qu'il est possible de produire 500 MW d'énergie de fusion (fig. B-2). La bibliothèque FENDL-2.1 a servi de source de données de référence pour la conception de l'ITER et une version améliorée, la bibliothèque FENDL-3, a été mise au point dans le cadre d'un projet de recherche coordonné de l'Agence pour faciliter l'analyse des résultats.

²³ De plus amples informations sur l'ITER sont données sur le site <http://www.iter.org/>.

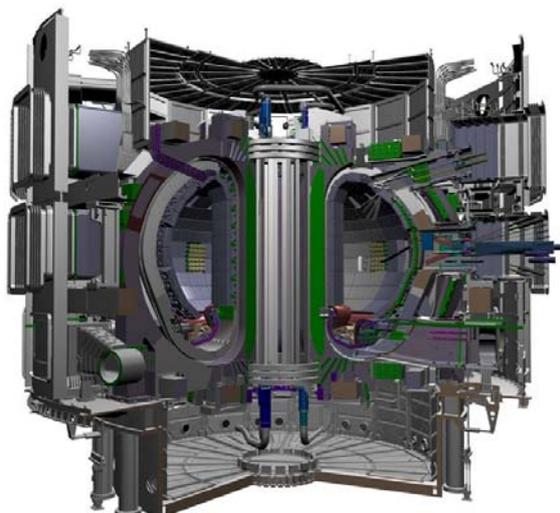


FIG. B-2. Vue en coupe de l'ITER destiné aux recherches sur la production d'énergie de fusion, actuellement en construction en France. Un nombre considérable de données nucléaires et atomiques ont été utilisées pour le mettre au point et serviront aussi pour analyser son fonctionnement et les expériences qui y seront menées.

117. La 24^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, tenue en octobre 2012 à San Diego (États-Unis d'Amérique) a attiré quelque 850 participants de 37 États Membres et de cinq organisations internationales. Environ 700 communications ont été présentées, dont les résultats de l'expérience menée avec une paroi semblable à celle de l'ITER (fig. B-3) dans le Tore européen commun (JET), dispositif à fusion sis au Royaume-Uni.

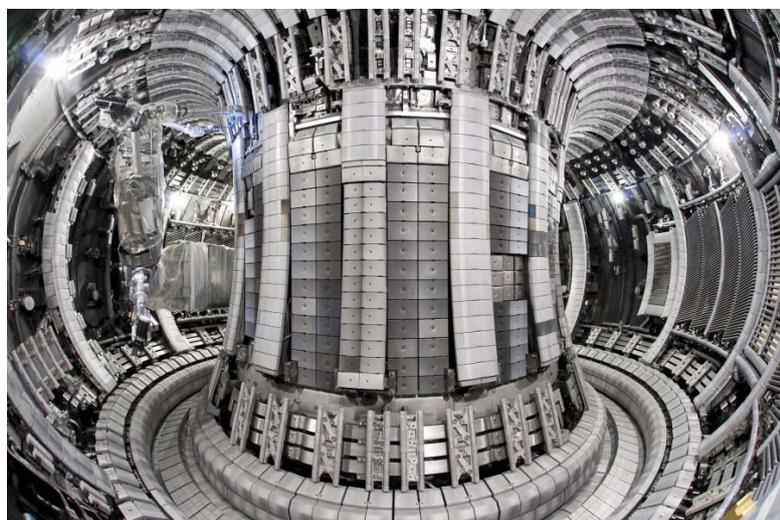


FIG.B-3. Intérieur de la chambre à vide du JET une fois la paroi semblable à celle de l'ITER complètement installée.

118. Le recours aux techniques nucléaires pour l'analyse des matériaux est de plus en plus répandu, et les méthodes auparavant employées uniquement dans des laboratoires nucléaires sont appliquées par des sociétés industrielles privées avec le matériel de table type. Plusieurs conférences internationales sont consacrées au sujet. La 21^e Conférence internationale sur l'analyse par faisceaux d'ions se tiendra à Seattle (États-Unis d'Amérique) en juin 2013. L'Agence a achevé un projet de recherche coordonnée sur la Bibliothèque IBANDL qui fournit des données nucléaires pour l'analyse par faisceaux d'ions et

en exécute un autre sur une technique d'analyse connexe, l'émission gamma induite par particules chargées.

119. De nouvelles installations qui produisent des impulsions intenses de rayons X durs suscitent des avancées dans les données atomiques et moléculaires. L'accélérateur linéaire source de lumière cohérente à Stanford (États-Unis d'Amérique) a été mis en service en 2009 et l'installation SACLA à RIKEN Harima au Japon a été mise en service en 2011 avant d'être rendue accessible aux utilisateurs externes en 2012. Dans ces installations, la lumière de rayons X sert à illuminer des cibles, qu'il s'agisse d'atomes et de molécules particuliers ou de cellules vivantes et de nanocristaux. L'intensité élevée et la brièveté des impulsions permettent d'étudier la matière dans des conditions extrêmes ainsi que des processus complexes, par exemple dans des biomolécules, au niveau de l'atome.

120. L'Installation nationale d'ignition (NIF) sise au Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis d'Amérique) dispose de 192 lasers de forte puissance qui concentrent la lumière ultraviolette dans un hohlraum où elle est convertie en rayons X. Dans sa phase initiale d'exploitation (2009-2012), la NIF s'est spécialement employée à obtenir un gain énergétique net à partir du chauffage et de la compression d'une pastille de deutérium-tritium. Elle n'y est pas parvenue, et en partie cela souligne la nécessité d'avoir des données atomiques exactes pour étudier la matière dans des conditions extrêmes. Son exploitation se poursuit.

121. Le Centre virtuel de données atomiques et moléculaires (VAMDC), projet européen sur l'infrastructure de la technologie de l'information initialement financé pour 2009-2012, a réussi à fournir une interface commune pour quelque 20 à 25 bases de données atomiques et moléculaires ayant des applications en physique des plasmas et en astrophysique. Les interfaces et les outils d'interrogation associés sont basés sur le schéma XML pour les atomes, les molécules et les solides (XSAMS), qui a été élaboré par une équipe internationale coordonnée par l'Agence. La version 0.1 est sortie en 2009 et la version 1.0 en 2012. Un projet de suivi du VAMDC est en cours d'exécution.

122. Les bases de données pour les processus atomiques et moléculaires s'appuient de plus en plus sur des données calculées. Lors de plusieurs réunions récentes, on a abordé la question de l'incertitude liée aux sections efficaces calculées, comme les sections efficaces expérimentales, laquelle doit être quantifiée. La réunion technique conjointe AIEA-NFRI sur l'évaluation des données pour les processus atomiques, moléculaires et d'interaction entre plasma et matériaux dans le domaine de la fusion organisée à Daejeon (République de Corée), en septembre 2012, a passé en revue les questions de propagation des erreurs et d'analyse de la sensibilité, l'état actuel des bases de données évaluées, l'évaluation des ensembles de données théoriques et expérimentales, les méthodes d'évaluation et le rôle des concordances semi-empiriques. Cette réunion, première de la sorte, contribue de manière décisive à redynamiser les travaux internationaux sur l'affectation des incertitudes et l'évaluation des données pour les processus atomiques et moléculaires dans la fusion.

123. En 2013, la Conférence internationale sur les données nucléaires pour la science et la technologie, qui se tiendra à New York (États-Unis d'Amérique), donnera l'occasion de présenter les travaux de scientifiques et d'ingénieurs intervenant dans la production ou l'utilisation des données nucléaires pour de nombreuses applications.

C. Accélérateurs et réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

124. Les électrons, protons et autres types de particules chargées sont accélérés pour produire des rayons X, des neutrons, des faisceaux de particules chargées et des radio-isotopes destinés à la recherche et à la technologie. Les technologies faisant appel à des accélérateurs sont considérées comme un outil essentiel au service du développement social et économique qui trouve des applications très diverses dans les secteurs de l'énergie, de la santé, de l'agriculture, de l'environnement, des matériaux, des ressources naturelles et de l'éducation.

125. Des modèles d'accélérateurs très divers ont été mis au point. Ils ont des tailles variables, et si certains sont assez petits pour tenir sur une table, d'autres peuvent s'étendre sur des dizaines de kilomètres. Ils peuvent être linéaires ou circulaires. Ils peuvent produire ou accélérer des faisceaux de particules chargées par impulsions ou de manière continue selon différentes techniques. Les accélérateurs sont les principaux outils utilisés pour un grand nombre d'applications de la physique nucléaire ayant des retombées importantes pour la société, comme : la production de radio-isotopes tels que le fluor 18, le cuivre 64 ou le carbone 11 pour la préparation de radiopharmaceutiques utilisés dans le diagnostic du cancer ; l'utilisation directe de faisceaux d'accélération pour le traitement du cancer ; la prospection minière et pétrolière ; le traitement des puces à semi-conducteurs ; la stérilisation de matériel médical et de produits alimentaires ; la datation d'objets et bien d'autres encore. Ils font l'objet d'études en permanence en vue de nouvelles applications. Un événement marquant a été l'utilisation réussie du cyclotron médical pour la production de technétium 99m, le radionucléide le plus couramment utilisé dans le monde à des fins de diagnostic.

Caractérisation des matériaux

126. La technologie nucléaire joue un rôle fondamental dans la mise au point de matériaux innovants. L'analyse par faisceaux d'ions est un outil important pour caractériser les propriétés et la performance des matériaux dans des domaines comme l'archéologie, la biomédecine, la surveillance de la pollution de l'environnement, l'alimentation et l'agriculture, la criminalistique, l'industrie, l'exploitation minière et l'étude d'objets du patrimoine culturel, entre autres. Les techniques d'analyse par faisceaux d'ions sont généralement non destructives, mais les propriétés des matériaux peuvent être considérablement altérées par l'irradiation ionique.

127. La longue période des radio-isotopes issus de la fission nucléaire dans la partie terminale du cycle du combustible nucléaire soulève des préoccupations environnementales. Celles-ci ont conduit à accroître les efforts de recherche-développement en vue de mettre au point une technologie permettant de réduire le volume de déchets radioactifs par transmutation²⁴, dans des réacteurs à neutrons rapides ou dans des systèmes hybrides ; à l'AIEA, en particulier, un certain nombre d'initiatives sont mises en œuvre dans le cadre du projet sur les progrès technologiques des réacteurs à neutrons rapides et des systèmes hybrides.

128. La caractérisation de matériaux en temps réel par faisceaux de rayonnements synchrotroniques, de neutrons, d'ions et d'électrons est un outil précieux pour relever les défis que posent, sur le plan de la recherche et de la technologie, l'utilisation de certains matériaux dans des applications énergétiques. Une meilleure compréhension des facteurs de dégradation de la performance d'un matériau dus à son

²⁴ Conversion d'un élément en un autre. L'utilisation de la transmutation pour la conversion de radionucléides à longue période en radionucléides à courte période ou stables est à l'étude.

utilisation ou à son vieillissement peut aider à relever ces défis. La mise au point de matériaux plus sophistiqués, par exemple de matériaux réduisant la consommation d'énergie au minimum, peut contribuer à alléger la pression sur les ressources naturelles de la planète et à limiter celle qui pèse sur l'environnement. Les particules accélérées peuvent jouer un rôle important dans la mise au point de ces matériaux : les ions issus d'accélérateurs de faisceaux ioniques peuvent servir à simuler l'endommagement par irradiation que subit le matériau dans un réacteur de fission ou de fusion, pour créer de nouveaux matériaux par implantation ionique et, enfin, pour analyser ces matériaux. Les nouveaux matériaux sont créés en petits échantillons, ce qui leur vaut l'appellation de « matériaux modèles ». Pour des raisons de rentabilité, il faut, une fois ces matériaux obtenus, mettre au point d'autres méthodes de production plus simples. La caractérisation du processus de fabrication *in situ* et en temps réel peut en faciliter l'élaboration, car elle favorise une meilleure compréhension de toutes les étapes nécessaires.



FIG. C-1. Mise en place d'une nouvelle ligne de faisceaux d'ions destinée à tester la résistance aux rayonnements d'appareils électroniques au cyclotron U400M de l'Institut commun de recherche nucléaire (Fédération de Russie).

Imagerie élémentaire et moléculaire par faisceaux d'ions

129. Au fil des ans, la spectrométrie de masse à émission d'ions secondaires (SIMS) est devenue un outil puissant d'analyse élémentaire, en particulier pour des matériaux comme les semi-conducteurs. Elle a été utilisée récemment pour obtenir des images (cartes) de haute résolution de la concentration moléculaire surfacique, avec une résolution latérale inférieure à un micron. Les nouvelles avancées dans la réalisation de profils en profondeur de matériaux moléculaires pourraient permettre, à terme, d'obtenir une image tridimensionnelle complète du matériau analysé. Cette technique a toutefois un inconvénient, à savoir que l'analyse doit être effectuée sous vide. Les techniques de spectrométrie de masse à la pression atmosphérique qui sont actuellement disponibles, comme celles fondées sur la désorption-ionisation laser assistée par matrice (MALDI), l'analyse directe en temps réel (DART) et la désorption-ionisation par électronébulisation (DESI), ont des résolutions spatiales diverses (voir tableau C-1). L'activité minimale détectable peut aussi être influencée notamment par le solvant utilisé. Un autre inconvénient est que certaines techniques peuvent détruire des informations moléculaires. À ce jour, aucune technique de spectrométrie de masse ne peut produire de cartes des molécules de masse élevée à la pression ambiante avec une haute résolution spatiale.

130. La spectrométrie de masse à émission d'ions secondaires d'une énergie de l'ordre du mégaelectronvolt (MeV-SIMS) est récemment apparue comme une technique permettant d'obtenir des informations chimiques et élémentaires. Cette méthode fait appel à des ions lourds d'une gamme d'énergie de l'ordre du MeV, accélérés par des accélérateurs et focalisés sur une microsonde nucléaire. Les ions moléculaires secondaires, émis par la surface irradiée de l'échantillon, sont détectés à l'aide de la méthode du temps de vol. Cette technique présage des applications prometteuses pour la cartographie de molécules organiques, et en particulier pour la recherche dans les domaines de la biomédecine, du patrimoine culturel et de la criminalistique.

