

Cinquante-sixième session ordinaire

Point 16 de l'ordre du jour provisoire
(GC(56)/1 et Add.1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012

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 2011.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* passe en revue les domaines suivants : applications énergétiques, fission et fusion avancées, utilisation des accélérateurs et des réacteurs de recherche, technologie nucléaire dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, environnement, ressources en eau, et production de radio-isotopes et technologie des rayonnements. Une documentation complémentaire au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* est disponible sur le site web¹ de l'Agence en anglais, dans les domaines suivants : élaboration de solutions de remplacement de l'irradiation gamma pour la technique de l'insecte stérile (TIS) ; imagerie pour le diagnostic et le traitement du cancer du sein ; applications de la technologie des rayonnements à l'extraction et la préparation de minerais ; options technologiques pour la première centrale nucléaire d'un pays ; rôle des réacteurs de recherche dans l'introduction de l'électronucléaire ; et utilisation et gestion des sources radioactives scellées.
- 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 pour 2011* (GC(56)/2), en particulier dans la partie Technologie, et dans le *Rapport sur la coopération technique pour 2011* (GC(56)/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/GC56/Agenda/index.html>

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012²

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. En 2011, l'énergie nucléaire a continué de jouer un rôle important dans la production mondiale d'électricité malgré l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi. La capacité totale de production d'énergie d'origine nucléaire a légèrement baissé par rapport aux années précédentes en raison de la mise à l'arrêt définitive de 13 réacteurs en 2011, dont huit en Allemagne et quatre au Japon à la suite de l'accident. Il y a eu cependant sept nouveaux réacteurs couplés au réseau contre cinq en 2010, deux en 2009 et aucun en 2008. On prévoit toujours une forte hausse de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans le monde — entre 35 % et 100 % d'ici 2030 —, bien que les projections de l'Agence pour 2030 soient inférieures de 7 à 8 % par rapport aux projections établies en 2010. Les facteurs qui ont contribué à un renouveau d'intérêt pour l'électronucléaire sont toujours les mêmes : augmentation de la demande mondiale d'énergie, craintes que suscite le changement climatique, sécurité énergétique et incertitudes quant aux approvisionnements en combustibles fossiles. L'essentiel de la croissance devrait toujours intervenir dans les pays qui ont déjà des centrales nucléaires en exploitation, plus particulièrement en Asie, en Chine et en Inde restant les principaux foyers d'expansion, tandis que la Fédération de Russie restera aussi un lieu de forte croissance. La baisse de 7 à 8 % dans les prévisions de croissance pour 2030 s'explique par la sortie accélérée du nucléaire en Allemagne, par quelques mises à l'arrêt immédiates et par le réexamen de l'expansion prévue par les pouvoirs publics au Japon, ainsi que par des retards temporaires dans plusieurs autres pays.

2. Les mesures prises par les pays à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi ont été différentes : plusieurs ont annoncé un réexamen de leur programme. L'Allemagne, la Belgique et la Suisse ont pris de nouvelles dispositions pour éliminer totalement le nucléaire, tandis que d'autres renforçaient leurs plans d'expansion. En 2011, de nombreux États Membres ont procédé à des évaluations nationales de la sûreté (souvent appelées « tests de résistance ») et des engagements ont été pris pour achever rapidement les évaluations restantes et mettre en œuvre les mesures correctives nécessaires. Dans les pays qui envisagent de se doter de centrales nucléaires, l'intérêt est resté fort. Bien que quelques-uns aient indiqué qu'ils retarderaient la décision d'entreprendre un programme électronucléaire, d'autres ont poursuivi leurs plans dans ce domaine.

² À partir de 2012, la partie du rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire traitant des sciences et des applications nucléaires sera axée essentiellement sur les domaines thématiques où sont survenus les événements les plus marquants au cours des dernières années. Le nombre des domaines thématiques étant réduit, les tendances et les événements importants sont décrits de manière plus approfondie. Cette approche sera poursuivie pour la version 2013 du rapport.

3. En juin 2011, une conférence ministérielle sur la sûreté nucléaire a été organisée par l'Agence. Elle avait pour objectifs de discuter d'une première évaluation de l'accident de Fukushima, d'examiner les enseignements à en tirer, de faciliter le lancement d'un processus de consolidation de la sûreté nucléaire dans le monde et d'étudier les moyens de renforcer encore les interventions en cas d'accidents et de situations d'urgence nucléaires. Le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, qui définit 12 grandes mesures, a été adopté par la Conférence générale en septembre 2011.

4. Dans l'édition 2011 du Livre rouge de l'AEN de l'OCDE et de l'AIEA, les estimations des ressources classiques répertoriées d'uranium (à moins de 130 \$/kg U) ont légèrement baissé par rapport à l'édition précédente, alors que la production totale d'uranium dans le monde a bien augmenté en raison principalement d'une production accrue au Kazakhstan. Tout au long de 2011, de nouvelles ressources ont été recensées pour de nombreux gisements d'uranium en Afrique, et une production commerciale a été annoncée pour la première fois dans l'exploitation minière par lixiviation *in situ* de Honeymoon, en Australie. Les prix au comptant de l'uranium, qui à la fin de 2010 avaient atteint leur plus haut niveau en plus de deux ans (160 \$/kg U), sont retombés après l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi pour s'établir à la fin de l'année à 135 \$/kg U.

5. La première réserve mondiale d'uranium faiblement enrichi (UFE), contenant 120 tonnes d'UFE, a été constituée en décembre 2010 sous les auspices de l'AIEA au Centre international d'enrichissement d'uranium à Angarsk (Fédération de Russie). Elle a été mise à la disposition des États Membres de l'Agence à compter du 3 février 2011. En outre, en mars 2011, le Conseil des gouverneurs a approuvé une proposition du Royaume-Uni concernant une assurance relative au combustible nucléaire (ACN), coparrainée par les pays membres de l'Union européenne (UE), les États-Unis d'Amérique et la Fédération de Russie. L'ACN vise à garantir l'approvisionnement en services d'enrichissement et en UFE destiné aux centrales nucléaires. Toujours en 2011, le Secrétariat a continué de mettre au point les arrangements administratifs, financiers, juridiques et techniques pour une banque d'UFE coordonnée par l'Agence qui servira de ressource de dernier recours pour la production d'électricité d'origine nucléaire. L'Agence a accepté la proposition du Kazakhstan d'accueillir l'usine métallurgique d'Ulba, et les négociations officielles de l'Accord avec l'État hôte ont commencé en 2012.

6. S'agissant de la gestion des déchets radioactifs, le Conseil de l'UE a adopté le 19 juillet 2011 une directive établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs. Cette directive a avalisé un ensemble de normes harmonisées pour tous les pays membres de l'UE inspirées des normes de sûreté de l'Agence. En Suède, en mars 2011, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a présenté une demande de licence pour la construction d'une installation de stockage définitif du combustible nucléaire usé à Forsmark. Aux États-Unis, la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis a publié, en juillet 2011, un projet de recommandations pour l'élaboration d'une solution à long terme en vue de la gestion du combustible usé de ce pays et de ses déchets nucléaires. Le rapport final est paru en janvier 2012.

7. En 2011, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) ont déclaré l'éradication de la peste bovine dans le monde, à savoir la maladie animale la plus dévastatrice qui fut source de famine et de pauvreté pendant des siècles. Ce n'est que la deuxième maladie à avoir été éradiquée avec succès après la variole en 1980. Les techniques nucléaires et apparentées y ont largement contribué grâce à la mise au point et à l'utilisation de tests de diagnostic comme le dosage immuno-enzymatique (ELISA), élaboré par le Laboratoire de la production et de la santé animales de l'AIEA.

8. La mondialisation du commerce des denrées alimentaires ainsi que les déplacements d'animaux ont provoqué une augmentation sans précédent de maladies nouvelles et réémergentes chez les animaux et les plantes et de leurs ravageurs. En 2011, des progrès ont été faits dans l'utilisation des techniques nucléaires pour lutter contre d'autres maladies animales transfrontières dont la grippe aviaire (par exemple, en retraçant l'origine d'une flambée épidémique à l'aide d'isotopes stables). Les scientifiques envisagent aussi de recourir à l'irradiation pour la production de vaccins antiviraux contre la fièvre aphteuse, la fièvre de la vallée du Rift, la grippe et d'autres agents pathogènes viraux. La stérilisation d'insectes dans le cadre de programmes de lutte contre les insectes ravageurs s'effectue habituellement à l'aide d'irradiateurs au cobalt 60 ou au césium 137 qui produisent des rayonnements ionisants gamma. Toutefois, compte tenu de la complexité croissante de la logistique des expéditions, des scientifiques étudient d'autres possibilités de stériliser les insectes, notamment en faisant appel à des irradiateurs autonomes à rayons X de faible énergie.

9. L'accident de Fukushima a durement touché de vastes étendues de terres agricoles autour du site et a posé de nouveaux défis en matière d'élaboration de contre-mesures agricoles face à la contamination radioactive. Bien que de nombreuses options appliquées avec succès après d'autres accidents (par ex. Kyshtym et Tchernobyl), comme des mesures de remédiation des sols et des mesures agrochimiques, soient en train d'être testées plus avant et soient partiellement mises en œuvre dans la région de Fukushima, les conditions propres à la zone touchée appellent de nouvelles stratégies pour assurer la sécurité sanitaire des aliments et une production agricole durable.

10. Pour ce qui est de la protection de l'environnement, l'accident de Fukushima a montré qu'on peut être amené à analyser très rapidement une quantité considérable d'échantillons de l'environnement pour respecter les limites réglementaires et les critères de qualité. Grâce à des méthodes rapides, le temps nécessaire aux analyses peut être réduit de plusieurs jours ou semaines à plusieurs heures ou jours. La validation et l'application de telles méthodes sont surtout nécessaires pour les radionucléides qui posent des risques radiologiques importants dans tous les milieux environnementaux potentiellement affectés, ainsi que pour les denrées destinées à l'alimentation humaine et animale.

11. L'utilisation de procédures d'échantillonnage et d'analyse bien caractérisées et validées est particulièrement importante dans le cas des évaluations transfrontières de l'impact environnemental. L'Agence coordonne un réseau mondial de laboratoires d'analyse pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement (ALMERA) afin de fournir rapidement des analyses fiables d'échantillons de l'environnement en cas de rejet accidentel ou intentionnel de radioactivité. Le test de compétences ALMERA organisé en 2011 s'est concentré sur les émetteurs alpha, bêta et gamma dans des échantillons de sol et d'eau. En 2012, l'accent sera mis sur la qualité et la comparabilité des analyses d'échantillons d'aérosols. Par comparaison avec les levés aériens et terrestres de spectrométrie gamma *in situ* qui sont plus couramment effectués pour l'échantillonnage de l'environnement, il est manifestement nécessaire de mettre en place une surveillance sous-marine *in situ* grâce à la spectrométrie gamma à haute résolution en phases stationnaire et mobile de l'environnement marin côtier. Cela permettrait de reconstruire les rejets de matières radioactives liquides et de détecter rapidement une contamination de l'eau et des sédiments.