131. Il est possible d'extraire les ions MeV du système à vide en les faisant passer dans l'air par une mince fenêtre. Cette technique a beaucoup été utilisée dans le passé pour effectuer une analyse élémentaire d'objets dans les conditions ambiantes à l'aide des techniques traditionnelles par faisceaux d'ions. Plusieurs domaines fondamentaux tireraient bénéfice d'un système d'imagerie moléculaire de haute résolution à la pression ambiante, tels que l'archéométrie, les sciences géologiques et environnementales, la criminalistique et les sciences biomédicales. On trouvera au tableau C-1 une comparaison de certaines techniques d'imagerie moléculaire de pointe.

Tableau C-1. Comparaison de certaines techniques d'imagerie moléculaire de pointe [Spoto, G. et Grasso, G., Spatially resolved mass spectrometry in the study of art and archaeological objects, *Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30, 856–863]

Information	MALDI MS	SIMS	MS ambiante	NanoSIMS	MeV SIMS	LA-ICP-MS
Résolution spatiale	10 µm	> 200 nm pour les matières organiques	> 50 µm. Résolution submicronique en développement.	50 nm	1 µm	> 100 µm
Taille des molécules détectées	Jusqu'à ~150 kDa (grandes protéines)	Jusqu'à ~2 kDa (petits peptides)	Jusqu'à ~50 kDa (protéines moyennes)	Élémentaire	Jusqu'à ~10 kDa (grands peptides)	Élémentaire
Capacité 3D	À développer	Oui (résolution en profondeur de 5 nm)	Potentiel à développer	Oui	Potentiel à développer	En partie
Pression ambiante et temps réel	En partie (AP-MALDI)	✗	✓	✗	✓	✗
Appareil portable	Appareil de table disponible	✗	✓	✗	✗	✗
Quantification	Avec étalons internes mais difficile	Quantification relative	Avec étalons internes	Possible par marquage isotopique	Inconnu	✓

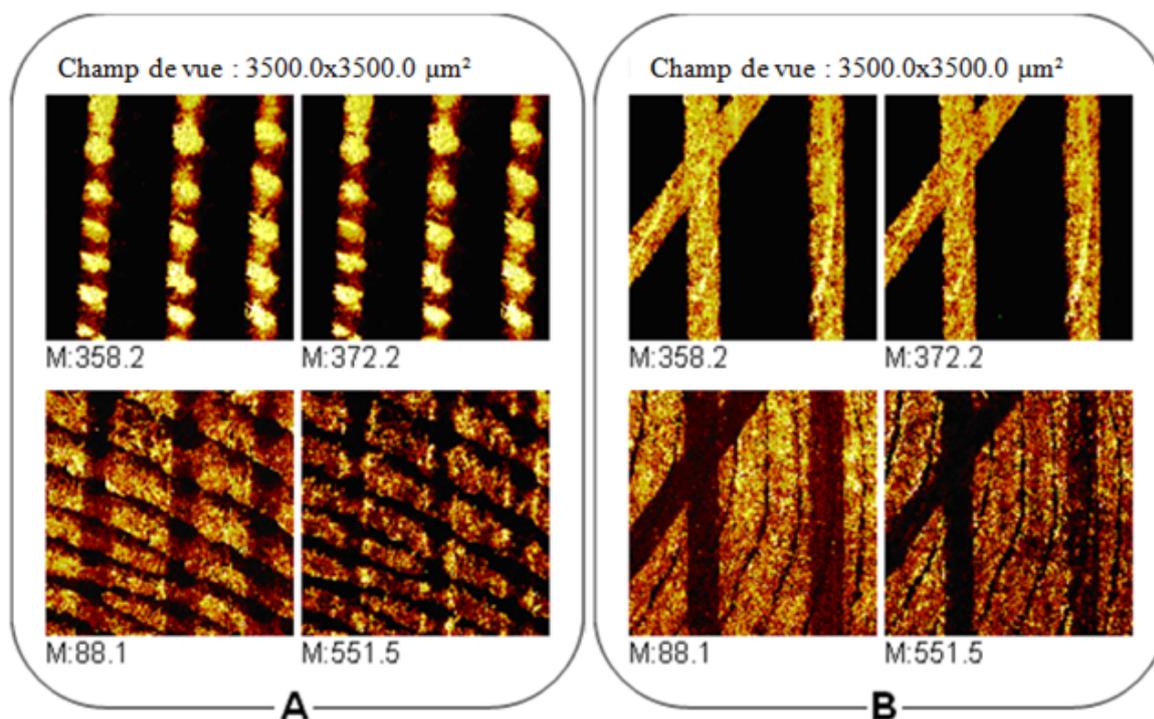


FIG. C-2. Images d'ions positifs obtenues par la technique keV ToF-SIMS représentant une empreinte digitale déposée (A) après et (B) avant encrage sur un substrat en papier. N.J. Bright, R.P. Webb, S. Bleay, S. Hinder, N.I. Ward, J.F. Watts, K.J. Kirkby & M.J. Bailey, *Analytical Chemistry*, 84(9), 4083–4087, (2012).

132. Un protocole publié en 2012 utilise l'imagerie classique keV ToF-SIMS pour établir si une empreinte digitale a été déposée avant ou après le tracé d'une ligne à l'encre. Les images présentées à la figure C.2 montrent les différences entre les deux cas à l'aide des pics de masse associés à l'encre et à l'empreinte. L'encadré A montre que lorsqu'une empreinte digitale est déposée sur un trait d'encre existant, les molécules d'encre (M:358.2 et 372.2) correspondant aux colorants sont masquées dans les zones où apparaît le relief de l'empreinte (voir M:88.1 et 551.5). L'encadré B montre que lorsqu'un trait d'encre est fait sur une empreinte digitale déjà déposée sur du papier, les ions caractéristiques des molécules d'encre (M:358.2 et 372.2) masquent alors ceux des molécules de l'empreinte et empêchent de les détecter (voir M:88.1 et 551.5).

C.2. Réacteurs de recherche

133. Les réacteurs de recherche sont de types très différents et ne sont généralement pas utilisés pour produire de l'électricité. Ils servent en premier lieu de source de neutrons pour des applications dans la recherche et dans divers domaines, comme la formation théorique et pratique. Ils sont plus petits que les réacteurs de puissance, dont la principale fonction est de produire de l'électricité. Leur puissance, qui s'exprime en mégawatts, peut être nulle (comme dans le cas d'un assemblage critique) ou atteindre jusqu'à 200 MWth, contre 3 000 MWth (soit 1 000 MWe) pour un grand réacteur de puissance classique.

134. En janvier 2013, on comptait 247 réacteurs de recherche en service dans le monde. En outre, 15 réacteurs de recherche étaient mis en arrêt et 150 en arrêt à long terme. Parmi les réacteurs en service, 49 sont de grande capacité, fonctionnant à un haut niveau de puissance et fournissant un flux de neutrons élevé. Par ailleurs, 304 réacteurs de recherche ont été déclassés. Quatre réacteurs sont en construction, dont un en Fédération de Russie (réacteur PIK), deux en France (réacteur Jules Horowitz et réacteur RES) et un en Jordanie (installation sous-critique)²⁵. Enfin, six projets de réacteurs de recherche étaient officiellement prévus, respectivement en Argentine (RA-10), en Belgique (MYRRHA), au Brésil (RMB), en Fédération de Russie (MBIR), en Jordanie (JRTR) et aux Pays-Bas (PALLAS). Cinq projets ont été annulés avant 2012. Les répartitions par âge, par niveaux de puissance et selon les applications des réacteurs de recherche en service sont présentées respectivement dans la figure C-5, la figure C-3 et le tableau C-2.

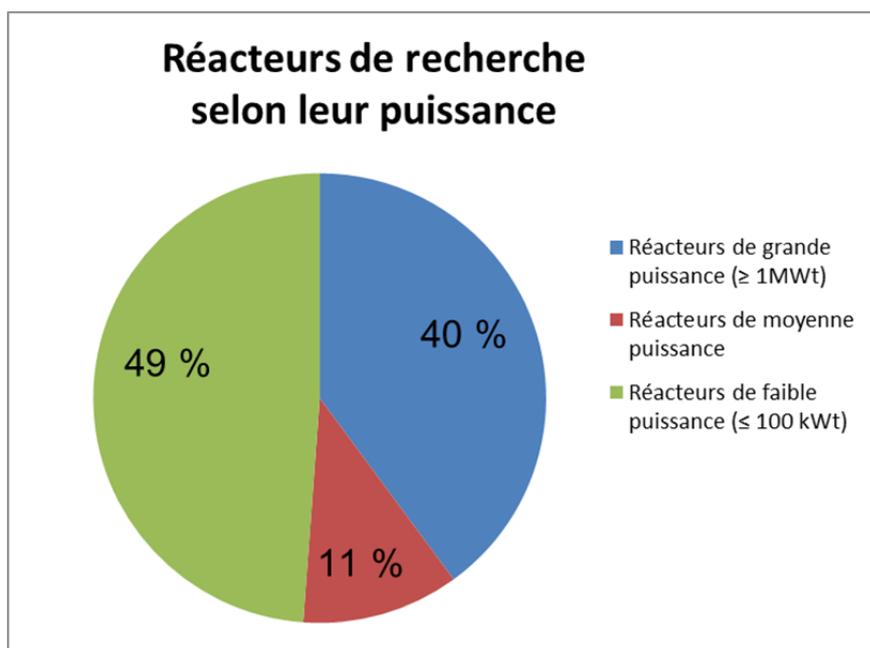


FIG. C-3. Répartition des réacteurs de recherche exploitables selon leur puissance (source : Base de données de l'AIEA sur les réacteurs de recherche, août 2012).

²⁵ D'après la base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>), qui comptabilise les réacteurs de recherche en service et ceux qui étaient exploités auparavant.

Table C-2. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde

Type d'application	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^a	États Membres dotés d'installations en service
Production d'isotopes	92	45
Diffusion neutronique	50	33
Neutronographie	71	40
Irradiation de matériaux	70	28
Transmutation (pierres précieuses)	20	11
Transmutation (dopage de silicium)	29	19
Formation théorique/pratique	165	53
Analyse par activation neutronique (AAN)	124	54
Géochronologie	25	21
Thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT), y compris la R-D	22	12
Autres ^b	103	31

^a Sur les 252 réacteurs de recherche considérés (229 en service, 15 en arrêt provisoire, 4 en construction et 4 prévus ; août 2012).

^b Parmi les autres applications figurent l'étalonnage et l'essai d'instruments et de systèmes dosimétriques, les expériences de blindage, les expériences de physique des réacteurs, les mesures de données nucléaires, et les visites et séminaires destinés au public.

135. Quinze États Membres envisagent ou prévoient de construire de nouveaux réacteurs de recherche. L'Arabie saoudite, l'Azerbaïdjan, le Liban, le Soudan et la Tunisie en sont aux premiers stades de la planification de la construction d'un réacteur de recherche. En Jordanie, la construction d'un réacteur polyvalent de 5 MW a démarré et, au Vietnam, il est prévu de construire un nouveau réacteur de recherche dans le cadre d'un contrat commercial global relatif à une centrale nucléaire. Des pays ayant un programme électronucléaire, comme l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, les Pays-Bas et la République de Corée, construisent ou planifient aussi de nouveaux réacteurs de recherche à des fins expérimentales et commerciales²⁶.

²⁶ Une publication récente de l'Agence intitulée *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (n° NP-T-5.1 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA) aide les États Membres dans ce domaine.



FIG. C-4. En 2012, le réacteur de recherche avancé chinois a atteint sa puissance nominale (60 MW), exploitée pendant un total d'environ 70 heures cumulées. Ainsi, 5 instruments à faisceaux de neutrons ont été mis en service une fois obtenus les premiers modèles de diffusion neutronique de la qualité requise.

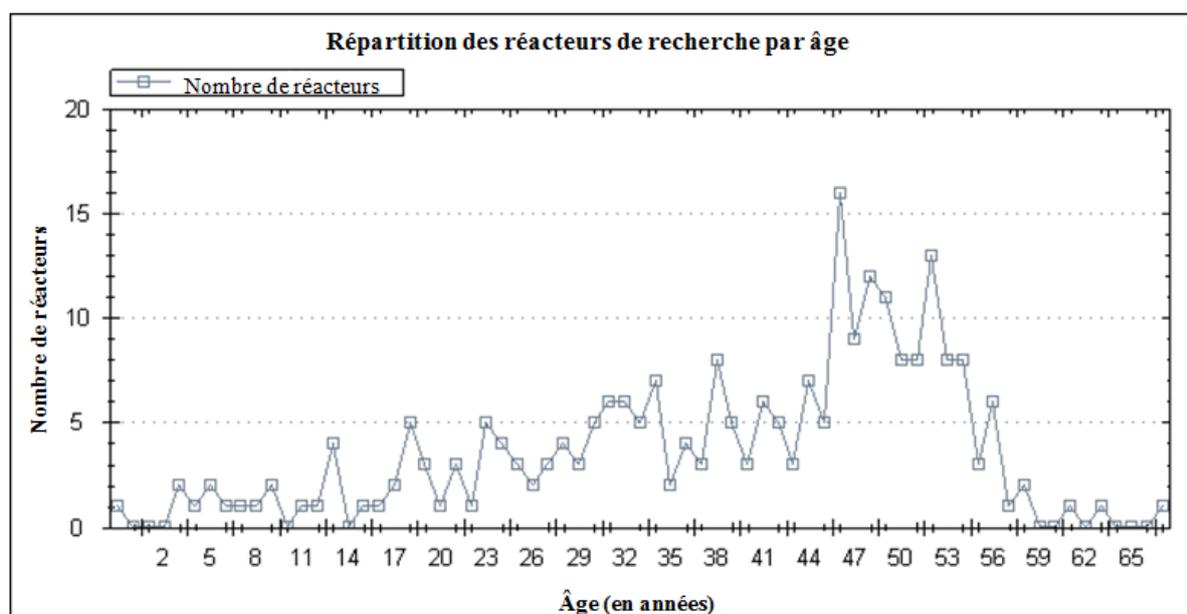


FIG. C-5. Répartition des réacteurs de recherche exploitables par âge.

136. Les réacteurs de recherche anciens étant déclassés et remplacés par des réacteurs polyvalents moins nombreux, le nombre de réacteurs de recherche et d'installations critiques en service devrait continuer à diminuer. Il faudra développer la coopération internationale pour permettre un large accès à ces installations ainsi que leur bonne utilisation. En 2012, les réseaux ou associations de réacteurs de recherche existant au niveau régional, dont la constitution est facilitée par l'Agence²⁷, ont favorisé une telle coopération et contribué à élargir la base de parties prenantes aux réacteurs de recherche.

²⁷ L'Agence a constitué différentes associations de réacteurs de recherche dans les régions de la Baltique, des Caraïbes (avec la participation de l'Amérique latine), de l'Afrique centrale, de l'Asie centrale, de l'Europe orientale et de la Méditerranée.

137. Un nouveau service de l'Agence, le service d'évaluation de l'exploitation et de la maintenance des réacteurs de recherche (OMARR), a été lancé en 2012 pour procéder à des examens complets par des pairs des réacteurs de recherche dans ce domaine ; vérifier le respect des procédures en vigueur concernant les installations ; suggérer des axes d'amélioration ; et faciliter le transfert mutuel de connaissances et de données d'expérience entre les experts de la mission et le personnel du réacteur. Après une réunion préparatoire en juin 2012, la première mission OMARR a été menée en décembre 2012 au réacteur du centre de recherche neutronique de l'Institut national de normalisation et de technologie des États-Unis. Une autre réunion préparatoire s'est tenue en octobre 2012 en vue d'une mission de ce type pour le réacteur TRIGA de l'Université de Pavie (Italie). La mission proprement dite devrait avoir lieu en 2013.

138. En 2012, l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale a continué de s'acquitter de sa mission consistant à réduire le plus possible la présence d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur nucléaire civil mondial. En 2009, elle a été étendue et porte désormais, non plus sur 129 mais sur quelque 200 réacteurs de recherche utilisant du combustible à l'UHE et, à la fin de 2012, 82 d'entre eux avaient été convertis au combustible à l'UFE ou mis à l'arrêt avant d'être convertis. Par exemple, le réacteur de recherche mexicain TRIGA MARK III a été converti à l'utilisation d'UFE à la place d'UHE et son dernier combustible à l'UHE a été réexpédié aux États-Unis en mars 2012. En septembre 2012, le réacteur de recherche polonais Maria a été entièrement converti pour utiliser du combustible à l'UFE spécialement conçu pour lui. En décembre 2012, l'Initiative a annoncé le retrait définitif de tout l'UHE d'Autriche après la conversion complète à l'UFE du réacteur viennois TRIGA. Avec la réexpédition sûre du combustible autrichien, tout le combustible civil à l'UHE pour réacteurs TRIGA a été définitivement retiré du commerce.

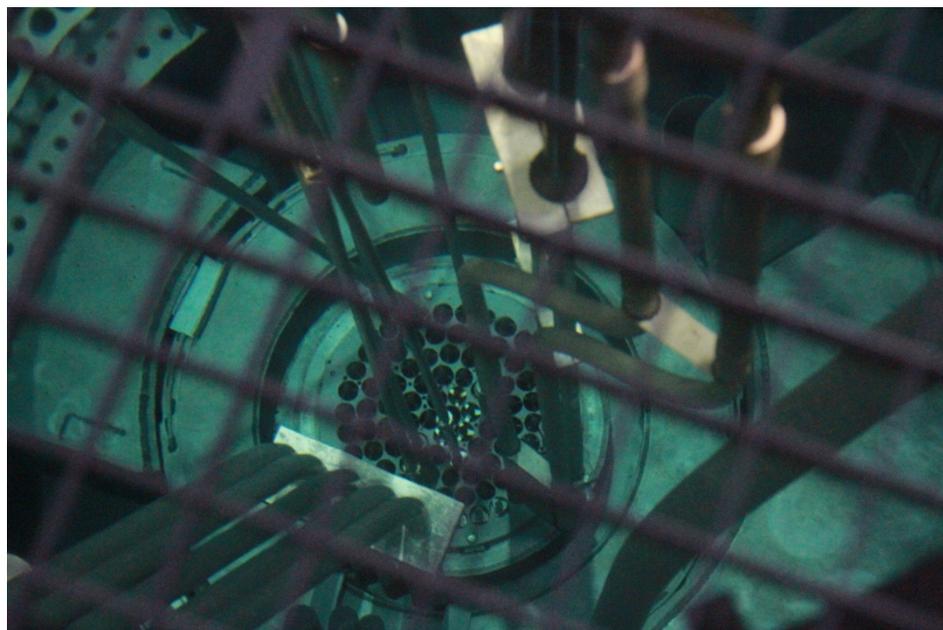


FIG. C-6. Cœur du réacteur de recherche Triga Mark-II, de l'Université technique de Vienne, dans lequel le combustible à l'UHE a été remplacé par du combustible à l'UFE en 2012.

139. Avec le soutien de l'Agence, plusieurs États Membres ont réexpédié vers son pays d'origine du combustible à l'UHE utilisé dans des réacteurs de recherche. Dans le cadre du programme de renvoi du combustible d'origine russe pour réacteurs de recherche, du combustible neuf et usé à l'UHE continue d'être réexpédié en toute sûreté vers la Fédération de Russie. En 2012, l'Agence a aidé au rapatriement de près de 110 kg de combustible neuf à l'UHE provenant de l'Institut de physique et de

technologie de Kharkov (Ukraine) et d'environ 20 kg de combustible usé à l'UHE provenant de l'Institut de recherche nucléaire de Kiev après le remplacement du combustible à l'UHE par du combustible à l'UFE dans son réacteur de recherche. En août et en septembre 2012, deux autres expéditions de combustible usé à l'UHE d'environ 100 kg, en provenance d'Ouzbékistan et de Pologne, ont été effectuées. Une autre expédition d'environ 27 kg d'UHE neuf retiré de Pologne a également été effectuée avec succès. La Chine a poursuivi ses efforts visant à remplacer l'UHE par de l'UFE dans ses réacteurs sources de neutrons miniatures et envisage de collaborer avec les États Membres ayant acheté de tels réacteurs pour les aider à les convertir et à rapatrier le combustible à l'UHE.

140. La conversion à l'UFE et le rapatriement du combustible à l'UHE sont souvent suivis d'une modernisation importante de l'infrastructure. Par exemple, en Ukraine, la construction d'une installation sous-critique hybride fonctionnant à l'UFE, a été lancée à l'Institut de physique et de technologie de Kharkov grâce à un appui financier et technique obtenu après la réexpédition de tout l'UHE vers la Fédération de Russie. Cette installation devrait entrer en service en 2014.

141. En 2012, on a constaté la fin des pénuries d'approvisionnement de ces dernières années et le retour à la normale des niveaux de production, même si des questions demeurent concernant l'approvisionnement à moyen et long termes. Le remplacement de l'UHE par de l'UFE dans les processus de production d'isotopes médicaux a repris de plus bel au cours de la période. L'Australie a annoncé l'expansion de sa capacité de production de molybdène 99 à l'aide d'UFE pour répondre à environ 25 % de la demande mondiale. À cette fin, une nouvelle usine de fabrication de produits de médecine nucléaire destinés à l'exportation sera construite d'ici à 2016, en même temps qu'une usine de traitement des déchets par la méthode Synroc, implantée sur le même site, pour les déchets supplémentaires liés à l'expansion des usines de fabrication de molybdène 99²⁸. L'Afrique du Sud a continué de produire, à des fins commerciales, du molybdène 99 au moyen de cibles à l'UFE ainsi que de convertir ses processus pour utiliser exclusivement de l'UFE, tandis que deux grands producteurs d'isotopes à usage médical (la Belgique et les Pays-Bas) ont commencé à mettre en œuvre des plans de remplacement de l'UHE par de l'UFE dans leurs processus de production à l'échelle commerciale. Enfin, l'Indonésie est devenue, fin 2011, un producteur à petite échelle utilisant exclusivement de l'UFE.

142. Les combustibles avancés de très haute densité à base d'uranium et de molybdène actuellement en cours de mise au point sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et à haute performance. Bien qu'on ait enregistré avant 2012 des avancées notables dans la mise au point et la qualification de combustible à l'uranium-molybdène, des efforts et des essais supplémentaires, notamment dans le cadre de programmes d'irradiation et d'examen après irradiation et dans le domaine des techniques de fabrication, s'avèrent nécessaires pour pouvoir assurer en temps voulu l'approvisionnement commercial en combustibles à l'UFE qualifiés de très haute densité.

143. Après la conversion des réacteurs TRIGA appropriés, la demande mondiale de combustible pour ce type de réacteurs a diminué. En 2010, lors d'une conférence sur le combustible des réacteurs de recherche²⁹, TRIGA International a annoncé que la faible rentabilité de l'activité d'approvisionnement en combustible remettait en cause sa capacité de fournir du combustible à long terme. Depuis lors,

²⁸ Synroc est une technologie australienne utilisant la compression isostatique à chaud pour réduire le volume des sous-produits nucléaires de 99 % (par rapport à d'autres méthodes comme la cimentation).

²⁹ La Réunion internationale spécialisée sur la gestion du combustible des réacteurs de recherche de 2010, organisée par la Société nucléaire européenne (ENS) en coopération avec l'AIEA, s'est tenue à Marrakech du 22 au 25 mars 2010.

le prix du combustible a considérablement augmenté, freinant ainsi l'exploitation de plusieurs des 38 réacteurs TRIGA utilisables dans le monde.

144. En 2012, l'AIEA a continué d'encourager l'utilisation des réacteurs de recherche pour la formation théorique et pratique. Les projets menés dans ce domaine ont notamment porté sur les moyens d'accroître le nombre et les types de cours disponibles et sur l'utilisation des réacteurs de recherche dans la formation scientifique de base.

D. Recours aux nouvelles technologies pour améliorer la sécurité et l'innocuité alimentaires

D.1. Élaboration de stratégies et de technologies pour la préparation et la conduite des interventions en cas d'urgence nucléaire et radiologique dans les domaines de l'alimentation et de l'agriculture

145. De nombreux facteurs doivent être pris en compte pour l'élaboration d'une stratégie de préparation et de conduite des interventions en cas d'urgence nucléaire ou radiologique touchant l'alimentation et l'agriculture. Même si une approche commune est avantageuse, toute stratégie doit tenir compte des conditions locales, propres au site, pour être efficace.

146. Des radionucléides ont été rejetés dans l'environnement au cours des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima Daiichi. À Fukushima, des niveaux élevés de césium et d'iode radioactifs ont été détectés dans les sols et les plantes, et les données obtenues dans le cadre du programme de contrôle radiologique des aliments ont rendu nécessaire l'introduction des premières restrictions sur la distribution de certains produits alimentaires le 21 mars 2011. Comme l'accident de Tchernobyl, celui de Fukushima Daiichi a clairement démontré qu'il était crucial d'utiliser des pratiques de terrain et de laboratoire harmonisées grâce à des protocoles d'échantillonnage et des stratégies d'analyse homogènes pour les denrées alimentaires et les sols et ce, aussi vite que possible après un événement.

D.1.1. Préparation et conduite des interventions d'urgence : nécessité de procédures d'analyse et de protocoles d'échantillonnage harmonisés

147. À la suite d'un événement ayant occasionné le rejet de radio-isotopes dans l'environnement, il faudrait utiliser des stratégies d'échantillonnage pour déterminer les radio-isotopes préoccupants ainsi que l'ampleur et la distribution spatiale de la contamination. Il conviendrait en outre d'adopter une approche standard basée sur des informations de référence appropriées pour éviter des comparaisons inappropriées de concentrations de radionucléides. Par exemple, lorsque les terres agricoles sont contaminées, les échantillons de sol doivent être prélevés à la même profondeur (couche supérieure ou zone racinaire des plantes).



FIG. D-1. Prélèvement d'échantillons de sol dans des rizières contaminées (avec l'aimable autorisation du Ministère de l'agriculture, des forêts et des pêches du Japon).

148. Si les protocoles d'échantillonnage sur le terrain et les pratiques d'analyse de laboratoire ne sont pas harmonisés, les données obtenues peuvent être incohérentes, ce qui rendra la prise de décisions difficile. Par exemple, le lessivage des radionucléides de la surface des végétaux feuillus peut influencer la quantité de radionucléides détectés et l'utilisation de différentes procédures de laboratoire (rinçage ou non des échantillons) pourrait compliquer l'interprétation des données utilisées pour l'application des restrictions alimentaires.

149. Il est donc crucial que les autorités chargées du contrôle radiologique des produits alimentaires et agricoles utilisent des protocoles et des procédures harmonisés. Ces procédures devraient être conçues pour permettre de prélever un nombre d'échantillons statistiquement valable, avec une distribution temporelle et spatiale appropriée, sur différents types de sols et de denrées alimentaires. Il faudrait avoir en place des orientations qui aident à déterminer l'importance de l'incertitude des analyses, le type de matériel d'analyse utilisé, et la méthodologie employée (par exemple analyse sur le terrain ou en laboratoire), y compris les lieux d'échantillonnage (sur le terrain, à des points de collecte, pendant le transport, dans des centres de distribution, à des points de vente au détail ou sur des marchés).



FIG. D-2. Essai de techniques de surveillance des radionucléides sur le terrain à Grabenegg (Autriche)[AIEA, 2012].