12. Dans le domaine de la santé humaine, il est de plus en plus reconnu qu'une nutrition appropriée pendant les 1 000 premiers jours de vie, de la conception à l'âge de deux ans, peut avoir un impact profond sur la capacité d'un enfant à grandir et à apprendre, et sur le risque qu'il a de contracter ultérieurement des maladies chroniques comme le diabète et des pathologies cardiaques. Des techniques nucléaires, comme les techniques de dilution isotopique stable, offrent des avantages pour le suivi de changements relativement insignifiants dans la composition corporelle et peuvent être utilisées pour évaluer des programmes d'intervention nutritionnelle. Au Chili, le succès de l'utilisation de techniques faisant appel à des isotopes stables pour l'évaluation de programmes nationaux d'intervention a débouché sur l'élaboration, en 2011, d'un programme de promotion du développement moteur et de l'activité physique pour les enfants âgés de six à 24 mois.

13. On constate, entre autres efforts visant à améliorer la qualité de la gestion des données pour la radiothérapie, une tendance croissante à mettre en place des « systèmes d'enregistrement et de vérification » (SEV) comme moyen de gérer les bases de données sur les patients en radiothérapie. Pour promouvoir un traitement sûr et efficace de ces derniers, l'Agence a élaboré en 2011 des lignes directrices pour une bonne gestion de la qualité des SEV, qui ont été approuvées par tous les grands fournisseurs de matériel de radiothérapie. Diverses méthodes d'imagerie diagnostique jouent un rôle sans cesse croissant dans la détection et le traitement du cancer du sein. De récents progrès dans la technologie de l'imagerie couplés à des avancées en technologie informatique ont fondamentalement amélioré les procédures de ciblage des tumeurs et de planification de la radiothérapie. En 2011, par le biais de son Programme d'action en faveur de la cancérothérapie (PACT), l'Agence, en coopération avec des partenaires comme l'Organisation mondiale de la santé, a continué d'aider les États Membres à lutter de manière exhaustive contre le cancer.

14. Dans le domaine des ressources en eau, les techniques isotopiques et les outils associés, ainsi que des innovations en cartographie comme l'utilisation de systèmes d'information géographique et de méthodes géostatistiques, aident les responsables de la gestion de l'eau à mieux délimiter, quantifier et visualiser les aquifères et les nappes d'eaux souterraines. En 2011, l'utilisation d'appareils d'analyse par spectroscopie laser d'isotopes stables de l'eau bon marché et d'emploi facile, est devenue courante dans des groupes de recherche du monde entier. Cela leur a permis d'être plus indépendants dans l'analyse des isotopes stables pour l'évaluation hydrologique, leur faisant ainsi gagner du temps et de l'argent. Par exemple, des études isotopiques menées pour évaluer les ressources en eaux souterraines de la péninsule de Santa Elena en Équateur ont fourni des informations qui ont contribué à accroître l'approvisionnement en eau de nombreux habitants de la région.

15. Les progrès en imagerie nucléaire sont étroitement liés à la production de nouveaux radionucléides dotés de propriétés physiques et chimiques novatrices. En 2011, les radionucléides produits par générateur pour la tomographie à émission de positons (PET) sont devenus de plus en plus accessibles dans des pays comme l'Allemagne, l'Australie, la Chine, les États Unis, la France, l'Inde, le Japon, la République de Corée et le Royaume Uni parce qu'ils peuvent être produits dans des hôpitaux qui ne disposent pas d'un cyclotron. On a aussi constaté pendant l'année qu'un certain nombre de fabricants avaient mis à niveau leurs cyclotrons pour en augmenter l'intensité des faisceaux et les énergies afin de répondre à la demande actuelle de radionucléides utilisés dans des techniques de diagnostic comme la PET, la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT), ainsi que dans des applications thérapeutiques.

16. Pour ce qui est de la technologie des rayonnements, lors de la Réunion internationale sur le radiotraitement organisée en 2011, il a été fait état de la mise au point d'un vaccin très efficace contre le paludisme qui en est à un stade avancé des essais cliniques. Ce vaccin est basé sur des sporozoïtes

qui ont été affaiblis par irradiation gamma. Il bloque le stade érythrocytaire, empêchant la maladie d'évoluer ainsi que sa transmission.

17. En 2011, dans un autre domaine relatif aux biocarburants, le recours à l'hydrolyse thermique combinée à l'irradiation par faisceaux d'électrons de bagasse de canne à sucre a été présenté comme permettant d'accroître les rendements de bioéthanol. Il a été démontré avec succès que l'utilisation de membranes en fibres polymères greffées par irradiation, mises au point par la Direction de la science quantique de l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA), avait permis de retirer sélectivement le césium radioactif de deux sites contaminés à la suite de l'accident de Fukushima. Les radiotraceurs et les jauges nucléoniques sont de plus en plus employés dans l'industrie minière, essentiellement pour la prospection et l'exploitation efficace de ressources naturelles.

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. En 2011, l'énergie nucléaire a continué de jouer un rôle important dans la production mondiale d'électricité. Au 31 décembre 2011, il y avait 435 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, totalisant une capacité de près de 369 GWe³ (voir tableau A-1). Cela représente une diminution de quelque 7 GWe de la capacité totale par rapport à la fin de 2010, qui peut être attribuée en très grande partie à la mise à l'arrêt définitive d'un nombre de réacteurs supérieur au nombre des nouveaux réacteurs couplés au réseau. Ces derniers étaient en l'occurrence : Ling Ao-4 (1 000 MWe), Qinshan-2-4 (610 MWe) et le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) (20 MWe) en Chine ; Kaiga-4 (202 MWe) en Inde ; Bushehr-1 (915 MWe) en République islamique d'Iran ; Chasnupp-2 (300 MWe) au Pakistan ; et Kalinin-4 (950 MWe) en Fédération de Russie.
2. L'accident survenu à la centrale nucléaire Fukushima-Daiichi a eu des retombées sur le nombre total de mises en chantier de nouveaux réacteurs en 2011. L'augmentation régulière observée depuis 2003 qui a culminé en 2010 avec 16 nouveaux chantiers ouverts s'est interrompue en 2011, où il n'y a eu que quatre centrales nucléaires mises en chantier : Chasnupp 3 et 4 au Pakistan et Rajasthan 7 et 8 en Inde.
3. En 2011, 13 réacteurs ont été officiellement déclarés comme étant définitivement mis à l'arrêt. Il s'agit non seulement des quatre réacteurs de la centrale de Fukushima-Daiichi au Japon, mais aussi de Biblis A et B, de Brunsbüttel, d'Isar-I, de Krümmel, de Neckarwestheim-1, de Philippsburg-1 et d'Unterweser en Allemagne. Le réacteur Oldbury A2 au Royaume-Uni a aussi été mis à l'arrêt en raison de son âge. C'est le plus grand nombre de mises à l'arrêt depuis 1990, quand l'accident de Tchernobyl avait eu un effet similaire. À titre de comparaison, il n'y avait eu qu'une seule mise à l'arrêt en 2010 et trois en 2009.
4. Au 31 décembre 2011, 65 réacteurs étaient en construction. Ce nombre, bien qu'inférieur à celui de l'année précédente, reste élevé. En outre, 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). De fait, sur le nombre total de réacteurs en construction, pas moins de 44 sont en Asie, de même que 35 des 45 nouveaux réacteurs ayant été couplés au réseau.
5. Malgré l'accident de Fukushima-Daiichi, la récente tendance à augmenter la puissance et à renouveler ou à proroger les licences de nombreux réacteurs en service s'est poursuivie en 2011 dans de nombreux pays. Au Canada, la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a renouvelé pour cinq ans la licence d'exploitation de Gentille-2 au Québec. En Finlande, la compagnie d'électricité finlandaise Teollisuuden Voima Oyj (TVO) a achevé en 2011 la dernière tranche d'une série de travaux de rénovation au réacteur 2 de la centrale nucléaire d'Olkiluoto, augmentant ainsi sa puissance (860 MW(e)) de 20 MWe. La production totale d'Olkiluoto-2 est maintenant de 880 MWe, soit un tiers de plus que sa production initiale de 660 MWe. En France, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a approuvé la prorogation, pour dix années supplémentaires, de la durée de vie du réacteur Fessenheim-1. Au Mexique, au début de l'année, la puissance installée des deux réacteurs du pays a augmenté de 20 % après l'achèvement d'un projet de modernisation de quatre ans. En Espagne, le Conseil de sûreté nucléaire (CSN) a approuvé une prorogation de dix ans des licences d'exploitation de la centrale de Cofrentes et des deux tranches de la centrale d'Ascó. En outre, la capacité des deux réacteurs de la centrale d'Almaraz a été augmentée de 70 MWe. En Slovaquie, la compagnie d'électricité Slovenské elektrárne (SE) a achevé le programme de modernisation et d'augmentation de

³ Un GWe correspond à un milliard de watts d'énergie électrique.

la capacité des deux tranches de la centrale de Bohunice. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a renouvelé pour 20 années supplémentaires la licence d'exploitation des réacteurs suivants : Vermont Yankee ; Prairie Island 1 et 2 ; Kewaunee ; Palo Verde 1, 2 et 3 ; Salem 1 et 2 et Hope Creek, portant ainsi à 71 le nombre total de renouvellements de licences approuvés dans ce pays depuis 2000. Quinze demandes de renouvellement de licences sont actuellement à l'examen. En outre, la NRC a approuvé cinq demandes d'augmentation de la puissance en 2011 et elle en train d'en examiner 20 de plus actuellement. Enfin, la première sélection d'un site de nouvelle centrale nucléaire après l'accident de Fukushima-Daiichi a été annoncée en octobre 2011 lorsque la municipalité de Pyhäjoki en Finlande a été sélectionnée par Fennovoima pour y accueillir la troisième centrale nucléaire du pays.

6. Les mesures prises par les pays à travers le monde après l'accident de Fukushima-Daiichi ont été différentes. Plusieurs pays ont annoncé un réexamen de leur programme électronucléaire, certains ont pris des dispositions pour éliminer totalement le nucléaire, tandis que d'autres ont réaffirmé leur intention de développer leur programme existant. Bien que l'accident n'ait pas modifié la politique de pays comme la Chine, la Fédération de Russie et l'Inde, qui sont les éléments moteurs de l'expansion de l'électronucléaire dans le monde, il a suscité des questions quant au rôle futur de l'énergie atomique dans certains pays. En Belgique, en octobre 2011, la décision prise en 2003 de mettre à l'arrêt en 2015 les réacteurs nucléaires les plus anciens du pays, qui avait réexaminée en 2009, a été maintenue, et le gouvernement a proposé de doubler la taxe spéciale sur l'électronucléaire qu'acquitte chaque année l'industrie nucléaire. En France, le rôle que jouera l'électronucléaire à l'avenir a fait l'objet de débats intenses. En Allemagne, le gouvernement a approuvé en juin 2011 un ensemble de lois qui aboutira à la fermeture définitive des réacteurs nucléaires allemands selon un processus d'abandon progressif qui devrait s'achever à la fin de 2022. En outre, les plus vieux réacteurs allemands, au nombre de huit, ont été déclarés en août 2011 comme étant mis à l'arrêt définitif. L'Italie, pays qui envisageait de relancer son programme électronucléaire après avoir fermé sa dernière centrale en service en 1990, a décidé, après un référendum organisé en juin 2011, que l'énergie nucléaire ne serait plus une option pour au moins les cinq années suivantes, si ce n'est plus. Au Japon, le Conseil de l'énergie et de l'environnement a annoncé en juillet 2011 son intention de réduire la dépendance du pays vis-à-vis de l'électronucléaire. Ceci a été confirmé dans un Livre blanc publié par le gouvernement japonais en octobre 2011, qui a annoncé que la dépendance du pays vis-à-vis de l'énergie nucléaire serait réduite le plus possible à moyen et à long terme et qu'une nouvelle politique énergétique serait élaborée. À la fin de novembre 2011, la capacité effective de production d'électricité d'origine nucléaire du Japon s'établissait à moins de 20 %. En Suisse, le Sénat a voté en septembre 2011 en faveur d'une motion visant à l'abandon progressif de l'électronucléaire d'ici 2034. Il est prévu d'organiser un référendum public sur la question avant d'entériner la décision⁴.

7. Il n'en reste pas moins qu'en dépit des événements récents, l'électronucléaire reste une option importante non seulement pour les pays ayant déjà un programme électronucléaire, mais aussi pour les pays en développement dont les besoins énergétiques augmentent. Si certains pays ont indiqué qu'ils différeraient leur décision quant au lancement d'un programme électronucléaire, d'autres poursuivent leurs plans d'introduction de l'électronucléaire, en incorporant les enseignements tirés de l'accident de Fukushima-Daiichi à mesure qu'ils sont connus. La République islamique d'Iran a mis en service sa première centrale nucléaire en septembre 2011. Plusieurs pays ont pris en 2011 des mesures concrètes en vue de la construction de leur première centrale. Les Émirats arabes unis et la Turquie font progresser leur programme avec les vendeurs de la République de Corée et de la Fédération de Russie, respectivement. En octobre 2011, le Bélarus a signé un contrat pour la construction de deux réacteurs

⁴ En outre, Taiwan (Chine) a annoncé en novembre 2011 une nouvelle politique d'abandon progressif de l'électronucléaire sans préciser de calendrier particulier.

nucléaires de puissance avec la société russe Atomstroyexport (ASE). En novembre 2011, le Bangladesh a signé un accord intergouvernemental avec la Russie au sujet de la livraison de deux réacteurs de 1 000 MWe ainsi que pour la fourniture de combustible, la reprise du combustible usé, la formation et d'autres services. Toujours en novembre, le Vietnam a signé un accord de prêt avec la Fédération de Russie pour financer sa première centrale nucléaire.

8. En 2011, l'Agence a effectué des missions d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) au Bangladesh et dans les Émirats arabes unis. Le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, qui a été adopté par la Conférence générale en septembre 2011, encourage aussi les primo-accédants à incorporer les enseignements tirés de l'accident de Fukushima-Daiichi dans leurs plans d'infrastructures, et à inviter des services d'examen, comme les missions INIR, avant de mettre en service leur première centrale nucléaire. Tout au long de 2011, l'Agence a continué de mettre à la disposition des États Membres des services d'assistance et d'appui très variés, y compris des guides et des normes, une assistance technique, des services d'examen, des formations, un appui en matière de création de capacités et des réseaux de connaissances, dont un grand nombre font l'objet d'un réexamen pour tenir compte des enseignements tirés de Fukushima. Comme un petit nombre de pays font progresser leurs plans et s'efforcent de devenir des « clients bien informés », l'Agence accroît son assistance, surtout à destination des nouveaux organismes propriétaires/exploitants.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde
(au 31 décembre 2011)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2011		Expérience d'exploitation totale en 2011	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 830			12,9	5,2	54	3
ALLEMAGNE	9	12 068			102,3	17,8	782	9
ARGENTINE	2	935	1	692	5,9	5,0	66	7
ARMÉNIE	1	375			2,4	33,2	37	8
BELGIQUE	7	5 927			45,9	54,0	247	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 245	14,8	3,2	41	3
BULGARIE	2	1 906	2	1 906	15,3	32,6	151	3
CANADA	18	12 604			88,3	15,3	618	2
CHINE	16	11 816	26	26 620	82,6	1,9	125	6
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	21	18 751	5	5 560	147,8	34,6	381	1
ESPAGNE	8	7 567			555,1	19,5	285	6
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	101 465	1	1 165	790,4	19,3	3 707	11
FÉDÉRATION DE RUSSIE	33	23 643	10	8 188	162,0	17,6	1 058	4
FINLANDE	4	2 736	1	1 600	22,3	31,6	131	4
FRANCE	58	63 130	1	1 600	423,5	77,7	1 816	4
HONGRIE	4	1 889			14,7	43,3	106	2
INDE	20	4 391	7	4 824	29,0	3,7	357	3
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			0,1		0	4
JAPON	50	44 215	2	2 650	156,2	18,1	1 546	4
MEXIQUE	2	1 300			9,3	3,6	39	11
PAKISTAN	3	725	2	630	3,8	3,8	52	8
PAYS-BAS	1	482			3,9	3,6	67	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 766			26,7	33,0	122	10
ROUMANIE	2	1 300			10,8	19,0	19	11
ROYAUME-UNI	18	9 953			62,7	17,8	1 495	2
SLOVAQUIE	4	1 816	2	782	14,3	54,0	140	7
SLOVÉNIE	1	688			5,9	41,7	30	3
SUÈDE	10	9 326			58,1	39,6	392	6
SUISSE	5	3 263			25,7	40,9	184	11
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	84,9	47,2	398	6
Total ^{b, c}	435	368 791	65	61 962	2 518,0	12,3% ^d	14 792	3

a. Données tirées du Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA (<http://www.iaea.org/pris>)

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

6 tranches en service (5 018 MWe) et 2 en construction (2 600 MWe) ;

40,37 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 19,02 % 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 Taiwan (Chine) (182 ans et un mois).

d. représente le pourcentage mondial de l'énergie nucléaire fournie en 2011.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

9. Chaque année, l'Agence publie deux projections actualisées, une basse et une haute, de la croissance mondiale de l'électronucléaire. La projection 2011 actualisée tient compte des effets de l'accident de Fukushima-Daiichi. La projection de 2011 actualisée donne pour 2030 une capacité électronucléaire mondiale de 7 à 8 % plus basse que celle qui avait été projetée avant l'accident. Par conséquent, au plan mondial, l'accident devrait ralentir ou retarder la croissance électronucléaire, mais pas l'inverser. Dans la projection basse actualisée, la puissance électronucléaire mondiale installée augmente, de 369 gigawatts (GWe) à la fin de 2011 à 501 GWe en 2030, soit 8 % de moins que ce qui était projeté l'an dernier. Dans la projection haute actualisée, la puissance nucléaire installée en 2030 atteint 746 GWe, soit une baisse de 7 % par rapport à la projection faite l'an dernier. Néanmoins, d'après les prévisions, le parc nucléaire mondial en 2030 devrait s'accroître de 90 réacteurs dans la projection basse et de 350 dans la projection haute, s'ajoutant aux 435 réacteurs en exploitation dans le monde à la fin de 2011. On compte que cette croissance se produira essentiellement dans les pays qui exploitent déjà des centrales nucléaires.

10. Comme les années précédentes, la projection de croissance est la plus forte en Extrême-Orient. De 81 GWe à la fin de 2010, la puissance nucléaire de cette région atteint 180 GWe en 2030 dans la projection basse et 255 GWe dans la projection haute. Toutefois, par rapport aux projections de l'an dernier, ces niveaux ont baissé respectivement de 17 GWe et de 12 GWe.

11. C'est en Europe occidentale que l'écart entre les projections basse et haute est le plus grand. Dans la projection basse, la puissance électronucléaire de la région baisse, passant de 123 GWe à la fin de 2010 à 83 GWe en 2030. Dans la projection haute, l'électronucléaire atteint 141 GWe, mais reste toujours 17 GWe en-dessous du chiffre de croissance projeté l'an dernier. En Amérique du Nord, la projection basse affiche une légère baisse, de 114 GWe à la fin de 2010 à 111 GWe en 2030. Avec 149 GWe, la projection haute affiche une hausse certes, mais qui est inférieure de 17 GWe à la projection de l'an dernier.

12. Les autres régions dotées de programmes électronucléaires importants sont l'Europe orientale (dont la Fédération de Russie), le Moyen-Orient et l'Asie du Sud (dont l'Inde et le Pakistan). Tant dans les projections basse que haute, la croissance de l'électronucléaire dans ces régions n'affiche que de légères baisses par rapport aux projections de l'an dernier. Il en est de même pour l'Afrique, l'Amérique latine et l'Asie du Sud-Est qui ont des programmes plus petits.

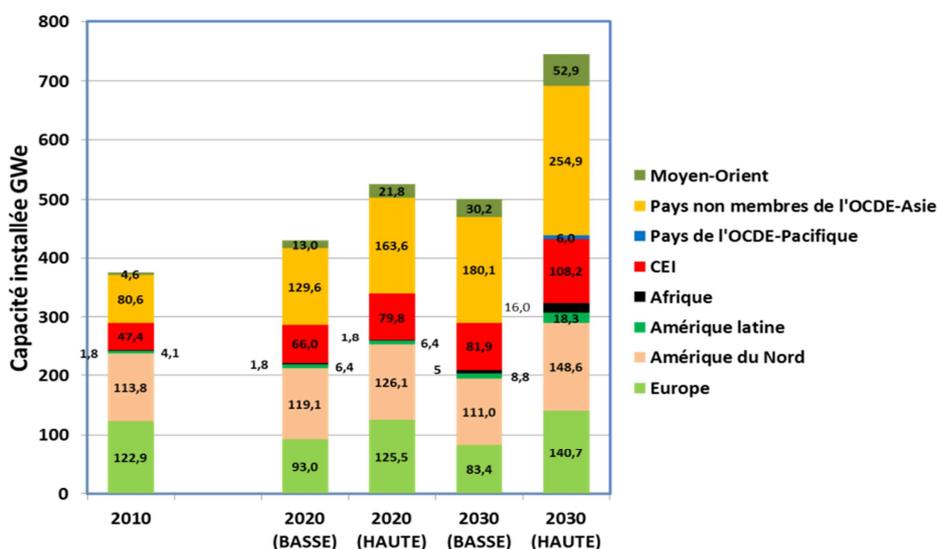


FIG. A-1. Développement des capacités régionales de production d'énergie nucléaire, 2010-2030, projections basse et haute 2011 de l'AIEA.