D.1.2. Manipulation et interprétation des données d'échantillonnage

150. Un grand volume de données d'échantillonnage des aliments peut présenter des défis logistiques majeurs. Des métadonnées descriptives (données relatives au contenu des informations) et la production et l'organisation de bases de données relationnelles sont essentielles lorsque de grands volumes de données sont collectés. Cela aide à maintenir la qualité des données, à produire des cartes et des données détaillées, et à fournir des informations exactes aux gouvernements, aux consommateurs et aux spécialistes de la réglementation.

151. Un autre problème de la gestion des données concerne la précision et l'étendue de la résolution géographique entre les séries de données. Par exemple, il est essentiel que la résolution géospatiale (géoréférencement) des échantillons d'aliments et de sol ayant trait aux zones de production soit similaire pour permettre la superposition et une présentation plus exacte des données. À cet égard, les systèmes mondiaux de localisation (GPS) peuvent accroître la valeur des données en fournissant des informations locales utiles aux parties prenantes dans le monde entier. Ces informations aident aussi à effectuer d'autres échantillonnages sur les mêmes sites, permettant de suivre les changements temporels des concentrations de radionucléides des aliments et des sols.

D.1.3. Cartographie des données

152. La cartographie est une activité importante qui peut être facilitée par des études de contrôle des rejets de radionucléides basées sur les sols, l'air et l'eau après des accidents majeurs. On peut par exemple combiner des études de la contamination de l'air et des sols pour cartographier l'étendue spatiale des radionucléides provenant de retombées. Ces renseignements, ajoutés aux données de contrôle des sols et des aliments, sont nécessaires pour déterminer les zones touchées, donner un schéma clair de la situation de la contamination, et déterminer les options techniques et socio-économiques de remédiation possibles pour la restauration de la production agricole. Ces données aident aussi dans l'application des contre-mesures agricoles permettant de fournir des conseils appropriés en temps voulu, y compris en ce qui concerne les restrictions sur la distribution et la consommation de produits agricoles, forestiers et piscicoles donnés.

153. On peut aussi effectuer un contrôle radiologique efficace basé sur les sols à l'aide de détecteurs gamma montés sur des véhicules appropriés ou portés par le personnel. Ce type de matériel devrait inclure des capacités de GPS pour enregistrer les lieux de prélèvement des échantillons, ce qui permettrait de déterminer rapidement les sites critiques de contamination et de prendre des décisions appropriées en temps voulu. Le recours à un système mobile de contrôle sur le terrain peut permettre de déterminer plus facilement les zones qui pourraient nécessiter un échantillonnage plus détaillé et une surveillance plus étroite. Les faits marquants récents survenus dans ce domaine comprennent l'établissement de liens entre les données géoréférencées et les technologies de cartographie géospatiale en vue de la diffusion rapide de l'information à l'intention des décideurs et du public.

D.1.4. Conclusions

154. Le rôle dirigeant des autorités responsables pendant et après une catastrophe, y compris un accident nucléaire, est essentiel. Cela comprend l'application des enseignements tirés et l'élaboration de stratégies et de technologies pour améliorer la préparation et la conduite futures des interventions en cas d'urgences nucléaire et radiologique.

155. Il importe d'élaborer des pratiques de terrain et de laboratoire pour des protocoles d'échantillonnage et des stratégies d'analyses harmonisés (y compris pour les sols, les produits agricoles et les denrées alimentaires) ainsi que des programmes de contrôle pour surveiller les produits. La communication et la gestion des données dans les domaines de l'alimentation et de

l'agriculture doivent aussi être améliorées. Cela est particulièrement important lorsque de nombreux pays sont touchés par un événement et qu'une approche coordonnée s'avère nécessaire pour la collecte et la gestion des données. Du matériel et des logiciels modernes aideront aussi à fournir des données exactes en temps voulu afin que les spécialistes de la réglementation puissent baser leurs décisions d'intervention sur les meilleures informations disponibles.

156. Il convient d'élaborer et d'appliquer en temps voulu des mesures pratiques, efficaces et harmonisées pour restaurer la production agricole et garantir la sécurité sanitaire des aliments. La mise en œuvre de ces mesures améliorera la collecte de données exactes et appropriées au cours des interventions en cas d'urgence future, ce qui permettra d'appliquer des contre-mesures et des stratégies de remédiation fondées sur des bases scientifiques pour gérer les incertitudes et rétablir la confiance dans les denrées alimentaires.

D.2 Nouvelles applications des technologies d'irradiation des aliments

157. Le rôle de l'irradiation dans l'amélioration de la qualité et la sûreté sanitaire des aliments, et dans la réduction des risques de maladies d'origine alimentaire est connu depuis de nombreuses années, et sa valeur potentielle est claire. L'irradiation des aliments peut jouer un rôle clé dans ces domaines en réduisant la détérioration des aliments ainsi que les pertes et le gaspillage, et en prévenant la propagation d'insectes nuisibles d'importance économique tout en ouvrant l'accès à des marchés à l'exportation lucratifs.

158. D'après l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), environ un tiers de toute la nourriture produite pour la consommation humaine, soit 1,3 milliard de tonnes, est perdue ou gaspillée chaque année. L'Organisation mondiale de la santé estime aussi que les maladies d'origine alimentaire tuent chaque année 2,2 millions de personnes – dont plus de 1,9 million d'enfants³⁰. La réduction des pertes et du gaspillage d'aliments et l'amélioration de la qualité et de la sécurité sanitaire des denrées alimentaires grâce à l'application sûre des technologies d'irradiation pourrait donc avoir un impact immédiat et notable sur la sécurité alimentaire dans le monde. L'exportation et le commerce d'aliments irradiés se développent à mesure que la technologie est plus largement acceptée et appuyée par les normes internationales.

D.2.1 Technologie d'irradiation des aliments

159. L'irradiation est l'une des rares technologies capables d'améliorer à la fois la qualité et la sécurité sanitaire des aliments car elle aide à lutter contre l'altération des aliments, les microorganismes pathogènes qu'ils transmettent (en les inactivant et en les détruisant) et les insectes nuisibles (en bloquant leur reproduction) sans nuire outre mesure aux caractéristiques sensorielles et aux propriétés organoleptiques de ces denrées. Elle procure les mêmes avantages que les autres procédés de conservation des aliments comme la chaleur, la réfrigération, la congélation ou les traitements chimiques, sans accroître sensiblement leur température et sans laisser de résidus potentiellement nocifs. L'irradiation peut aussi permettre de protéger les aliments emballés en prévenant la contamination croisée en cas de risques microbiologiques après le traitement.

³⁰ Sécurité alimentaire des aliments — Rapport du Secrétariat à la soixante-troisième Assemblée mondiale de la santé (A63/11), 25 mars 2010, http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA63/A63_11-fr.pdf



FIG. D-3. Des chercheurs du centre d'application des technologies des isotopes et des rayonnements de l'Agence nationale de l'énergie nucléaire à Jakarta (Indonésie) préparent des mets irradiés prêts à consommer destinés à des personnes au système immunitaire déficient, qui permettent de varier l'alimentation des intéressés et de réduire au minimum les risques de maladies d'origine alimentaire [AIEA, 2012].

160. L'irradiation des aliments consiste à les exposer à des rayonnements ionisants dans des conditions contrôlées. Les rayons gamma, les faisceaux d'électrons et les rayons X peuvent être utilisés pour les applications alimentaires en vertu des normes internationalement reconnues comme celles de la Commission mixte FAO/OMS du Codex Alimentarius et de la Convention internationale pour la protection des végétaux. Les divers types de rayonnements ionisants ont différentes propriétés et donc différents avantages et inconvénients technologiques, mais d'une manière générale, une dose donnée de rayons gamma, de faisceaux d'électrons ou de rayons X produit les mêmes effets, à savoir inactiver les organismes pathogènes et responsables des altérations, retarder le mûrissement, et bloquer la reproduction des insectes.

161. La technologie d'irradiation des aliments a beaucoup évolué depuis qu'elle a été proposée au début des années 1900 et depuis que la technique de mise au point de puissantes sources de rayonnements a été élaborée dans les années 1950 ; l'irradiation des aliments comprend aujourd'hui de nouvelles applications des rayonnements ionisants et différentes techniques de traitement, par exemple en combinaison avec des atmosphères froides ou modifiées.

162. L'irradiation des aliments est surtout pratiquée actuellement dans la région Asie-Pacifique et dans les Amériques, mais globalement, il n'y a pas assez d'installations d'irradiation traitant les aliments. Les rayonnements ionisants sont surtout utilisés pour stériliser les dispositifs médicaux et pharmaceutiques, préserver des objets, traiter des produits cosmétiques et du matériel d'emballage, et améliorer les matériaux des produits de consommation et des produits manufacturiers. La plupart des installations sont des installations à usages multiples qui traitent une gamme étendue de produits et, bien que l'irradiation des denrées alimentaires représente une petite partie de leur activité, peu d'entre elles sont conçues pour administrer les doses relativement faibles (0,1 à 10 kGy) utilisées pour traiter les aliments.

163. La plupart des aliments irradiés sont aujourd'hui traités avec des rayonnements gamma. Par exemple, plus de 95 % des 170 installations d'irradiation des aliments que compte la Chine utilisent des rayonnements gamma. La situation est similaire dans le cas des installations qui irradient des aliments pour les pays de l'Union européenne où 26 installations utilisent des rayonnements gamma et six des faisceaux d'électrons. Toutefois, l'utilisation des faisceaux d'électrons est en hausse dans le monde, et celle de ces faisceaux et des rayons X pour le traitement des aliments dans les laboratoires de recherche et les grandes installations commerciales suscite un intérêt croissant.

D.2.2 Sources de rayonnements

164. Les installations d'irradiation utilisent le cobalt 60 ou le césium 137 comme radio-isotopes pour produire des rayons gamma. Le cobalt 60 est utilisé dans les installations commerciales et la plupart des irradiateurs de recherche en raison de ses énergies de rayons gamma plus élevées et de sa stabilité inhérente comme métal, mais certains irradiateurs de recherche utilisent le césium 137 qui a une plus longue période. Un inconvénient des rayonnements gamma est qu'on ne peut les « éteindre », ce qui signifie que l'installation doit tourner continuellement pour permettre une utilisation économique maximale de la matière radioactive. En outre, compte tenu de la décroissance radioactive, il faut augmenter la durée d'exposition des produits alimentaires aux rayonnements ionisants de quelques points de pourcentage chaque mois et accroître périodiquement la source radioactive en ajoutant des radio-isotopes pour maintenir l'efficacité du traitement à un niveau acceptable. Ces installations ont été conçues pour permettre le confinement sûr de la puissante source de radio-isotopes mais sont relativement faciles à exploiter.

165. Les appareils à rayonnements, c'est-à-dire ceux qui produisent des faisceaux d'électrons ou des rayons X, utilisent de l'électricité pour produire des rayonnements ionisants et en conséquence, l'un de leurs avantages par rapport aux installations de production de radio-isotopes est qu'on peut les éteindre lorsqu'on n'en a pas besoin. Les faisceaux d'électrons sont produits en accélérant un flux d'électrons avec des champs magnétiques et électriques. Ils émettent la dose rapidement et peuvent fournir en moins d'une seconde une dose qu'une installation d'irradiation gamma prendrait plusieurs heures pour fournir. Toutefois, les faisceaux d'électrons ne pénètrent pas aussi profondément dans les aliments que les rayons gamma et ne sont pas appropriés pour traiter en une fois des lots importants de produits alimentaires en vrac. Ils permettent de traiter de plus petits emballages d'aliments en vrac à un rythme extrêmement rapide. Les faisceaux d'électrons sont déjà utilisés pour les applications commerciales dans les industries médicales, de modification des matériaux et de l'environnement, mais peu d'installations de faisceaux d'électrons sont conçues pour traiter efficacement les aliments, et des recherches s'avèrent nécessaires pour développer cette technologie en vue d'applications alimentaires.

166. Les rayons X sont émis par l'accélération d'électrons dirigés sur une cible métallique, par exemple de tantale, de tungstène ou d'or, ce qui produit un flux de rayons X. Bien qu'une quantité considérable d'énergie puisse être perdue sous forme de chaleur, l'irradiation X suscite un intérêt croissant car ces rayons pénètrent plus profondément que les faisceaux d'électrons et peuvent donc être utilisés pour irradier de grands emballages de produits alimentaires en vrac sans source radioactive. À Hawaï, une installation utilise des rayons X pour irradier des fruits et légumes frais exportés vers la partie continentale du territoire des États-Unis et une grande installation utilise actuellement cette technique pour stériliser des dispositifs médicaux. Il est probable que l'irradiation aux rayons X sera de plus en plus répandue à mesure que deviendront disponibles des appareils à rayons X de nouvelle génération plus efficaces et mieux conçus.

Table D-1. Comparaison de l'irradiation par des radio-isotopes et de l'irradiation avec un appareil à rayonnements

	Irradiation par des radio-isotopes	Irradiation avec un appareil à rayonnements	
Application	Les rayons gamma sont braqués sur les aliments	Un faisceau d'électrons traverse les aliments	Les rayons X sont braqués sur les aliments
Source	La source de rayonnements est un isotope radioactif (généralement du cobalt 60)	La source de rayonnements est un appareil utilisant de l'électricité.	
Pénétration	Rayonnements à pouvoir de pénétration élevé (méthode indiquée pour les palettes de produits alimentaires)	Pouvoir de pénétration limité (méthode indiquée pour les cartons de produits alimentaires)	Pouvoir de pénétration élevé (méthode indiquée pour les palettes de produits alimentaires)
Temps de traitement	Temps de traitement raisonnable (minutes/heures)	Traitement très rapide (secondes/minutes)	Traitement de durée intermédiaire (minutes/heures)
Période d'utilisation	Source toujours allumée, doit être entreposée dans une position sûre lorsqu'elle n'est pas utilisée.	On peut éteindre la source, et donc économiser l'énergie.	
Stade de développement	Technologie établie, utilisée dans la recherche et à l'échelle commerciale	Technologie à adapter pour les applications alimentaires. Utilisation dans la recherche et à l'échelle commerciale mais surtout pour des produits non alimentaires.	Technologie en évolution qui doit être adaptée pour les applications alimentaires. Elle est parfois utilisée dans la recherche et quelques installations commerciales
Prévalence	La plupart des aliments irradiés proviennent de ce type d'installation.	Quelques aliments sont traités avec des faisceaux d'électrons.	Une installation commerciale irradie les aliments avec les rayons X.
Maintenance	La puissance de la source diminue au fil du temps et doit être augmentée.	Il faut un bon approvisionnement en électricité et assurer la maintenance de l'appareil.	



FIG. D-4. Préparation de produits sains, pour l'exportation, à l'aide de la technologie de l'irradiation gamma, à Hanoi (Vietnam) [C. Blackburn, 2012].

D.2.3 Tendances

167. Il est difficile de livrer des sources de radio-isotopes dans de nombreuses parties du monde en raison des craintes de terrorisme et des complexités logistiques croissantes liées à leur expédition transfrontières. L'une des principales raisons de l'intérêt croissant que suscitent les technologies des faisceaux d'électrons et des rayons X est qu'elles permettent d'éviter les problèmes d'achat, de transport, d'entreposage, de stockage définitif et de garanties associés aux sources radioactives. Un autre avantage de l'irradiation des aliments est que les technologies basées sur des appareils à rayonnements permettent d'éviter les matières radioactives et leur connotation nucléaire, ce qui atténue les perceptions négatives des consommateurs. Il est envisagé que les technologies des faisceaux d'électrons et des rayons X évolueront donc pour offrir une autre option pour l'irradiation des aliments.

D.2.4 Exportation des produits alimentaires et commerce d'aliments irradiés

168. Il y a peu de données fiables sur les volumes d'aliments irradiés dans le monde, mais on sait qu'une quantité croissante d'aliments de grande valeur sont irradiés et commercialisés chaque année. Dans la plupart des régions du monde, des quantités limitées mais croissantes d'aliments sont irradiés en vue du respect des prescriptions sanitaires. Par exemple, les données publiées en 2012 indiquent que plus de 9263 tonnes de denrées alimentaires, essentiellement des cuisses de grenouille, des volailles et des épices, ont été irradiées dans l'Union européenne.

169. Une proportion importante et croissante d'aliments est irradiée pour des raisons phytosanitaires (par exemple pour éliminer les mouches des fruits, les mites et les cochenilles farineuses) et cette application commerciale relativement nouvelle stimule le commerce d'aliments irradiés. Par exemple, des fruits et légumes frais sont irradiés avec de faibles doses (moins de 1 kGy) pour l'exportation aux États-Unis d'Amérique depuis que le Service d'inspection zoosanitaire et phytosanitaire (APHIS) a décidé d'autoriser l'irradiation comme traitement « générique » de quarantaine pour les insectes nuisibles, à l'exception des pyrales à certains stades de vie. L'APHIS autorise aussi l'irradiation des

mangues du Pakistan à leur arrivée aux États-Unis, et de nouvelles capacités d'irradiation sont en train d'être créées au Mexique avec comme objectif l'exportation sur le marché des États-Unis. Des initiatives récentes en matière de réglementation lancées dans ce pays ont aussi étendu l'approbation de l'utilisation de rayonnements gamma et de faisceaux d'électrons pour le traitement de produits frais au point d'importation. Des entrepreneurs prennent des mesures pour utiliser ces approbations, ce qui stimule l'intérêt dans les pays qui autrement, n'auraient pas de capacité d'irradiation des aliments. Il est probable que le commerce des fruits et légumes frais irradiés continuera d'augmenter rapidement.

170. Plusieurs pays commercialisent des produits frais irradiés, y compris l'Australie, les États-Unis d'Amérique, l'Inde, le Mexique, la Nouvelle-Zélande, la Thaïlande, et le Vietnam. Cela favorise une tendance croissante à l'harmonisation interrégionale des approches et stratégies nationales en matière de commercialisation d'aliments irradiés par la lutte contre les insectes nuisibles importants en ce qui concerne la quarantaine des produits frais. Cette tendance est appuyée par les normes internationales pour les mesures phytosanitaires de la Convention internationale pour la protection des végétaux, notamment les normes élaborées grâce à des initiatives de recherche de l'Agence telles que les orientations pour l'utilisation de l'irradiation en tant que mesure phytosanitaire, et pour les traitements phytosanitaires contre des organismes nuisibles réglementés ; ces traitements comprennent quatorze interventions phytosanitaires par irradiation convenues au plan international qui ont été élaborées par le biais de projets de recherche coordonnée de l'Agence.

D.2.5 Conclusions

171. Le développement de l'urbanisation, la croissance démographique et le changement climatique soulèvent des inquiétudes en ce qui concerne la disponibilité et l'accessibilité d'aliments sûrs, sains et de bonne qualité. Les méthodes classiques servant à réduire au minimum les pertes après récoltes, y compris la fumigation et d'autres traitements chimiques, font l'objet d'examen de plus en plus minutieux compte tenu de leurs conséquences potentiellement dangereuses pour le public et l'environnement ; c'est notamment le cas de certains traitements chimiques soumis à des restrictions en vertu du Protocole de Montréal sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Il faut accroître l'utilisation des technologies d'irradiation des aliments, en particulier celles d'irradiation par les faisceaux d'électrons et les rayons X, pour améliorer sensiblement la disponibilité et l'accessibilité des aliments au cours des années à venir. Ces technologies peuvent fournir des traitements efficaces et sûrs pour assurer la qualité des aliments et réduire les pertes après récoltes dans le monde.

172. Les travaux futurs comprendront probablement des recherches pour développer encore la capacité d'irradiation à l'aide des technologies d'irradiation par les faisceaux d'électrons et les rayons X. Ces nouvelles technologies seront importantes pour les spécialistes de la réglementation, les décideurs, les chercheurs et les industries alimentaires en ce qui concerne l'élaboration d'initiatives et de politiques destinées à développer le commerce d'aliments irradiés.

173. L'irradiation constitue aussi un traitement après récoltes pouvant permettre d'exporter des produits conformes aux prescriptions de quarantaine, donc d'avoir accès à des marchés à l'exportation et à des devises, ce qui aidera à produire des revenus qui peuvent profiter directement aux producteurs de denrées alimentaires qui autrement, ne pourraient tirer parti des possibilités du commerce international.

E. Faits nouveaux dans la lutte contre le cancer à l'aide des technologies nucléaires

E.1. Avancées récentes dans le domaine de la cancérothérapie

174. La radiothérapie permet de traiter efficacement le cancer en administrant une dose de rayonnements précise à une tumeur sans trop endommager les tissus normaux avoisinants. Les avancées récentes en radiothérapie par photons présentent des avantages potentiellement importants par rapport à la radiothérapie classique. Elles comprennent des techniques comme la radiothérapie par modulation d'intensité (IRMT), la radiothérapie assistée par l'image (IGRT), la radiothérapie stéréotaxique, la radiochirurgie stéréotaxique, la radiothérapie stéréotaxique corps entier, la radiothérapie robotisée, la tomothérapie hélicoïdale, l'arthérapie volumétrique modulée et la radiothérapie asservie à la respiration. Ces technologies ont été brièvement présentées dans le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012³¹.

E.1.1 Questions liées à l'introduction de ces technologies

175. Certaines des technologies ci-dessus permettent d'administrer des doses de rayonnements précédemment inimaginables précisément et de manière non invasive sur un volume tumoral clairement défini. Leurs avantages potentiels sont une meilleure distribution des doses, une toxicité réduite, une administration rapide du traitement et un contrôle local plus précis, autant de facteurs qui augmentent les chances de survie. Toutefois, ces technologies se trouvent à différents stades de développement clinique et leur généralisation dans la pratique médicale nécessitera des données complémentaires grâce à des essais aléatoires bien conçus³². Il ressort des premiers éléments de preuves disponibles que l'IMRT permet d'épargner plus facilement les tissus sains. Par exemple, un examen récent des preuves cliniques concernant cette technologie³³ révèle qu'elle maintient la production de salive des glandes parotides et réduit la xérostomie aigüe et tardive (bouche sèche) au cours de la radiothérapie dans les cancers locaux avancés de la tête et du cou. Elle diminue aussi la toxicité rectale tardive chez les patients souffrant de cancer de la prostate – ce qui permet d'augmenter en sûreté les doses – et semble réduire la toxicité sur plusieurs autres sites tumoraux. Dans les cancers du sein, l'IMRT réduit la toxicité aigüe et améliore la cosmésie par comparaison avec la radiothérapie tangentielle classique.

176. La radiothérapie conformationnelle de base en 3D (RTC-3D), aujourd'hui considérée comme la technologie standard, permet un traitement de bonne qualité pour la majorité des patients à un coût raisonnable par personne. Certaines des nouvelles technologies telles que la thérapie par faisceaux d'ions carbone, la thérapie par faisceaux de protons, ou la radiothérapie stéréotaxique corps entier, sont appropriées pour des types spécifiques de cancer ou des situations cliniques spécifiques, mais ne peuvent remplacer la radiothérapie standard classique basée sur la thérapie RTC-3D par photons.

177. Pour choisir la technologie la plus appropriée, il faut avoir des informations claires concernant les technologies pertinentes. Les premiers essais mettant en jeu certaines de ces technologies étaient essentiellement centrées sur la faisabilité dans les situations cliniques en tant qu'état final primaire, alors que plus récemment, l'accent a été mis sur les résultats. Il faut aussi évaluer les nouvelles

³¹ Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012

³² Rosenblatt et al. *Radiother & Oncol*, 2012

³³ Staffurth J. *Oncol* 2010

technologies avec des paramètres comprenant des mesures de la qualité de vie, comme les résultats et les années de vie qualitative ajustées rapportés par les patients³⁴.



FIG. E-1. Accélérateur linéaire médical moderne équipé pour l'IGRT. Ce dispositif permet d'accroître la précision des radiothérapies grâce à des images fréquentes de la cible et/ou des tissus sains juste avant le traitement, et d'adapter la cible des rayonnements grâce à ces images. Photo : Eduardo Rosenblatt. Forum de l'ESTRO, Londres 2011.

E.1.2 Coût et efficacité des techniques avancées de radiothérapie

178. L'utilisation des technologies nouvelles et avancées de radiothérapie dépend de leur coût et de leur efficacité. Ces technologies ont des coûts d'investissement et d'exploitation plus élevés, et nécessitent des programmes d'assurance de la qualité (AQ) plus rigoureux ainsi qu'un personnel ayant les qualifications appropriées. Des procédures d'AQ capables de répondre aux exigences des technologies avancées sont actuellement en cours d'élaboration et devront être mises en œuvre en conjonction avec des essais cliniques comparatifs en bonne et due forme. L'introduction des options de technologie avancée en radio-oncologie doit aussi être étudiée dans le contexte de l'ensemble des besoins et des priorités, où les facteurs comme la disponibilité de spécialistes de la radiothérapie compétents et de financement et la maintenabilité du matériel sont importants. Il est nécessaire de former les radio-oncologues, les médecins, les manipulateurs en radiothérapie, les administrateurs et les ingénieurs de maintenance. Chacune de ces professions a besoin d'une formation importante, non seulement dans le domaine de la nouvelle technologie, mais aussi, assez fréquemment, au niveau de la formation théorique de base requise pour travailler sur le terrain.

³⁴ Vikram, Coleman et Deye. *Oncol* 2009, Part I & Part II



FIG. E-2. La radiothérapie robotisée est un système de radiochirurgie robotisée sans cadre. Les deux principaux éléments du dispositif sont le rayonnement produit par un petit accélérateur linéaire et un bras robotisé qui permet de diriger l'énergie de n'importe quelle direction vers n'importe quelle partie du corps. Photo: Eduardo Rosenblatt. Forum de l'ESTRO, Londres 2011.

E.1.3 Recours à la radiothérapie par particules pour le traitement du cancer

179. La radiothérapie par particules est l'utilisation de particules subatomiques « plus lourdes » en radiothérapie. Bien que l'électron puisse être considéré comme une « particule », elle est utilisée régulièrement en pratique clinique et n'a pas de propriétés radiobiologiques particulières. Lorsqu'elles traversent les tissus, les particules plus lourdes (neutrons, protons, ions carbone) déposent plus d'énergie par unité de longueur parcourue (en cm, par exemple). Elles sont donc plus susceptibles d'endommager l'ADN et de tuer les cellules. Les sources de rayonnements utilisant des photons ou des rayons X déposent une dose élevée de rayonnements plus près de la surface du corps. La dose absorbée se réduit à mesure que le photon pénètre dans les tissus. Les protons déposent peu d'énergie à la surface du corps. De plus, ils libèrent un maximum d'énergie (ou produisent une ionisation dense) lorsqu'ils ont presque fini de traverser les tissus. Cette libération d'énergie est appelée pic de Bragg — avant d'arriver au pic, la dose de rayonnements est faible, tandis qu'elle se réduit à zéro sur une distance très courte dès qu'elle l'a passé.

180. L'utilisation de la radiothérapie par particules pour le traitement du cancer a une longue histoire. Cette technologie a été élaborée au début des années 1950 avec les premiers traitements par faisceaux de protons, suivis de traitements avec des mésons pi (particules subatomiques chargées) négatifs et des faisceaux de neutrons. Les thérapies par particules, notamment la thérapie par faisceaux de protons et la thérapie par faisceaux d'ions carbone, suscitent un intérêt croissant et se développent depuis 20 ans. Il existe actuellement 40 centres de radiothérapie par particules dans le monde, dont six de radiothérapie par faisceaux d'ions carbone. En outre, 25 installations sont en cours de construction ou de développement³⁵.