13. La projection basse de l'Agence suppose que les tendances actuelles se poursuivront avec peu de changements des politiques affectant l'électronucléaire. Mais elle ne suppose pas nécessairement que tous les objectifs nationaux fixés pour l'électronucléaire seront atteints. C'est une projection conservatrice mais plausible. Quant à la projection haute, elle suppose que les crises financière et économique actuelles seront surmontées assez rapidement et que les anciens taux de croissance de l'économie et de la demande d'électricité reviendront, notamment en Extrême-Orient. Elle suppose aussi l'application au niveau mondial de politiques rigoureuses de lutte contre les changements climatiques.

14. À en croire les projections à la fois basse et haute d'une poursuite de la croissance, les facteurs qui ont contribué au regain d'intérêt pour l'énergie d'origine nucléaire avant l'accident de Fukushima n'ont pas changé. Ces facteurs sont, entre autres, la demande énergétique mondiale croissante et les préoccupations liées au changement climatique, aux prix instables des combustibles fossiles et à la sécurité énergétique.

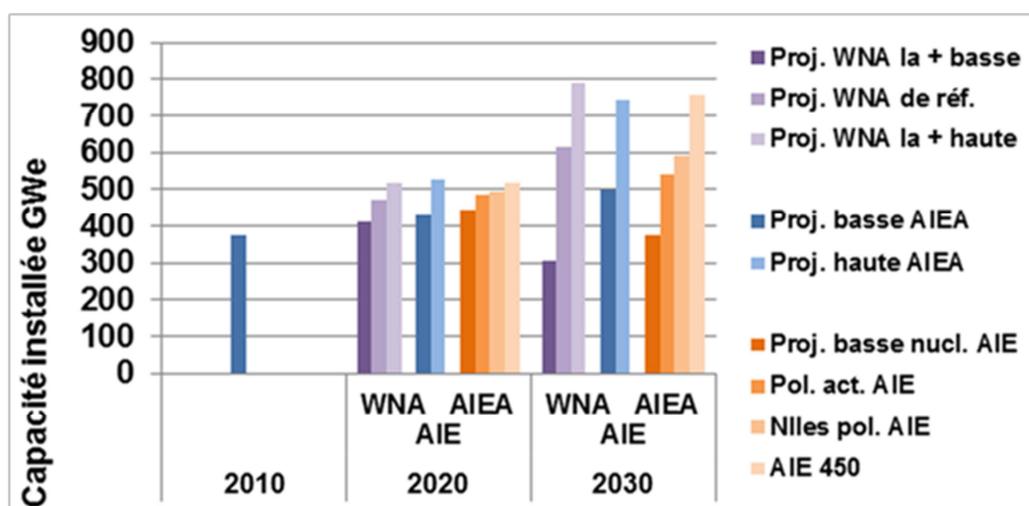


FIG. A-2. Comparaison des projections de l'électronucléaire par l'AIEA (bleu), l'Association nucléaire mondiale (WNA, violet) et l'Agence internationale de l'énergie dans « Perspectives énergétiques mondiales 2011 » (AIE, orange).

15. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE publie aussi des projections de la croissance électronucléaire mondiale. Elle présente dans ses *Perspectives énergétiques mondiales 2011* quatre cas intéressants. Bien que le principal rapport se concentre sur trois scénarios, appelés le « scénario politiques actuelles », le « scénario nouvelles politiques » et le « scénario 450 » (450 faisant référence à la limitation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre à 450 parties par million), l'accident de Fukushima-Daiichi a incité l'AIE à étudier les conséquences d'un désengagement notable vis-à-vis de l'électronucléaire, il s'agit du « scénario projection basse pour le nucléaire ». Selon la projection nucléaire basse, aucun réacteur nouveau ne sera construit dans les États Membres de l'OCDE et, en dehors de l'OCDE, la moitié seulement des nouveaux réacteurs prévus dans le « scénario nouvelles politiques » seront construits. Toujours selon cette projection, la durée de vie opérationnelle des centrales nucléaires existantes sera écourtée. La baisse projetée de l'électronucléaire a entraîné une légère augmentation de la part de l'électricité produite par les sources renouvelables ainsi que des augmentations sensibles projetées dans la consommation de charbon et de gaz naturel, les prix de l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES). Du fait de cette augmentation des émissions, il sera pratiquement impossible de maintenir la hausse de la température moyenne mondiale en-dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, déclenchant ce que la

climatologie considère à présent comme étant une dangereuse interférence anthropique avec le système climatique. La figure A2 compare les projections de l'Agence, les scénarios de l'AIE et les projections de l'Association nucléaire mondiale (WNA)⁵. La projection basse de l'AIEA, le « scénario politiques actuelles » de l'AIE et le scénario de référence de la WNA adoptent tous des hypothèses de statu quo et produisent tous des résultats comparables. Les scénarios de projection haute de la part des organismes sont également comparables, de même que les scénarios de projection basse de l'AIE et la WNA.

A.3. Cycle du combustible⁶

A.3.1. Ressources et production d'uranium

16. Tous les deux ans, l'AIEA et l'AEN de l'OCDE publient le Livre rouge, intitulé *Uranium : Ressources, production et demande*. L'édition la plus récente est parue en juillet 2012. L'édition de 2011 a estimé à 5,3 millions de tonnes (Mt U) la quantité répertoriée des ressources traditionnelles d'uranium dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU. Ce montant représente 1,4% de moins que l'estimation de l'édition précédente. En outre, il évaluait à 1,8 Mt U celles dont les coûts de récupération s'établissent entre 130 \$/kgU et 260 \$/kgU, ce qui porte à 7,1 Mt U le total des ressources traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 260 \$/kgU. Pour référence, le prix au comptant de l'uranium en 2011 a varié entre 165 et 169 \$/kg U jusqu'en mars, soit un prix élevé deux années durant, avant de tomber à 150 \$/kg U après l'accident de Fukushima-Daiichi. Le prix au comptant a baissé progressivement, atteignant 132 \$/kg U en août, mais en fin d'année il était remonté à 135 \$/kg U.

17. Les ressources non découvertes comprennent à la fois les ressources censées se trouver dans des gisements connus ou dans leur proximité et des ressources plus spéculatives qui sont supposées exister dans des zones géologiquement favorables mais encore inexploitées. Le total des ressources non découvertes (ressources pronostiquées et spéculatives) indiqué dans le Livre rouge était supérieur à 10,43 Mt U, soit une légère hausse par rapport aux 10,40 Mt U indiqués dans l'édition précédente (publiée en 2010). Les ressources traditionnelles non découvertes étaient estimées à plus de 6,2 Mt U pour un coût inférieur à 130 \$/kg U, plus 0,46 Mt U supplémentaire pour un coût variant entre 130 \$/kg U et 260 \$/kg U. Selon les estimations, il y aurait eu en outre 3,7 Mt U de ressources spéculatives dont les coûts de production n'avaient pas encore été précisés.

18. Des ressources additionnelles ont été signalées en 2011 dans un grand nombre de gisements d'uranium en Afrique — à savoir au Botswana, en République islamique de Mauritanie, au Malawi, au Mali, en Namibie, en Zambie et en République-Unie de Tanzanie — où d'intenses activités de prospection d'uranium se sont poursuivies. L'étude de faisabilité du projet Mkuju River en République-Unie de Tanzanie a atteint un stade avancé. L'Amérique du Sud a aussi signalé des ressources additionnelles ou nouvelles en Colombie, au Guyana, au Pérou et au Paraguay.

19. Des ressources non traditionnelles d'uranium et le thorium viennent s'ajouter aux autres ressources. Les ressources non traditionnelles comprennent notamment l'uranium potentiellement récupérable associé aux phosphates, aux 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. Elles comprennent aussi l'uranium provenant de l'eau de mer. Actuellement,

⁵ *The Global Nuclear Fuel Market : Supply and Demand 2011-2030*, WNA, London (2011).

⁶ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant le cycle du combustible figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010>) et à l'adresse suivante : www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste.

très peu de pays font état de ressources non traditionnelles. Les dernières estimations d'uranium potentiellement récupérable associé à des phosphates, des minerais non ferreux, de la carbonatite, du schiste noir et de la lignite sont de l'ordre de 8 Mt U. Uranium Equities Limited (UEQ) a annoncé que son installation pilote pour récupérer l'uranium de l'acide phosphorique en utilisant la technique de l'échange d'ions devait démarrer la production en mai 2012. Si la technique est valable, la production commerciale devrait démarrer aux alentours de 2015.

20. Les ressources mondiales de thorium ont été estimées approximativement entre 6 et 7 millions de tonnes. Bien que le thorium soit utilisé comme combustible à titre de démonstration, il reste encore beaucoup à faire avant de pouvoir le considérer au même titre que l'uranium. L'Inde a entrepris en 2011 le processus de sélection de site pour son projet de réacteur expérimental avancé à eau lourde (RAEL) de 300 MWe, alimenté au thorium. Le réacteur devrait devenir opérationnel d'ici à 2020. Toutefois, la mise sur le marché du RAEL n'est pas attendue avant 2030.

21. Les données portant sur les coûts de prospection et d'exploitation minières dans le monde ne sont indiquées dans le Livre rouge que jusqu'en 2010. Ces coûts s'élevaient à 2,076 milliards de dollars en 2008, soit une augmentation de 22 % par rapport aux chiffres de 2008 indiqués dans l'édition précédente du Livre rouge.

22. En 2010, la production d'uranium dans le monde était supérieure à 54 670 t U, en hausse de 6 % par rapport à celle de 2009 (51 526 t U). Selon les estimations, elle devrait augmenter en 2011 pour atteindre 57 230 t U. L'Australie, le Canada et le Kazakhstan représentaient 62 % de la production mondiale en 2010 et, avec les États-Unis, la Fédération de Russie, la Namibie, le Niger et l'Ouzbékistan, ils ont assuré 92 % de la totalité de la production d'uranium. Le Kazakhstan a vu en 2010 sa production d'uranium augmenter de plus de 27 % par rapport à l'année précédente, ce qui fait de ce pays, pour la deuxième année consécutive, de loin le premier producteur mondial d'uranium (il était le cinquième producteur en 2003 et le deuxième en 2008). Qui plus est, sa production totale d'uranium en 2011 est censée avoir augmenté de 12 % par rapport à 2010.