³⁵ Groupe de coopération de la protonthérapie

181. Toutefois, le coût de ces installations reste une question importante. Il ressort d'une analyse des coûts de la radiothérapie externe par faisceaux d'ions carbone, de protons et de photons³⁶, que les dépenses d'investissement vont de 23 millions d'euros à 138 millions d'euros (en fonction des combinaisons particulières de thérapies), et les dépenses de fonctionnement de 9 millions d'euros à 36 millions d'euros par an. Dans le cas des dispositifs utilisant des ions carbone, des modèles commerciaux compacts plus récents ont été mis au point. Le coût d'un seul appareil basé sur ces nouveaux modèles est d'environ 16 millions d'euros contre 95 millions d'euros pour le modèle classique à protons.

182. Un autre problème de la radiothérapie par particules a trait à la mesure dans laquelle les preuves scientifiques disponibles confirment l'affirmation selon laquelle elle est supérieure à la radiothérapie par faisceaux de protons classique pour le traitement des tumeurs solides³⁷. Certains spécialistes travaillant dans des installations de radiothérapie par faisceaux de particules affirment qu'il n'est ni nécessaire ni justifié d'effectuer des essais cliniques pour comparer par exemple les protons et les photons étant donné que la répartition de la dose physique et le dépôt d'énergie sont clairement plus élevés pour les protons.

183. D'autres spécialistes soutiennent en revanche que comme dans n'importe quelle autre modalité innovante de traitement médical, il faut des preuves scientifiques pour justifier le choix d'une modalité à forte intensité de ressources par rapport au traitement standard. Ils estiment que le postulat selon lequel la radiothérapie par particules est supérieure à la radiothérapie par photons, sur la base de la seule répartition de la dose physique, ne suffit pas pour justifier le remplacement de la radiothérapie par faisceaux de photons par la radiothérapie par particules.

184. Il faut donc des données plus détaillées sur la radiobiologie, la radiophysique et les résultats cliniques de la radiothérapie par faisceaux de particules.

E.1.4 Curiethérapie

185. La curiethérapie consiste à implanter des sources radioactives à proximité ou à l'intérieur de tumeurs ou de cavités de l'organisme. En ce qui concerne les cancers gynécologiques en particulier, la curiethérapie a progressivement évolué de la technique bidimensionnelle à la planification tridimensionnelle basée sur l'imagerie transversale. Dans le cadre de cette méthode moderne, une image obtenue par tomodensitométrie ou par résonance magnétique est remise au patient après insertion des applicateurs de curiethérapie. Cela permet de voir non seulement les applicateurs, mais aussi la tumeur elle-même, ses extensions et les organes voisins qui risquent d'être endommagés par l'irradiation. La dose de rayonnements est alors prescrite non pas pour un point comme dans le passé, mais pour un volume comprenant non seulement la tumeur cancéreuse et ses extensions, mais aussi les volumes exposés à un risque élevé de contamination par les cellules cancéreuses³⁸.

186. Les coûts peuvent varier sensiblement en fonction de la technologie choisie. Certaines, comme la curiethérapie 3D, l'archthérapie volumétrique modulée et la radiothérapie stéréotaxique, peuvent utiliser les composants de radiothérapie installés existants pour l'imagerie ou la planification. D'autres, comme les technologies qui utilisent les ions carbone ou les protons, ont besoin d'un dispositif entièrement nouveau ou spécialement conçu.

³⁶ Peeters et al. *Radiother & Oncol*, 2010

³⁷ Holtzscheiter et al. *Radiother & Oncol*, 2012

³⁸ Haie-Meder et al. *Radiother & Oncol* 2005.

187. Pour compléter ces dispositifs, il faut des prescriptions supplémentaires d'assurance de la qualité (QA), y compris de nouveaux équipements et du personnel supplémentaire, et allouer du temps aux activités liées à l'AQ.

188. L'incorporation d'une technologie avancée à des systèmes de traitement et sa durabilité nécessitent des investissements supplémentaires dans des bâtiments et des équipements, du personnel supplémentaire bien formé et des contrats chers de maintenance pour le matériel sophistiqué et sensible utilisé.

E.2. Faits marquants concernant le recours aux radiopharmaceutiques dans l'imagerie et la thérapie du cancer

189. Le cancer, une maladie due à l'altération anormale de la structure biochimique et moléculaire interne d'une cellule, échappe donc aux mécanismes ordinaires de lutte qui réglementent la croissance tissulaire à travers un réseau complexe de signalisation cellulaire. C'est un processus compliqué, et même si des progrès sensibles ont été accomplis, il n'y a toujours pas de traitements efficaces contre de nombreux cancers. La présente section met en lumière certains faits marquants récents survenus dans la compréhension du cancer aux niveaux atomique et moléculaire.

E.2.1 Nanotechnologie et nanomédecine

190. La nanotechnologie est la manipulation de la matière aux niveaux atomique et moléculaire pour créer de nouveaux matériaux, dispositifs et structures. Au niveau moléculaire, les atomes isolés peuvent avoir des propriétés différentes de celles de groupes de mêmes atomes.

191. La taille aussi est importante dans la lutte contre le cancer en raison des types de comportement au niveau atomique. Des approches novatrices basées sur les propriétés particulières de certaines nanostructures pourraient aider à combattre le cancer. Cela a conduit à la naissance d'une nouvelle discipline, la nanomédecine, définie comme l'application médicale de la nanotechnologie. Elle exploite les propriétés physiques, chimiques et biologiques améliorées et souvent nouvelles des nanomatériaux pour permettre la détection précoce et la prévention du cancer, et pour améliorer le diagnostic, le traitement et le suivi de la maladie.

E.2.2 Propriétés des nanomatériaux susceptibles d'être utiles à la cancérothérapie

192. Les produits chimiques cytotoxiques et les composés radiomarqués (radiopharmaceutiques) font depuis longtemps partie des outils les plus efficaces pour le traitement du cancer. La chimiothérapie et les radiothérapies tuent les cellules cancéreuses, mais aussi les cellules saines. Les agents chimiothérapeutiques et les radiopharmaceutiques sont généralement de petites molécules capables de diffuser facilement et de pénétrer dans les tissus, mais il reste extrêmement difficile de fabriquer des médicaments capables de distinguer les cellules cancéreuses des cellules normales. Toutefois, les nanomatériaux pourraient fournir un moyen de cibler sélectivement les cellules cancéreuses sans endommager les tissus sains et ce, grâce à une faiblesse précédemment inexploitée de l'architecture des tumeurs. Les tumeurs nécessitent la formation de nouveaux vaisseaux sanguins pour fournir l'oxygène et les autres nutriments requis pour entretenir leur multiplication cellulaire rapide. Compte tenu de leur croissance rapide, ces nouveaux vaisseaux sont irréguliers et lacunaires, avec des espaces plus nombreux et plus grands dans leurs parois que les vaisseaux sanguins sains. La taille de ces espaces peut aller de quelques centaines à quelques milliers de nanomètres, contre deux à six nanomètres pour les pores des vaisseaux sanguins normaux. Les nanoparticules de 10 à 300 nanomètres ont une taille appropriée pour passer à travers les espaces des vaisseaux sanguins tumoraux sans pénétrer de manière notable dans les tissus sains. De fait, les nanoparticules s'accumulent de toute façon de manière sélective dans les tissus tumoraux en raison d'un phénomène purement physique appelé effet de perméabilité et de rétention (effet EPR).

193. Les nanoparticules ont la capacité de retenir dans leur noyau interne une substance thérapeutique qui se prête à des applications en combinaison avec l'effet EPR. Ainsi, la paroi externe de la nanoparticule protégera les composés encapsulés lors de leur migration vers la cible biologique. Le contenu interne peut être libéré pour exercer son effet thérapeutique une fois le tissu cible atteint. Les nanoparticules peuvent être conçues pour libérer leur charge thérapeutique en réponse à des changements physiques et chimiques survenant sur le site cible, comme lorsqu'elles arrivent dans l'environnement acide du noyau de la tumeur. Il y a actuellement de nombreux essais cliniques sur les reformulations nanotechnologiques de produits chimiothérapeutiques établies pour le traitement du cancer.

E.2.3 Progrès de la nanotechnologie pharmaceutique

194. La radiothérapie utilise des porteurs radiomarqués – les radiopharmaceutiques – conçus pour administrer une source de rayonnements localisés à l'intérieur de la zone de la tumeur. Les radiopharmaceutiques ont deux composants de dosage, un porteur et des traces d'un radionucléide qui décroît par émission de particules subnucléaires. L'effet thérapeutique dans la radiothérapie des tumeurs est dû aux particules alpha et bêta émises par les radionucléides et absorbées par la tumeur. Le radiopharmaceutique idéal devrait fournir le radionucléide de manière sélective au tissu tumoral sans que les rayonnements n'arrivent aux tissus normaux.

195. L'étude des nouveaux radiopharmaceutiques qui ciblent les tumeurs est actuellement l'un des domaines d'intérêt les plus attrayants tant dans l'imagerie que dans le traitement des tumeurs. Dans ce contexte, les récents progrès de la nanotechnologie pharmaceutique ont été axés sur l'élaboration d'approches prometteuses basées sur la conception de nanoporteurs conçus pour améliorer les résultats de la radiothérapie et la qualité des diagnostics. Un problème majeur est d'arriver à attacher fermement le radionucléide à sa molécule porteuse, et il semble que l'approche nanotechnologique puisse se révéler particulièrement avantageuse à cet égard. L'encapsulation de quelques atomes radioactifs dans l'enveloppe d'une nanoparticule constitue une méthode simple pour éviter de propager la radioactivité à des tissus sains et administrer la charge thérapeutique aux cellules cancéreuses cibles. Des nanosystèmes spécialement conçus peuvent servir de véhicules ciblés pour administrer des doses élevées de radionucléides à des cellules malignes sans toucher les tissus sains, réduisant ainsi considérablement les effets secondaires qui accompagnent généralement bon nombre de thérapies anticancéreuses actuelles.

E.2.4 Cibler les cellules cancéreuses

196. Une autre caractéristique importante des nanosystèmes est que leurs rapports surface-volume sont extrêmement élevés, ce qui rend la surface externe (corona) des nanoparticules particulièrement propice à l'enrobage avec de nombreuses parties de la molécule capables de conférer des propriétés fonctionnelles supplémentaires au système. Par exemple, les nanoparticules dont les coronas sont de charge positive (cationique) pourraient pénétrer facilement la plupart des membranes cellulaires car celles-ci sont de charge négative. Au contraire, les nanoparticules enrobées de molécules de charge neutre se répartiront différemment dans l'organisme et pourraient avoir accès à d'autres cibles spécifiques. L'enrobage de la surface des nanoparticules avec des molécules fonctionnelles, telles que les anticorps ou les peptides qui pourraient lui permettre de passer au travers des interactions avec des récepteurs de la membrane externe des cellules cancéreuses, peut aussi améliorer la sélectivité et la spécificité des tumeurs. On pourrait enrober les surfaces des nanoparticules avec des molécules qui pourraient empêcher le système immunitaire de les reconnaître, ainsi qu'avec des groupes de molécules qui pourraient aider à suivre l'itinéraire de la particule dans l'organisme pour s'assurer qu'elle arrive à l'endroit visé (Fig. E-3).

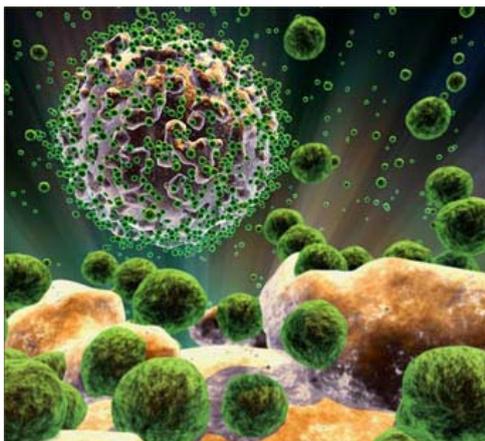


FIG. E-3. Représentation picturale des particules globulaires nanométriques (vert), dotées d'une double paroi de molécules lipidiques, qui flottent dans les liquides extracellulaires et attaquent les cellules cancéreuses pour administrer leur charge thérapeutique.

197. On estime à environ 240 le nombre de produits nanométriques entrés dans la chaîne de recherche pharmaceutique en 2006. Les nanoliposomes, qui sont des bulles creuses entourées d'une double couche de lipides, ont souvent été les nanoporteurs de choix pour l'administration des radionucléides thérapeutiques contenus dans la cavité interne. Le tableau E-1 présente une sélection de radiopharmaceutiques nanociblés du cancer actuellement en cours d'évaluation clinique.

Table E-1. Sélection de radiopharmaceutiques nanociblés du cancer

Nanoporteurs	Radionucléides
Liposomes	Iode 131, yttrium 90, rhénium 188, cuivre 67
Liposomes	Rhénium 186
Liposomes	Indium 111, rhénium 188
Liposomes	Indium 111, rhénium 188
Liposomes/immunoliposomes	Actinium 225
Immunoliposomes	Yttrium 90
Liposomes et dendrimères	Boron 10

198. Outre les liposomes, des chercheurs du monde entier sont en train d'explorer la possibilité d'utiliser diverses nanosphères polymériques naturelles et artificielles ainsi que des anticorps, l'ARN et l'ADN comme porteurs nanométriques.

E.2.5 Recherche-développement internationale

199. De nombreux travaux de recherche sont actuellement en cours sur l'utilisation de technologies des rayonnements pour synthétiser des porteurs nanométriques en vue de l'administration ciblée de substances thérapeutiques. Dans le cadre d'un projet de recherche coordonné de l'Agence, l'Argentine, le Brésil, la Chine, l'Égypte, les États-Unis d'Amérique, la Hongrie, l'Inde, l'Italie, la République de Corée, la Malaisie, la Pologne, la Serbie, la Thaïlande et la Turquie ont élaboré des méthodologies de synthèse de nanoparticules et de nanogels permettant de contrôler précisément la structure, la taille et la fonctionnalité du produit. Plusieurs États Membres ont aussi effectué des travaux destinés à permettre la compatibilité avec les installations et les procédures d'irradiation à grande échelle existantes (Italie), ainsi qu'à élaborer des procédures pour des nanoparticules et des nanogels à base de protéines (Argentine, Brésil), de polymères naturels (Malaisie, Thaïlande), de polymères synthétiques (Égypte, Hongrie, Italie, Malaisie, Pologne, République de Corée et Turquie) et de composés inorganiques (Chine, France, Inde, République de Corée et Serbie).

200. On a aussi mis au point pour les nanostructures hybrides des procédures dans lesquelles la surface des nanoparticules et des nanogels est enrobée de polymères et de biomolécules fonctionnels pour accroître leur biocompatibilité (France, Italie et Thaïlande). Des nanoparticules à base de chitosan (une substance produite à partir de crevettes ou d'autres crustacés) ont été obtenues en Thaïlande par radiolyse. Ces nanoparticules et les nanoparticules similaires pourraient être des candidats potentiels pour l'immobilisation de certains radionucléides.

201. Bien que plusieurs nanoporteurs ciblés pour des radiopharmaceutiques aient été appliqués avec succès à l'imagerie et au traitement de modèles de tumeurs aux stades clinique et préclinique, de nombreux problèmes doivent encore être résolus, comme ceux concernant leur stabilité à long terme, l'augmentation de leur production, ainsi que la possible toxicité et les produits de dégradation des nanoporteurs.

E.2.6 Conclusions

202. Par comparaison avec la radiothérapie classique ciblée, le ciblage multifonctionnel des nanoporteurs peut permettre d'administrer des charges plus élevées de radionucléides, d'agents chimiothérapeutiques et/ou d'agents d'imagerie aux cellules tumorales. Cela pourrait jouer un rôle crucial pour améliorer le traitement du cancer en permettant de tuer sélectivement les cellules malades sans endommager les tissus sains, ce qui diminuerait les effets secondaires et augmenterait le confort des patients. Toutefois, certains problèmes doivent encore être résolus, y compris ceux de la stabilité à long terme et de la non toxicité des nanoporteurs ainsi que celui de l'amélioration effective de la méthode de synthèse jusqu'à l'échelle industrielle tout en maintenant les spécifications du produit. Ces problèmes devront être examinés dans le cadre d'une coopération étendue entre les physiciens, les chimistes, les biologistes, les médecins, divers établissements, les hôpitaux, l'industrie et les organisations internationales.

F. Recours aux technologies nucléaires pour contrer les effets du changement climatique

F.1. Transformer l'agriculture pour relever les défis du changement climatique

203. Selon les estimations, la population mondiale devrait augmenter pour dépasser neuf milliards d'habitants d'ici à 2050, ce qui nécessitera un accroissement de la production agricole. Toutefois, sachant que l'approvisionnement en eau et en engrais se raréfie et que la qualité et la fertilité des sols se détériorent, la sécurité alimentaire dans le monde constitue un défi majeur. En outre, le changement climatique a un impact sur les niveaux de précipitation et des événements climatiques qui pourraient réduire la disponibilité de l'eau et influencer les conditions environnementales nécessaires à la production agricole. Le changement climatique affecte les activités agricoles, mais celles-ci l'influencent également. L'agriculture est considérée comme une cause importante du changement climatique dans le monde car elle représente plus de 14 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES)³⁹. Afin de relever les défis qui l'amèneront à s'adapter au changement climatique et à atténuer les effets de celui-ci sur la productivité des terres et la sécurité alimentaire, l'agriculture doit dès lors se transformer en profondeur et identifier et utiliser de nouvelles technologies et pratiques qui réduiront son empreinte GES.

F.1.1. Relever les défis du changement climatique et de la sécurité alimentaire grâce à une agriculture intelligente

204. La transition vers une agriculture dite intelligente face au climat est encouragée par la FAO et ses partenaires. Il s'agit d'une agriculture qui accroît durablement la productivité et la résilience (adaptation), réduit/élimine les gaz à effet de serre (atténuation) tout en promouvant la réalisation de la sécurité alimentaire nationale et les objectifs de développement.

205. L'agriculture intelligente face au climat répond aux besoins d'adaptation et d'atténuation du changement climatique. Le secteur agricole doit s'adapter afin d'éviter des pertes et d'accroître la résilience. Parmi les pratiques d'adaptation on retrouve l'agriculture de conservation, une efficacité accrue de l'utilisation et de la collecte de l'eau, la diversification des cultures, la sélection des races animales et le recours à des systèmes intégrés de production végétale et animale. L'atténuation inclut des mesures visant à réduire les émissions de GES dues à l'application d'engrais chimiques et de fumier tout en améliorant l'élimination des GES de l'atmosphère par les plantes et leur stockage ultérieur dans la matière organique du sol.

206. En 2012, le Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition, qui conseille le Comité de la sécurité alimentaire mondiale, a insisté dans un rapport sur l'importance de l'élaboration de stratégies en faveur d'une agriculture et d'une sécurité alimentaire résilientes face au climat. Dans ce contexte, l'agriculture intelligente face au climat revitalise durablement au niveau économique, social et environnemental la production alimentaire et le développement rural, particulièrement dans les pays en développement. Cette agriculture à faible émission ne nuit pas à la sécurité alimentaire car elle permet une utilisation plus efficace des ressources et une consommation réduite d'énergie.

³⁹ FAO 2012. Mainstreaming climate-smart agriculture into a broader landscape approach. Document de référence dans le cadre de la deuxième conférence mondiale sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique. Hanoi (Vietnam), 3-7 septembre 2012.

F.1.2. Rôle des techniques nucléaires dans l'agriculture intelligente face au climat



FIG. F-1. Les résidus de cultures laissés à même le sol dans une plantation de café au Vietnam réduisent l'évaporation de l'eau du sol.

207. Il est nécessaire d'obtenir des informations relatives à la proportion d'eau utilisée par les plantes (transpiration) et d'eau perdue par évaporation afin d'améliorer la productivité de l'eau dans l'agriculture, ce qui est essentiel en vue d'une réduction de l'utilisation globale des ressources en eau, particulièrement dans les environnements déficitaires en eau. Ces informations peuvent servir à l'élaboration de pratiques de gestion visant à maximiser l'utilisation des ressources en eau et mieux comprendre les sources de salinité des sols. La mesure des signatures isotopiques (oxygène 18 et deutérium) dans les eaux d'irrigation et l'eau présente dans le sol, les plantes et l'atmosphère autour des cultures permet de distinguer l'évaporation de la transpiration et d'estimer les pertes d'eau correspondantes au niveau des sols irrigués. Cette technique peut être utilisée afin de quantifier l'utilisation d'eau par la plante et les pertes d'eau par évaporation à différents stades de la croissance des plantes et entre différents systèmes d'irrigation, mais aussi de mieux comprendre l'origine de la salinité dans le sol. Elle sert à élaborer de nouvelles pratiques et de nouvelles technologies permettant d'améliorer l'irrigation, la productivité de l'eau pour les cultures ainsi que la gestion de la salinité des sols et de l'eau.



FIG. F-2. Les eaux collectées dans des étangs de ferme constituent une importante source d'irrigation dans les zones de cultures pluviales au Brésil.

208. La matière organique du sol (MOS) est un élément important de la fertilité et de la qualité des sols. Le carbone et l'azote en sont deux composantes essentielles. La MOS se décompose partiellement en présence d'humidité et libère du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. L'autre partie est stable, ne se décompose pas et ne rejette donc pas de CO₂ dans l'atmosphère.

L'ajout de résidus de cultures et de fumier, ainsi que l'introduction de légumineuses et la rotation des cultures ont pour effet d'accroître la MOS. Les signatures isotopiques du carbone et de l'azote (carbone 13 et azote 15) dans les sols et dans les rejets de gaz de CO₂ et d'oxyde nitreux (N₂O) peuvent être mesurées in situ à l'aide d'instruments portatifs et servir à quantifier les sources de matière organique perdues dans les terres agricoles. Ces informations peuvent servir à identifier des méthodes de gestion qui intègrent plus de MOS stable au niveau du carbone et de l'azote, et réduisent par conséquent les émissions de CO₂ et de N₂O des sols.

209. Il est important de disposer d'informations relatives aux besoins en eau des cultures afin de définir avec précision les programmes d'irrigation et de prévoir le rendement des cultures compte tenu des variations climatiques. L'estimation de ces besoins s'appuie sur des données relatives à la teneur en eau du sol à l'échelle d'une région. L'exercice s'est révélé difficile par le passé car la plupart des mesures de la teneur en eau du sol sont prises à des points donnés. Par conséquent, de nombreuses mesures sont nécessaires, ce qui s'avère onéreux et demande beaucoup de temps. Des évolutions récentes réalisées dans l'utilisation de neutrons produits naturellement par les rayons cosmiques et par les sols permettent de compléter les mesures effectuées à des points donnés, de manière à obtenir une mesure fiable de la teneur en eau des sols au niveau de l'ensemble du terrain et donc intégrer les données d'humidité du sol sur une vaste zone pouvant aller jusqu'à 40 ha. La technologie fournit également des informations sur la teneur en eau du sol jusqu'à une profondeur de 70 cm et peut être utilisée pour évaluer l'uniformité et l'efficacité de la répartition de l'eau, ce qui facilite les programmes d'irrigation aux endroits et aux moments requis, et par conséquent la réduction des besoins globaux en eau.

210. Il convient de mettre au point des variétés de cultures qui présentent un rendement supérieur et nécessitent des apports moindres, et qui sont mieux adaptées aux environnements défavorables causés par le changement climatique. Les mutations induites faisant appel aux techniques nucléaires occasionnent des variations génétiques et contribuent à une plus grande biodiversité. La sélection par mutations sert à mettre au point des variétés qui présentent une productivité accrue et une plus grande stabilité en termes de rendement dans des environnements défavorables, y compris des variations climatiques occasionnant inondations, sécheresses, vents violents et températures extrêmes. Les mutants améliorés contribuent à une utilisation réduite des terres et à une agriculture améliorée, plus respectueuse de l'environnement. Les variétés mutantes d'orge résistant, mises au point pour supporter des conditions météorologiques extrêmes à 5'000 m au-dessus du niveau de la mer au Pérou, en sont l'illustration. Ces variétés mutantes ont amélioré la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance de sept millions de personnes originaires de cette région des Andes. De même, des variétés mutantes de riz halotolérants ont été introduites dans les régions côtières du Bangladesh. Elles parviennent à pousser sur des sols salins, permettant ainsi d'ouvrir de nouvelles zones à la production agricole.

211. La plus grande avancée sera l'élaboration de méthodes de sélection accélérées pour des caractéristiques de mutation désirées, ce qui permettrait de raccourcir le cycle de sélection de 10-15 ans à 2-3 ans, et ainsi de répondre rapidement aux besoins des États Membres dans le domaine de l'élaboration de nouvelles variétés de cultures présentant des caractéristiques telles que des périodes de croissance raccourcies et une résistance au stress hydrique, au stress de salinité, aux orages et aux températures extrêmes.



FIG. F-3. Orge résistant à la grêle sur les hauts plateaux du Pérou. Ces variétés d'orge présentent une mutation qui produit des plants dont la tête est pendante, ce qui les protège en cas d'orage. L'orge peut ainsi être cultivée à des altitudes inédites au Pérou, avec un rendement multiplié par six.

212. Produire des animaux sains capables de survivre avec des ressources alimentaires limitées, tout en augmentant simultanément l'utilisation de l'énergie de leur alimentation et en atténuant les émissions de gaz à effet de serre produites comme sous-produits, constitue un défi majeur. Des analyses métaboliques et génétiques du système digestif du bétail sont effectuées pour caractériser ou déterminer l'écologie et la diversité des méthanogènes en vue d'identifier la présence et le rôle des microorganismes dans la digestion d'éléments nutritifs. Ceci permet d'élaborer des stratégies d'optimisation de l'efficacité des micro-organismes du rumen et/ou des additifs alimentaires agissant sur celui-ci dans l'accroissement de l'absorption d'énergie et la diminution des émissions de méthane et de CO₂. En outre, l'utilisation de marqueurs génétiques pour la sélection de donneurs de sperme présentant des caractéristiques recherchées telles que l'adaptabilité aux environnements chauds et humides, la résistance aux maladies et une production accrue de lait et de viande, permettra de promouvoir le secteur de l'élevage au cours des prochaines décennies. Toutes ces recherches font appel à des techniques nucléaires ou connexes, soit pour le traçage (marquage isotopique d'éléments nutritifs afin de retracer leurs voies métaboliques) soit comme méthodes de laboratoire (radio-immunodosages, analyses génétiques moléculaires, etc.) en vue de la mesure de paramètres ciblés.

F.1.3. Conclusions

213. Pour être efficace, une agriculture intelligente face au climat doit reposer sur des informations relatives aux facteurs influençant ou favorisant les interactions entre le sol, l'eau, les cultures et le bétail, afin que le système agricole puisse s'adapter efficacement au changement climatique. Il est crucial d'analyser et d'évaluer diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation sur le terrain afin de promouvoir les meilleures méthodes de gestion agricole et ainsi d'influer positivement sur la résistance, la sécurité alimentaire et les bénéfices à long terme. Les techniques isotopiques et nucléaires fournissent des informations nouvelles qui contribuent à l'amélioration continue de l'agriculture intelligente face au climat.

F.2. Recours aux techniques nucléaires pour étudier le changement climatique et ses impacts sur l'environnement marin



FIG. F-4. Le changement climatique menace les ressources côtières, dont les récifs coralliens, qui constituent d'importants bassins de biodiversité, un habitat et une pépinière pour de nombreuses espèces marines (photo : Robert B. Dunbar).

214. Il est très important de mettre au point des outils et des stratégies afin de permettre à l'environnement marin et à ses ressources de s'adapter au changement climatique, ainsi que d'atténuer l'impact du changement climatique sur cet environnement. Comme l'ont souligné le Pacte pour les océans du Secrétaire général de l'ONU et les discussions internationales qui se sont tenues lors de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable (Rio+20), atteindre cet objectif nécessitera une coopération internationale accrue dans le domaine de la recherche, la surveillance et l'observation scientifique marine, particulièrement des écosystèmes plus vulnérables.