23. En septembre 2011, la production à l'échelle commerciale a été annoncée pour la première fois dans une mine de lixiviation⁷ *in situ* à Honeymoon en Australie. Une fois pleinement opérationnelle, la capacité de la mine devrait atteindre 400 t U/an (275 t U en 2012). De plus, l'Olympic Dam, centre minier en Australie méridionale, a obtenu le feu vert du point de vue environnemental pour son projet d'expansion, qui prévoit un nouveau site à ciel ouvert à côté de la mine souterraine existante. Avec ce projet, la capacité annuelle de la mine, actuellement de 3 800 t U, passera à 19 000 t U. Par ailleurs, l'exploitation à titre d'essai de la mine d'uranium Azelik au Niger a démarré en décembre 2010 et devrait atteindre sa pleine capacité de 700 t U/an en 2012.

⁷ L'exploitation minière traditionnelle consiste à extraire le minerai du sol puis à le traiter pour en récupérer les minéraux recherchés. La lixiviation *in situ* suppose qu'on laisse le minerai en souterrain sur place, qu'on mette en solution au moyen d'un lixiviat les minéraux qu'il contient, puis qu'on pompe cette solution à la surface pour en extraire ces minéraux. Ainsi, la perturbation en surface est limitée et il n'en résulte aucun résidu ni stérile.

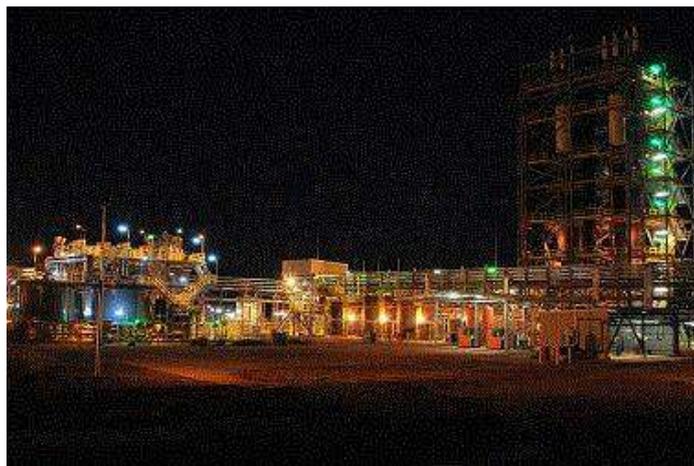


FIG. A-3. Mine d'uranium à Honeymoon (Australie) où la production d'uranium à l'échelle commerciale a commencé en septembre 2011.

24. En 2010, la production d'uranium n'a couvert qu'environ 85 % des besoins estimés des réacteurs dans le monde (63 875 tU). Le reste l'ayant été grâce à cinq sources secondaires : les stocks d'uranium naturel et enrichi, le retraitement de l'uranium à partir de combustible usé, le combustible à mélange d'oxydes (MOX), dont l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium 239 provenant de combustible usé retraité, et le ré-enrichissement de résidus d'uranium appauvri (contenant moins de 0,7 % de ^{235}U). Au rythme de consommation estimé pour 2010, les 5,3 Mt U de ressources d'uranium traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kg U devraient durer environ 80 ans. Cela soutient avantageusement la comparaison avec les réserves d'autres matières premières (cuivre, zinc, pétrole et gaz naturel), dont la durée varie entre 30 et 50 ans.

25. Sur la base des prévisions disponibles en 2010, les besoins annuels mondiaux en uranium pour les réacteurs devraient atteindre, selon les projections, entre 97 645 t U et 136 835 t U d'ici à 2035. Les capacités de production primaire d'uranium projetées actuellement, y compris les centres de production d'uranium existants, commandés, prévus ou potentiels, pourraient répondre à la demande mondiale d'uranium jusqu'en 2028 pour la projection haute, ou jusqu'en 2035 pour la projection basse.

A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible

26. Six pays (Canada, Chine, États-Unis, France, Fédération de Russie 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), tandis que de petites installations de conversion sont en exploitation en Argentine, au Japon et au Pakistan. Un procédé à sec par volatilisation des fluorures est utilisé uniquement aux États-Unis, tandis que toutes les autres installations de conversion utilisent un procédé humide. La capacité mondiale de conversion est restée stable avec environ 75 000 tonnes d'uranium naturel (t U comme UF_6) par an. Toutefois, on s'attend à de grands changements dans ce domaine en France (Comurhex II d'Areva) et aux États-Unis (usine Honeywell Metropolis Works). La demande actuelle pour des services de conversion (pour une teneur de rejets d'enrichissement de 0,25 % en ^{235}U)⁸ est de l'ordre de 59 000 à 65 000 t U/an.

⁸ Le dosage des résidus, ou la concentration de ^{235}U dans la fraction appauvrie, détermine indirectement le volume de travail requis sur une quantité d'uranium donnée afin d'obtenir le dosage d'un produit donné. Une augmentation de la teneur des rejets en rapport avec une quantité déterminée et une teneur déterminée de produit d'uranium enrichi

27. La capacité mondiale d'enrichissement est actuellement d'environ 65 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande totale d'environ 45 millions d'UTS par an. Des usines à l'échelle commerciale sont exploitées en Chine (sous les auspices de la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC)), en Fédération de Russie (Rosatom), en France (AREVA) et aux États-Unis (USEC et URENCO). Le Groupe URENCO exploite des usines de centrifugation en Allemagne, aux États-Unis, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. On trouve aussi de petites installations d'enrichissement en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran.

28. Deux nouvelles installations d'enrichissement par centrifugation, à l'échelle commerciale, toutes deux implantées aux États-Unis, sont à l'étude : AREVA Eagle Rock et l'Installation américaine de centrifugation (ACP). AREVA Eagle Rock a reçu sa licence en octobre 2011.

29. L'Argentine mène à bien des activités de recherche-développement sur de nouvelles techniques d'enrichissement (par centrifugation et par laser) tout en reconstituant sa capacité de diffusion gazeuse à Pilcaniyeu.

30. Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) compte commencer l'exploitation commerciale de cascades de centrifugeuses améliorées dans le village de Rokkasho (préfecture d'Aomori) en 2012 et étendre la capacité actuelle de 150 000 UTS à 1,5 million UTS d'ici à 2020. La construction au Japon d'une nouvelle usine d'enrichissement utilisant la technologie russe de centrifugation est prévue dans le cadre d'un accord entre Rosatom et Toshiba.

31. En juin 2011, 46 pays du Groupe des fournisseurs nucléaires (GFN) se sont mis d'accord sur de nouvelles conditions commerciales internationales relatives à l'enrichissement d'uranium et au retraitement du combustible usé. En vertu des nouvelles directives, les pays qui veulent obtenir la technologie nucléaire doivent satisfaire à un ensemble de prescriptions, notamment : pleine conformité au Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP), aucune plainte de la part des organismes internationaux de réglementation nucléaire pour manquement en matière de garanties, conformité aux accords de garanties de l'AIEA et adhésion aux normes internationales de sûreté.

32. La capacité mondiale de déconversion en 2011 s'est maintenue aux alentours de 60 000 t UF₆/an après que trois installations sont devenues opérationnelles en 2010 — deux aux États-Unis (à Paducah dans le Kentucky et à Portsmouth dans l'Ohio) et une en Fédération de Russie (W-ECP à Krasnoyarsk).

33. Il existe actuellement plusieurs fournisseurs en concurrence pour la plupart des types de combustible. La capacité mondiale de fabrication de combustible s'est maintenue aux alentours de 13 000 t U par an (uranium enrichi dans les éléments combustibles et grappes de combustible) pour le combustible des réacteurs à eau ordinaire (REO) et de 4 000 t U par an (uranium naturel dans les éléments combustibles et grappes de combustible) pour le combustible des réacteurs à eau lourde sous pression (RELP). Pour ce combustible-là, l'uranium est purifié et converti en oxyde d'uranium (UO₂) en Argentine, au Canada, en Chine, en Inde et en Roumanie. La demande annuelle en services de fabrication de combustible pour REO s'est maintenue aux alentours de 7 000 tonnes d'uranium enrichi dans les assemblages combustibles mais devrait atteindre environ 9 500 t U/an en 2020. Quant aux RELP, les besoins se sont chiffrés à 3 000 t U/an. Des installations existantes sont en cours d'expansion en Chine, et de nouvelles installations de fabrication sont prévues au Kazakhstan et

résulte en une baisse du volume d'enrichissement requis mais en une augmentation des besoins en uranium naturel et en conversion, et vice-versa. La teneur de rejet peut varier considérablement et modifiera la demande en services d'enrichissement.

en Ukraine. Celle du Kazakhstan, qui devrait avoir une capacité de 1 200 tU par an, est une co-entreprise AREVA et Kazatomprom ; elle devrait être achevée en 2014.

34. Les opérations de recyclage, en utilisant l'uranium retraité et le combustible MOX, fournissent 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 ligne de production à l'usine d'AREVA à Romans (France) a l'autorisation de recycler en combustible 150 t par an d'uranium retraité, et des assemblages REP de ce type ont déjà été fournis pour des réacteurs en Belgique, en France et au Royaume-Uni.

35. Les capacités actuelles de fabrication de combustible à mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (MOX) avoisinent les 250 tonnes de métaux lourds (tML), 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. Au Japon, JNFL est en train de construire une nouvelle installation de fabrication de combustible MOX (130 tML MOX) à Rokkasho, dont l'achèvement est prévu pour mars 2016. En Fédération de Russie, une installation de fabrication de combustible MOX pour le réacteur à neutrons rapides BN-800 est en cours de construction à Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26). La Fédération de Russie dispose aussi d'installations pilotes à l'Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires (NIAR) à Dimitrovgrad et à la centrale Mayak à Ozersk. Au Royaume-Uni, une nouvelle installation de fabrication de combustible MOX est actuellement en train d'être ajoutée à l'usine MOX de Sellafield (SMP) pour permettre d'honorer de nouveaux contrats de fourniture à long terme de MOX. D'autres usines de fabrication de combustible MOX sont en construction aux États-Unis pour utiliser les surplus de plutonium de qualité militaire. Actuellement, 32 réacteurs thermiques dans le monde utilisent du combustible MOX.