215. Depuis le dix-neuvième siècle, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère s'est accrue pour passer de 280 parties par million (ppm) à 390 ppm en 2011. Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre qui régule l'équilibre thermique global de la Terre. Les océans absorbent approximativement un tiers du CO₂ émis chaque année par l'homme, essentiellement dû à l'utilisation de combustibles fossiles et aux changements de l'utilisation des terres.

216. On sait que la présence accrue de CO₂ dans l'atmosphère joue un rôle majeur dans les changements climatiques et les phénomènes qui y sont liés, comme le réchauffement de la planète, la hausse du niveau des mers, l'acidification des océans, l'appauvrissement en oxygène, et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes. À son tour, le changement climatique a divers effets directs et indirects majeurs sur les ressources halieutiques, l'aquaculture côtière, les récifs coralliens et d'autres ressources côtières, mais aussi sur les structures d'habitat humain dans les grandes villes côtières des basses terres. Les modifications du cycle de l'eau affectent également l'érosion côtière et la distribution, le transport et la biodisponibilité d'éléments nutritifs et polluants qui pourraient conduire à une eutrophisation – un processus d'enrichissement excessif de l'eau en éléments nutritifs, qui favorise la croissance et la décomposition ultérieure des algues et des plantes, ce qui accroît la consommation d'oxygène et débouche en fin de compte sur un appauvrissement de l'eau en oxygène – et à une contamination des produits de la mer et des produits aquacoles.

217. Les technologies nucléaires sont utiles pour comprendre quelques-unes des questions scientifiques élémentaires sur l'impact des conditions ambiantes des océans sur les écosystèmes et organismes marins.

218. Les radionucléides et les isotopes stables peuvent être utilisés afin d'analyser dans les études climatologiques de nombreux paramètres environnementaux comme la température, les précipitations et l'acidité de l'eau de mer. Les glaciers, les sédiments, les nappes glaciaires et les coraux peuvent servir de « systèmes de conservation » ou d'« enregistreurs » des conditions environnementales qui prévalaient lors de leur formation. Les radionucléides et les isotopes stables permettent également de mieux comprendre des processus physiologiques comme la calcification ou la bioaccumulation de produits chimiques, ainsi que les réactions connexes des organismes aux changements environnementaux.

219. Les Laboratoires de l'environnement de l'AIEA ont utilisé et développé des techniques nucléaires et isotopiques afin de contribuer à la compréhension générale des modifications de l'environnement marin dues au changement climatique, notamment du réchauffement et de l'acidification des océans.

F.2.1. L'oscillation australe El Niño

220. Le phénomène de l'oscillation australe El Niño (ENSO) constitue un événement climatique important, qui se reproduit à intervalles réguliers de quelques années et a un impact considérable sur les conditions météorologiques et les économies de nombreux pays de la région Pacifique. Il joue également un rôle sur la formation de glace dans l'Antarctique. L'oscillation australe s'accompagne de variations de la température de la surface de l'océan Pacifique tropical est (le réchauffement étant baptisé El Niño, le refroidissement La Niña) et de la pression atmosphérique de la surface de l'océan Pacifique tropical ouest. Elle modifie également la circulation océanique au niveau local, qui est un des éléments clés du contrôle du climat sur notre planète.

221. Les variations extrêmes de ces oscillations climatiques provoquent des phénomènes météorologiques sévères tels que des inondations et des sécheresses dans de nombreuses régions du monde, et ont un impact considérable sur la pêche dans de nombreux pays. Les pays les plus affectés sont ceux qui dépendent de l'agriculture et de la pêche, particulièrement en bordure de l'océan Pacifique.

222. Les études du phénomène ENSO basées à la fois sur les radionucléides et les isotopes stables montrent que pendant ces événements El Niño, les températures des océans changent dans les régions tropicales et subtropicales, et s'accompagnent de variations dans l'évaporation et le fractionnement isotopique, ce qui modifie la teneur en deutérium, carbone 13, carbone 14 et oxygène 18 de l'eau de

mer. Ces modifications peuvent être observées dans les sédiments, les coraux, les glaciers, les réservoirs d'eau souterrains ou les cercles des arbres. Ces études aident à expliquer le phénomène ENSO pendant une période remontant à plusieurs millénaires.

F.2.2. Le cycle du carbone

223. L'océan est un important puits de carbone et le piégeage de quantités croissantes de CO₂ entraîne son acidification. Le « fonçage des particules » est le principal mécanisme de transport du carbone et des contaminants de la surface de l'océan vers les fonds marins. Ce processus concerne notamment le carbone atmosphérique, converti du CO₂ en biomasse et fixé dans les eaux profondes par le biais du fonçage des particules. Il est dès lors essentiel de comprendre les mécanismes qui contrôlent le flux de matières de la surface au fond de l'océan.

224. Le thorium 234, un radionucléide naturel, est de plus en plus utilisé pour quantifier les flux de particules et le transfert de carbone de la couche supérieure de l'océan en haute mer et dans les zones côtières. C'est un isotope réactif produit par décroissance de son parent l'uranium 238 qui est dissous dans l'eau de mer. Le déséquilibre entre celui-ci et l'activité totale mesurée du thorium 234 reflète le taux net du transfert de particules de la surface de l'océan sur plusieurs jours à plusieurs semaines.

225. Plusieurs processus environnementaux liés au changement climatique pourraient modifier le cycle du carbone et le piégeage de celui-ci dans les océans. La hausse du CO₂ atmosphérique et l'augmentation de la teneur de l'eau de mer en CO₂ qui en résulte affectent progressivement l'acidité des océans. Cette acidité accrue de l'eau peut influencer plusieurs processus biologiques qui se traduisent par la formation et la sédimentation de particules dans la colonne d'eau (une colonne d'eau fictive allant de la surface au fond de l'océan). Les changements de température affectent le moment de la stratification de la colonne d'eau au printemps et en été dans de nombreuses zones géographiques du monde. Ils perturbent la dynamique du transfert de particules et de carbone car la stratification de la colonne d'eau est un processus physique essentiel dans le transfert de particules vers le fond. Il a déjà été prouvé qu'un réchauffement des températures influence l'étendue et l'épaisseur de la glace aux latitudes élevées.

F.2.3. Impacts de l'acidification des océans

226. Les études de modélisation ont clairement montré que les régions polaires et tropicales sont particulièrement sensibles aux effets combinés des changements climatiques, à savoir l'élévation de la température et l'acidification des océans. L'Agence élabore des études expérimentales sur les effets de l'acidification des océans afin de prédire avec plus de précision leurs impacts sur la biodiversité marine.

227. Les radio-isotopes sont des outils utiles pour analyser les réactions d'organismes marins à une hausse de température, une hausse de la pression partielle de dioxyde de carbone ($p\text{CO}_2$) et une baisse de la salinité et de la teneur en oxygène. Ils ont été utilisés pour justifier certains effets biologiques qui devraient accompagner les changements océaniques dans le monde. On a recours aux techniques nucléaires pour analyser certains processus biologiques importants comme la calcification, la biominéralisation, le métabolisme et la bioaccumulation d'éléments traces.

228. L'isotope émetteur bêta calcium 45 est aujourd'hui couramment utilisé afin de mesurer les taux de calcification chez de nombreuses espèces, notamment les coraux bâtisseurs de récifs. Il donne une bonne estimation du taux net de calcification des structures calcaires. La biominéralisation peut être étudiée par l'incorporation d'autres éléments majeurs des structures calcaires comme le strontium 85.

229. Les radio-isotopes ont été particulièrement utiles dans l'étude de processus métaboliques dans différentes conditions environnementales. Ainsi, l'anhydrase carbonique, une métalloenzyme à zinc,

est un catalyseur de l'absorption de carbone par les organismes marins pour la photosynthèse, les processus de biominéralisation et l'équilibre acido-basique systémique, et elle est sensible à l'acidification des océans ou à l'appauvrissement de l'eau de mer en oxygène. Le radio-isotope zinc 65 est utilisé pour évaluer l'effet de doses élevées de $p\text{CO}_2$ sur le métabolisme d'organismes par l'analyse de sa cinétique d'absorption. De manière plus générale, les radio-isotopes tels que le cobalt 57, le cobalt 60, le manganèse 54 ou le sélénium 75 sont intéressants compte tenu de l'importance métabolique de leurs isotopes stables correspondants. Ces éléments traces présentent des fonctions physiologiques essentielles et peuvent être influencés par le réchauffement, l'acidification des océans, l'hypoxie (appauvrissement en oxygène) ou un changement de salinité. Des processus physiologiques spécifiques comme la régulation ionique ont été analysés grâce à des techniques très sensibles utilisant des radiotraceurs tels que le sodium 22 et le chlore 36.

F.2.4. Effets futurs

230. À l'avenir, les modifications de la chimie des carbonates océaniques en raison de l'acidification ou de leur salinité consécutive à l'augmentation des apports d'eau douce dans les zones côtières devraient altérer la spéciation chimique des éléments traces et changer leur biodisponibilité pour les organismes marins. En outre, les modifications au niveau de la température, l'hypercapnie (niveau élevé de CO_2), l'hypoxie (faible niveau d' O_2) et la salinité influenceront des fonctions physiologiques comme la régulation ionique. On peut utiliser des radiotraceurs dissous pour analyser les capacités de bioaccumulation lors d'une hausse de $p\text{CO}_2$. L'analyse radio-isotopique a fourni des données utiles pour comprendre les mécanismes de toxicité dans les organismes marins et évaluer le risque lié à la contamination des produits de la mer destinés à la consommation humaine. Ces techniques ont une grande sensibilité et une haute résolution, et peuvent être utilisées pour comprendre les effets causés par le carbone sur les organismes marins et réduire les incertitudes concernant les effets biologiques de la modification de la chimie des océans. Disposer de données fiables et réduire les incertitudes est essentiel pour la production de modèles précis des effets sur la pêche et pour les estimations des impacts socio-économiques de l'acidification des océans.

F.2.5. Recours aux isotopes stables dans les études du changement climatique

231. On utilise les isotopes stables afin d'analyser les processus océaniques qui sont très pertinents en ce qui concerne l'acidification des océans en raison du changement climatique, et le cycle global du carbone.

232. Les combustibles fossiles présentent une combinaison unique des deux isotopes stables du carbone, le carbone 12 et le carbone 13, et leur combustion laisse une signature isotopique distincte dans l'atmosphère. L'invasion de cet élément anthropique dans les océans ayant été vérifiée au moyen de mesures des isotopes du carbone, le carbone 13 peut servir d'empreinte afin de déterminer comment les océans absorbent les gaz à effet de serre. Le carbone 13 dissous dans l'eau de mer est également absorbé par les organismes calcifiants, ce qui permet d'utiliser sa signature dans les coquilles comme instrument de datation paléoclimatique. On procède également à une reconstitution de l'acidité de l'eau de mer sur la base de la composition isotopique du bore 11 de massifs coralliens de longue période. D'autres indicateurs, comme les mesures d'isotopes de l'oxygène (oxygène 18 et oxygène 16) renfermés dans les coquilles carbonatées de microfossiles marins ou dans des coraux de longue période, ont été largement utilisés pour estimer le schéma des températures à la surface des océans, de la salinité et des régimes de circulation comme l'intensité et la fréquence d'événements ENSO passés, ainsi que les changements liés aux glaciations et aux périodes interglaciaires. Les changements à long terme des rapports isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène dans les précipitations reflètent également les variations des conditions climatiques locales telles que les trajectoires de tempêtes, les trajectoires de masse d'air, l'historique des précipitations et la température de l'air, qui peuvent toutes être fortement influencées par la circulation des masses d'eau.

Les rapports isotopiques de l'azote ont également permis de déterminer les changements de la productivité et des niveaux d'éléments nutritifs dans la colonne d'eau et l'origine des composés azotés.

233. Parmi les autres nouvelles techniques utilisant les isotopes stables pour analyser le changement climatique, on peut citer les mesures de la composition en isotopes stables du carbone et de l'hydrogène de biomarqueurs lipidiques spécifiques qui ont été préservés dans des archives environnementales comme les sédiments. Ces biomarqueurs lipidiques spécifiques, dérivés de ce qui était jadis des organismes vivants, peuvent être retracés jusqu'à leurs composés précurseurs, leur composition en isotopes stables reflétant les conditions environnementales et climatiques qui prévalaient au moment de leur production. Ils peuvent dès lors servir d'indicateurs pour reconstituer les températures, les niveaux de CO₂, l'humidité, la productivité marine et les apports de sédiments dus à l'érosion des terres, mais aussi pour évaluer la végétation à l'échelle d'un bassin et l'impact des activités humaines sur des échelles de temps géologiques.

F.2.6. Conclusions

234. Les techniques nucléaires et isotopiques constituent des outils uniques qui contribuent à mieux comprendre les modifications chimiques, biologiques et écologiques que subit l'environnement marin en raison du changement climatique.

235. L'horloge interne des radionucléides naturels permet de dater des fragments de l'environnement au sein desquels les indicateurs isotopiques interviennent pour de nombreux paramètres environnementaux. La reconstitution de conditions climatiques historiques dans les coquilles carbonatées de fossiles marins, dans des coraux de longue période ou des sédiments peut aider à prévoir le comportement de paramètres tels que les températures, les précipitations et l'acidité de l'eau de mer.

236. Ces connaissances sont nécessaires pour étudier les impacts écologiques et socioéconomiques des conditions climatiques futures sur la vie et les écosystèmes marins, notamment la pêche et l'aquaculture, mais aussi pour aider les sociétés à élaborer face à ces conditions des stratégies d'atténuation ou d'adaptation, ce qui nécessitera une coopération internationale constante et accrue dans le domaine de la recherche, la surveillance et l'observation de l'environnement marin, particulièrement pour les écosystèmes plus vulnérables.