Assurance de l'approvisionnement

36. La première réserve mondiale d'UFE a été créée en décembre 2010 sous les auspices de l'Agence au Centre international d'enrichissement d'uranium à Angarsk (Fédération de Russie). Cette réserve, qui comprend 120 tonnes d'UFE, dont un tiers de matières à un taux d'enrichissement de 4,95 %, a été vérifiée par les inspecteurs des garanties de l'AIEA en décembre 2010. Évaluée actuellement à plus de 300 millions de dollars, elle est à la disposition des États Membres de l'AIEA dont les approvisionnements en UFE sont interrompus pour des raisons autres que techniques ou commerciales. L'UFE sera fourni par l'AIEA à tous les États Membres qui satisfont aux conditions pour produire de l'électricité d'origine nucléaire au prix du marché, et les recettes serviront à réapprovisionner le stock en UFE. La Fédération de Russie couvre le coût de l'entreposage de l'UFE, mais aussi de sa maintenance, de sa sûreté, de sa sécurité et des garanties. L'accord entre le gouvernement de la Fédération de Russie et l'AIEA relatif à la création sur le territoire russe d'une réserve physique d'UFE et à la fourniture de cet UFE à l'AIEA pour ses États Membres a été signé à Vienne le 29 mars 2010 et est entré en vigueur le 3 février 2011. La réserve d'UFE d'Angarsk est à la disposition des États Membres de l'AIEA à compter de cette date.

37. En mars 2011, le Conseil des gouverneurs de l'AIEA a approuvé une proposition du Royaume-Uni concernant une assurance de l'approvisionnement en services d'enrichissement et en uranium faiblement enrichi utilisé dans les centrales nucléaires (ACN), coparrainée par les États Membres de l'Union européenne, les États-Unis d'Amérique et la Fédération de Russie. Il a ainsi été adopté un projet de modèle d'accord d'ACN en vertu duquel un État fournissant de l'UFE ou des services d'enrichissement peut accepter de ne pas interrompre les approvisionnements des États acquéreurs qui respectent les obligations internationales et les prescriptions publiées en matière d'autorisation des exportations. Cette proposition a d'abord été présentée par le Royaume-Uni en 2007, puis élaborée plus avant en 2009.

38. En outre, en décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'UFE de l'AIEA, c'est-à-dire d'un stock physique d'UFE qui sera sous la juridiction et le contrôle de l'Agence. L'objet de cette banque d'UFE est de servir de mécanisme de dernier recours pour soutenir le marché commercial sans le fausser, au cas où l'approvisionnement en UFE d'un État Membre serait interrompu et ne pourrait pas être rétabli par des moyens commerciaux, à condition que cet État remplisse les critères de recevabilité définis par le Conseil. Pendant l'année 2011, le Secrétariat de l'AIEA a poursuivi la mise au point des arrangements administratifs, financiers, juridiques et techniques nécessaires. En mai 2011, l'AIEA a diffusé les critères recevables pour la sélection d'un État hôte ayant un site approprié pour accueillir la banque d'UFE de l'AIEA et a invité les États Membres à soumettre des propositions dans ce sens. Le Kazakhstan a été le seul État Membre à soumettre une proposition dans ce sens et l'Agence a accepté qu'il accueille sa banque d'UFE à l'usine métallurgique d'Ulba. Les négociations officielles de l'accord avec l'État hôte ont démarré en 2012, et des équipes de l'AIEA se sont rendues sur le site d'Ulba la même année pour évaluer en détail les mises à niveau requises sur le plan de la sûreté de la sécurité. Des promesses 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 2011, les versements promis avaient été entièrement honorés par la Norvège (5 millions de dollars), les États-Unis (environ 50 millions de dollars) et la NTI (50 millions de dollars) ; l'UE avait versé 10 millions d'euros sur les 25 promis, et les derniers arrangements étaient menés à bien avec le Koweït (10 millions de dollars) et les Émirats arabes unis (10 millions de dollars).

39. Les droits des États Membres, y compris celui de créer ou de développer leur propre capacité de production dans le domaine du cycle du combustible nucléaire, resteront intacts et ne seront en aucune façon compromis ou réduits par la mise en place de ces mécanismes d'assurance de l'approvisionnement.

40. En août 2011, la banque de combustible AFS, contenant 230 tonnes d'UFE enrichi à 4,95 %, est aussi mise à disposition aux États-Unis.

A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible nucléaire

41. En 2011, quelque 10 500 tML ont été déchargées comme combustible nucléaire de tous les réacteurs de puissance en exploitation. En décembre 2011, la quantité totale cumulée de combustible usé qui a été déchargée dans le monde était d'environ 350 500 tML, dont quelque 240 000 tML ont été entreposées dans des installations sur le site ou hors du site du réacteur. Moins d'un tiers de la quantité cumulée de combustible usé qui a été déchargée dans le monde, soit environ 100 000 tML, a d'ores et déjà été retraité. En 2011, la capacité mondiale de retraitement commercial, répartie dans quatre pays (France, Fédération de Russie, Inde et Royaume-Uni), était d'environ 4 800 tML/an.

42. À la mi-année 2011, la Chine a achevé les essais à froid effectués pour son usine de retraitement pilote de 50 tML ainsi que les essais à chaud à 5 % (solution à 5 % de combustible usé + solution à 95 % simulée). Les travaux de recherche-développement se poursuivent en vue d'assurer un appui technique pour une conduite stable de l'usine de retraitement pilote. La Chine prévoit également de construire une installation de retraitement à l'échelle commerciale et a entamé le processus de choix du site. En outre, la démonstration à la centrale nucléaire de Qinshan de l'emploi direct d'uranium recyclé comme combustible dans un réacteur CANDU a été menée à bien. En 2010 et 2011, 24 grappes de 37 éléments combustibles CANDU contenant de l'équivalent uranium naturel, obtenu en mélangeant de l'uranium retraité et de l'uranium naturel, ont été irradiées dans la tranche 1 de Qinshan et ont montré une bonne performance du combustible.

43. En Inde, la construction à Kalpakkam de l'installation du cycle du combustible du réacteur à neutrons rapides se poursuit. Ce complexe comprend une usine de fabrication et de retraitement du combustible, une usine de sous-assemblages pour le cœur du réacteur, une usine d'oxyde d'uranium retraité et une installation de gestion des déchets, pour le futur prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe.

44. Au Japon, la construction à Rokkasho de l'usine de retraitement commercial de 800 tML/an était pratiquement achevée lorsque les travaux ont dû être suspendus suite au tremblement de terre et au tsunami du 11 mars 2011.

A.3.4. Gestion des déchets radioactifs et déclassé

45. Le stock mondial de déchets radioactifs déclarés comme étant entreposés à la fin de 2010 (dernière année pour laquelle on dispose de données) a atteint quelque 61,4 millions de mètres cubes de déchets de faible ou moyenne activité à courte période (DFMA-CP)⁹, 13,9 millions de mètres cubes de déchets de faible ou moyenne activité à longue période (DFMA-LP) et 423 000 m³ de déchets de haute activité (DHA) (voir le tableau A-2).

Tableau A-2. Estimation mondiale du stock des déchets radioactifs pour 2010 (données les plus récentes)¹⁰

Classe de déchets ¹¹	Entreposage ¹² (m ³)	Stockage définitif cumulé (m ³)
Déchets de faible ou moyenne activité à courte période (DFMA-CP)	61 381 000	24 720 000
Déchets de faible ou moyenne activité à longue période (DFMA-LP)	13 901 000	625 000
Déchets de haute activité (DHA)	423 000	4 000

Source : NEWMDB (2011), et autres références¹³.

⁹ L'apparente augmentation des DFMA-CP entreposés depuis le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011* est due à l'incorporation de nouvelles données sur l'entreposage des déchets liquides de faible activité.

¹⁰ Les chiffres du tableau A-2 sont des estimations et ne devraient pas être interprétés à tort comme un relevé exact des stocks de déchets radioactifs actuellement gérés dans le monde. Outre les écarts possibles habituels dans les estimations des quantités entreposées d'une année sur l'autre en raison des modifications de la masse et du volume des déchets pendant leur processus de gestion, la quantité totale des déchets comptabilisés augmente à mesure que de nouveaux États Membres sont incorporés dans la Base de données Internet sur la gestion des déchets (NEWMDB) de l'Agence et qu'ils communiquent des données manquantes, y compris des données des années précédentes.

¹¹ L'inventaire dans la NEWMDB est actuellement réalisé conformément aux recommandations pour la classification des déchets énoncées dans le guide de sûreté intitulé *Classification of Radioactive Waste* (collection Sécurité de l'AIEA n° 111-G-1.1, Vienne, 1994). Elles ont été remplacées récemment par un nouveau système de classification, qui est présenté dans le guide général de sûreté intitulé *Classification of Radioactive Waste* (collection Normes de sûreté de l'AIEA n° GS-1, Vienne, 2009). Les données de la NEWMDB sont actuellement converties selon le nouveau système de classification.

¹² Les déchets traités et conditionnés passent par diverses étapes de manipulation avant d'être entreposés ou stockés définitivement. La masse et le volume des déchets radioactifs évoluent donc constamment pendant le processus de gestion avant stockage définitif. Ceci peut expliquer les écarts constatés dans les quantités estimées de déchets entreposés d'une année sur l'autre.

¹³ Parmi les sources autres que la NEWMDB figurent les rapports nationaux disponibles au titre de la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, ainsi que d'autres données publiées.

46. Le total cumulé des déchets radioactifs en stockage définitif à la fin de 2010 se décomposait comme suit : approximativement 24,7 millions de mètres cubes de DFMA-CP, 625 000 m³ de DFMA-LP et quelque 4 000 m³ de DHA, provenant essentiellement de Tchernobyl. La faible proportion de DFMA-LP et de DHA en stockage définitif par rapport à ceux qui sont entreposés témoigne de la pénurie générale de capacités de stockage définitif pour ces deux classes de déchets à l'échelle mondiale.

47. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs sont en service ou en gestation dans le monde entier. Les options de stockage définitif sont notamment les suivantes : stockage en tranchées des déchets de très faible activité (DTFA) (Espagne, France, Slovaquie, Suède), des déchets de matières radioactives naturelles (Malaisie, République arabe syrienne) et des déchets de faible activité (DFA) dans des régions arides (Afrique du Sud, États-Unis d'Amérique, République islamique d'Iran) ; ouvrages artificiels à faible profondeur pour les DFA (Belgique, Bulgarie, Espagne, France, Inde, Japon, Lituanie, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie) ; stockage définitif à moyenne profondeur des déchets de faible ou moyenne activité (DFMA) (Hongrie, Japon, Norvège, République de Corée, République tchèque) et des déchets de matières radioactives naturelles (Norvège) ; stockage en puits des DFA (États-Unis d'Amérique) et des sources radioactives scellées retirées du service (Ghana, Malaisie, Philippines), et enfin des installations en formations géologiques profondes destinées aux DFMA (Allemagne, États-Unis d'Amérique), les DHA et/ou le combustible usé (Finlande, France, Suède).

48. La Belgique a l'intention de stocker définitivement des déchets à courte période de faible et moyenne activité dans une installation de stockage en surface dans la municipalité de Dessel. En 2009, l'Organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF) a entrepris un argumentaire de sûreté, notamment une évaluation de l'impact environnemental qui sera achevée en 2012. Il soumettra ensuite une demande de licence de construction et d'exploitation. L'installation devrait entrer en service en 2016.

49. En Bulgarie, une installation d'entreposage du combustible usé a été officiellement ouverte en mai 2011 à la centrale nucléaire de Kozloduy.

50. Au Canada, Ontario Power Generation (OPG) a officiellement soumis, en avril 2011, une déclaration d'impact environnemental (DIE) et la documentation finale pour une licence en vue de la préparation d'un site et de la construction d'un dépôt géologique profond pour les DFMA dans les environs du site nucléaire de Bruce. Une étude de faisabilité est actuellement en cours pour déterminer si le site des laboratoires de Chalk River pourrait accueillir une installation de gestion de déchets radioactifs en formations géologiques, dépôt prévu à une profondeur nominale de 500 m, dans lequel il est proposé d'isoler et de confiner des DFA et des déchets de moyenne activité (DMA) provenant du site des laboratoires.

51. Au Danemark, une étude soumise par le gouvernement en mai 2011 a recensé six emplacements potentiels pour un dépôt destiné à accueillir les DFMA du pays.

52. En France, le projet Cigéo de stockage définitif des déchets hautement radioactifs, provenant essentiellement des centrales nucléaires et du retraitement de leur combustible usé, entrera en 2012 dans sa phase de conception industrielle.

53. À Olkiluoto (Finlande), la société de gestion des déchets nucléaires, Posiva, construit l'installation souterraine de caractérisation des roches d'ONKALO, dont la profondeur de l'espace prévu pour le stockage définitif a été atteinte en 2010. Posiva a l'intention de soumettre fin 2012 au gouvernement finlandais une demande de licence pour la construction du dépôt sur ce site et de commencer le stockage définitif en 2020.

54. Au Ghana, une installation de stockage définitif de déchets radioactifs destinée à accueillir, dans des conditions de sûreté et de sécurité, des sources radioactives qui ne fonctionnent plus ou ne sont plus nécessaires a été inaugurée à la Commission ghanéenne de l'énergie atomique à Accra.

55. En Allemagne, en octobre 2010, les recherches dans la mine de Gorleben, site potentiel pour des DHA/pour le combustible nucléaire usé, ont repris, après un moratoire de dix ans ; ils sont effectués par la Société DBE. Cette société est aussi chargée du réaménagement en cours de la mine de Konrad en un dépôt national de DFMA. Cette installation, à 1 000-1 100 m de profondeur, devrait entrer en service en 2019. Les travaux de remblayage de la partie centrale de l'installation se sont achevés en février 2011. BfS, l'Office fédéral de radioprotection titulaire de la licence pour le dépôt de Morseleben, a présenté une demande d'autorisation de fermeture du dépôt.

56. En Hongrie, la Société publique à responsabilité limitée pour la gestion des déchets radioactifs (PURAM) est sur le point d'achever la construction, à 200 m de profondeur, d'un dépôt à Bataapáti pour les DFMA des centrales nucléaires. Si la partie entreposage de l'installation, en surface, est déjà fonctionnelle, la mise en service de la partie allouée au stockage définitif est prévue pour 2012. Un complexe similaire pour le stockage définitif devrait être achevé à Gyungju (République de Corée) en 2012. La partie entreposage de l'installation est en service depuis décembre 2010.

57. En Lituanie, l'Autorité lituanienne de sûreté nucléaire (VATESI) a délivré une licence à la centrale nucléaire d'Ignalina pour la construction d'installations de récupération et de pré-traitement des déchets radioactifs solides.

58. En Russie, la construction d'une installation d'entreposage de combustible usé à Jeleznogorsk, où est situé le Combinat minier et chimique de Krasnoïarsk, a démarré en 2003. La construction de la première phase de l'installation, avec un RBMK d'une capacité d'entreposage du combustible usé de 8 100 tonnes, a été achevée en décembre 2011.

59. Le 16 mars 2011, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a déposé auprès des autorités nationales une demande de licence pour la construction d'une installation de stockage définitif du combustible nucléaire usé à Forsmark, dans la municipalité d'Östhammar, ainsi que pour une usine d'encapsulation à Oskarshamn. SKB estime que l'installation entrera en service en 2025.

60. Aux États-Unis, une nouvelle installation de stockage définitif de déchets radioactifs a été ouverte en novembre 2011 près d'Andrews County, au Texas. Elle est exploitée par la société Waste Control Specialists ; les tranchées creusées à faible profondeur peuvent accueillir des DFA des classes A, B et C.

61. Toujours aux États-Unis, la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis, créée en janvier 2010, a publié en juillet 2011¹⁴ un projet de recommandations pour l'élaboration d'une solution à long terme en vue de la gestion du combustible nucléaire usé de ce pays et de ses déchets nucléaires. Le rapport final a paru en janvier 2012.

62. Le Conseil de l'Union européenne (UE) a approuvé, le 19 juillet 2011, une directive (2001/70/EURATOM) pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, qui a adopté un ensemble de normes harmonisées pour les États Membres de l'UE, inspirées des normes de l'AIEA sur la gestion et le stockage définitif des déchets. La Directive contient une disposition selon laquelle les États Membres de l'UE doivent établir et mettre à jour des programmes nationaux comprenant notamment les concepts ou plans et solutions techniques pour la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, de leur production à leur stockage définitif.

¹⁴ De plus amples informations sont disponibles sur <http://brc.gov/>.

Les États Membres doivent notifier leur programme national à la Commission européenne (CE) et lui faire rapport sur la mise en œuvre de la Directive au plus tard le 23 août 2015, puis tous les trois ans.

63. La gestion sûre et sécurisée des sources de haute activité continue de poser des problèmes particuliers, car des contraintes importantes, essentiellement financières, empêchent de rapatrier facilement ces sources au terme de leur vie utile. Plusieurs opérations ont été menées avec succès pour conditionner et retirer des sources radioactives scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et les soumettre à un contrôle, soit en les transférant dans une installation nationale d'entreposage de déchets radioactifs, soit, dans certains cas, en leur faisant quitter le territoire national. Singapour n'a plus de source de haute activité retirée du service sur son territoire depuis septembre 2011 lorsque la dernière source scellée de haute activité retirée du service a été enlevée afin d'être recyclée. Il en a été de même à Madagascar où une source de thérapie d'origine française a été réexpédiée en France en octobre 2011.

Déchets radioactifs hérités du passé

64. D'importants travaux sont en cours pour éliminer les séquelles des activités nucléaires pendant la guerre froide. Depuis une quinzaine d'années maintenant, le Groupe de contact d'experts pour les projets internationaux relatifs aux déchets radioactifs dans la Fédération de Russie (CEG) de l'Agence se révèle être un cadre efficace pour l'échange d'informations et la coordination des programmes relatifs à l'héritage nucléaire en Fédération de Russie. Fin 2011, la Fédération de Russie, avec l'aide notable de partenaires du CEG, avait démantelé 196 sous-marins nucléaires déclassés sur 200 après en avoir déchargé le combustible. Les réacteurs des sous-marins déchargés de leur combustible sont en voie d'être scellés puis placés dans une installation d'entreposage à long terme. La priorité du CEG est maintenant l'enlèvement sûr du combustible usé et des déchets des anciennes bases navales. Deux centres régionaux de conditionnement et d'entreposage de déchets radioactifs sont actuellement mis en place. En outre, un programme international de récupération des générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (GTR) qui étaient utilisés pour la navigation (par ex. batteries pour les phares) le long des côtes de la Fédération de Russie se déroule avec succès ; la plupart des 1 007 GTR russes ont été maintenant récupérés. Il n'en reste plus que 119.

65. Des programmes de grande ampleur pour le traitement des déchets hérités du passé sont exécutés par le Canada (Laboratoire nucléaire de Chalk River), la Fédération de Russie (Mayak et le combinat chimique sibérien) et les États-Unis (Laboratoire nucléaire de Savannah River). À Hanford (États-Unis), la construction de la plus grande usine de traitement des déchets au monde est achevée à environ 50 %. L'usine, dont le budget s'établit à 12 milliards de dollars, devrait entrer en service en 2019. Elle traitera et stabilisera quelque 200 000 m³ de déchets complexes divers hérités du passé d'abord en les prétraitant, puis en les vitrifiant.

Déchets radioactifs générés par l'accident de Fukushima-Daiichi

66. Les déchets radioactifs générés par l'accident de Fukushima requièrent non seulement des mesures à court terme, qui ont été prises sur le site de la centrale après l'accident, mais aussi des mesures à long terme pour la gestion du cycle de vie de tous les déchets, sur site et hors site.

67. En réponse à une demande émanant du gouvernement japonais, l'Agence a organisé, du 7 au 15 octobre 2011, une mission d'investigation pour faciliter la remédiation de larges zones contaminées au-delà du site de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi. Cette mission avait pour objectifs de fournir une assistance au Japon pour planifier la remédiation de vastes zones contaminées par l'accident, de passer en revue les stratégies, plans et activités de remédiation de ce pays, y compris la cartographie des zones contaminées, et de communiquer ses conclusions à la communauté internationale dans le cadre des efforts faits conjointement pour largement diffuser les enseignements tirés de l'accident. Son rapport, publié en novembre 2011, a mis en exergue neuf domaines où des

progrès sensibles avaient été accomplis et a fait des recommandations sur douze autres où, selon elle, les pratiques en vigueur pouvaient être améliorées. Il s'agissait notamment d'améliorer la stratégie, les plans et les techniques spécifiques de remédiation, en tenant compte à la fois des normes internationales et de l'expérience que d'autres pays possèdent en matière de programmes de remédiation.

68. La remédiation des terres contaminées au voisinage de Fukushima nécessitera la construction d'installations d'entreposage pouvant accueillir entre 15 et 28 millions de mètres cubes de déchets. Ces installations, qui devront être disponibles dans les trois ans à venir, occuperont une superficie de trois à cinq km². Les options pour le stockage définitif de ces déchets devront être étudiées en temps voulu.

69. L'accumulation de grandes quantités d'eau contaminée par du césium 134 et du césium 137 dans le sous-sol des bâtiments des réacteurs, les bâtiments des turbines et les tranchées a induit une situation grave, dominée par la menace de débordements et de fuites vers l'environnement. Outre les quantités importantes en jeu, un défi majeur à relever pour le traitement de cette eau contaminée est lié à la présence de pétrole et à des concentrations élevées d'ions de sodium provenant de l'eau de mer. Les installations de traitement existantes ont été endommagées et ne peuvent pas être utilisées. La situation a été maîtrisée grâce à la mobilisation rapide d'une aide locale et internationale pour la mise en place de systèmes efficaces de traitement à haut débit qui ont permis de traiter avec succès plus de 150 000 m³ des eaux usées. Plusieurs technologies ont été employées dans une configuration mobile montée sur palette, dont la floculation-précipitation, l'échange d'ions dans les zéolites, l'osmose inverse et l'évaporation. L'eau contaminée et dessalée a été recyclée avec succès pour refroidir le cœur des réacteurs endommagés. On traite également l'eau dans les piscines d'entreposage du combustible usé situées dans les réacteurs en déployant des systèmes mobiles de moindre capacité. Les futurs défis à relever maintenant ont trait à la gestion des boues chimiques hautement radioactives et aux colonnes de zéolites irradiées.

70. Le déchargement du combustible des réacteurs endommagés nécessitera de mettre au point des outils, du matériel de manutention et des solutions spécifiques pour le traitement des déchets transuraniens problématiques. La mise au point d'outils et de méthodes pour gérer ces déchets devrait prendre du temps et nécessitera un niveau élevé de compétences.

Déclassement

71. Les statistiques du déclassement des réacteurs de puissance dans le monde n'ont pas beaucoup varié en 2011. En décembre 2011, 124 réacteurs de puissance étaient mis à l'arrêt. Le démantèlement d'un réacteur a été achevé en 2011, à savoir le réacteur avancé refroidi par gaz (RARG) de Windscale au Royaume-Uni, ce qui porte à 16 le nombre de réacteurs de puissance mis à l'arrêt et complètement démantelés. Cinquante réacteurs de puissance étaient en cours de démantèlement, 49 étaient mis en attente sûre, trois étaient placés sous massif de protection, et pour six autres, les stratégies de déclassement n'avaient pas été encore déterminées.

72. Le démantèlement du RARG de Windscale, centrale nucléaire expérimentale construite dans les années 60, a été achevé en 2011 après 12 ans de travaux difficiles. Le projet a fourni un modèle pour le déclassement des 14 autres RARG du Royaume-Uni à mesure qu'ils parviennent au terme de leur vie utile.

73. La société suédoise Studsvik a signé à la fin de 2011 un contrat avec le dépôt (Repository Ltd) de déchets de faible activité du Royaume-Uni pour le transport de cinq vieux échangeurs de chaleur, pesant chacun plus de 300 tonnes, de la centrale nucléaire Magnox de Berkeley vers la Suède, et leur démantèlement pendant lequel jusqu'à 90 % de leur contenu métallique sera recyclé.

74. Aux États-Unis, le coût du démantèlement et du déclassement des installations nucléaires a été estimé à 69,3 milliards de dollars. Les ressources affectées au déclassement dans ce pays se sont avérées suffisantes. Le transfert de propriété de la centrale nucléaire de Zion entre Exelon Corporation et Energy Solutions en 2010 a démontré que les fonds alloués par voie législative aux futures activités de déclassement sont suffisantes pour les mettre en œuvre.

A.4. Sûreté¹⁵

75. En 2011, les discussions sur la sûreté des centrales nucléaires ont été dominées par la nécessité de recenser et d'appliquer les enseignements qui pouvaient être tirés de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi en raison de catastrophes naturelles extraordinaires, à savoir le tremblement de terre et le tsunami qui ont frappé le Japon le 11 mars 2011.

76. En juin 2011, une conférence ministérielle sur la sûreté nucléaire a été organisée par l'Agence pour discuter d'une première évaluation de l'accident de Fukushima, examiner les enseignements à en tirer, faciliter le lancement d'un processus de consolidation de la sûreté nucléaire dans le monde et étudier les moyens de renforcer encore les interventions en cas d'accidents et de situations d'urgence nucléaires. En 2011, de nombreux États Membres ont procédé à des examens dans le cadre d'évaluations nationales de la sûreté (souvent appelées « tests de résistance »), et des engagements ont été pris pour achever rapidement les évaluations restantes et mettre en œuvre les mesures correctives nécessaires.

77. Le premier enseignement tiré de l'accident a été que les exploitants des centrales nucléaires du monde entier devaient examiner et renforcer, si besoin est : a) les mesures de protection contre les risques extrêmes comme les tsunamis ; b) les capacités d'énergie de secours et de refroidissement en cas d'accident grave ; c) les préparatifs pour gérer les accidents graves ; et d) les bases de conception des centrales, à savoir les hypothèses quant à un ensemble prédéterminé d'accidents à prendre en compte.

78. Bien qu'il y ait encore des leçons à tirer de l'accident, des plans d'action appliquant les premiers enseignements tirés ont déjà été élaborés tant au niveau national qu'international. Le plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire définit un programme de travail pour renforcer le cadre mondial dans ce domaine. Adopté par la Conférence générale en septembre 2011, il définit 12 actions principales¹⁶.

79. Il est possible que d'autres enseignements soient tirés et, selon que de besoin, incorporés dans les mesures proposées en actualisant le plan d'action. En décembre 2011, le gouvernement japonais a annoncé que les réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi étaient « à l'arrêt à froid » et dans un état stable, et que le rejet de matières radioactives était maîtrisé.

80. Sur le plan opérationnel, le niveau de sûreté des centrales nucléaires à travers le monde est resté élevé, comme le montrent les indicateurs de sûreté recueillis par l'AIEA et l'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO). La figure A-4 montre le nombre total d'arrêts d'urgence non planifiés de réacteurs de puissance, qu'ils soient automatiques ou manuels, recensés par l'Agence pour 7 000 heures de criticité dans le Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS)¹⁷. Cet indicateur, qui assure un suivi de la performance en réduisant le nombre de mises à l'arrêt totales

¹⁵ Des informations supplémentaires sur la sûreté nucléaire sont données dans le Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire 2012 ou dans le Rapport annuel de l'AIEA.

¹⁶ 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/English/gc55-14_en.pdf

¹⁷ <http://prisweb.iaea.org>

non planifiées de réacteurs, est couramment utilisé pour donner une idée des progrès faits dans l'amélioration de la sûreté des centrales. Comme le montre la figure A-4, des améliorations constantes, bien que pas aussi marquantes que celles réalisées dans les années 90, ont été apportées ces dernières années. Toutefois, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant des possibilités d'amélioration continue. Des informations plus détaillées sur la sûreté concernant des domaines nucléaires transversaux et des faits marquants intervenus dans ce domaine tout au long de 2011, indépendamment de l'accident de Fukushima-Daiichi, sont données dans le Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire 2012.

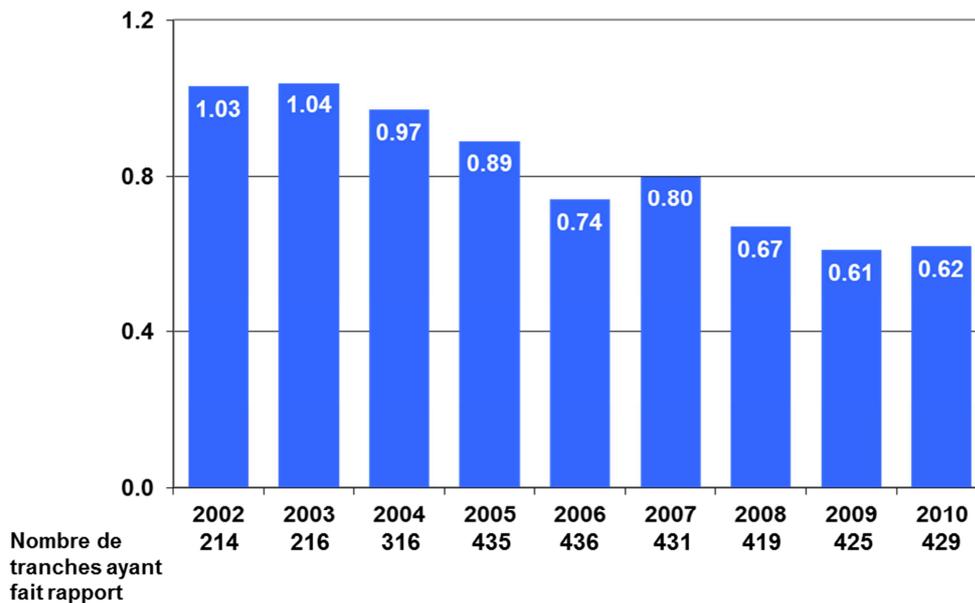


FIG. A-4. Nombre total d'arrêts d'urgence non planifiés de réacteurs de puissance, qu'ils soient automatiques ou manuels, recensés pour 7 000 heures de criticité (Source : AIEA)

B. Fission et fusion avancées

81. L'expérience d'exploitation des réacteurs existants, ainsi que les avancées de la science et du génie nucléaires, guident constamment le développement des nouveaux modèles de réacteurs avancés. La présente partie fait la synthèse des faits nouveaux relevés dans le domaine de la conception de réacteurs, tout d'abord pour les modèles fonctionnant selon le principe de fission nucléaire, puis pour ceux visant la fusion nucléaire.

B.1. Fission avancée

B.1.1. Réacteurs refroidis par eau

82. Au Canada, la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) continue d'examiner l'avant-projet de CANDU-6 amélioré, de 700 MWe, qui comporte plusieurs innovations par rapport au modèle CANDU-9 et tient compte de l'expérience récente acquise avec les tranches CANDU-6 construites en Chine et en République de Corée. Candu Energy poursuit aussi la mise au point du réacteur CANDU avancé (ACR-1000), qui est caractérisé par une normalisation très poussée des composants et fonctionne à l'uranium légèrement enrichi pour compenser l'utilisation d'eau ordinaire comme caloporteur primaire. En janvier 2011, la CCSN a achevé les trois phases de l'examen de

l'avant-projet d'ACR-1000 ; ce réacteur de puissance avancé est ainsi le premier à avoir atteint ce stade d'étude. Le fournisseur Énergie atomique du Canada limitée (EACL) met au point activement un réacteur CANDU refroidi à l'eau supercritique (RESC), ce qui renforcera le rôle pilote joué par le Canada dans le cadre du programme de réacteurs refroidis par eau supercritique du Forum international Génération IV.

83. En Chine, 26 réacteurs à eau sous pression (REP) sont en construction. Il s'agit notamment de réacteurs évolutifs de 650 MWe et 1 080 MWe basés sur la technologie de réacteurs actuellement en service, ainsi que de modèles plus récents comme l'AP-1000 et le réacteur européen à eau sous pression (EPR). Un nouveau modèle de CPR 1000, Ling Ao 4, a été couplé au réseau le 3 mai 2011. La Chine continue de mettre au point les modèles CAP-1400 et CAP-1700, qui sont de nouvelles versions de l'AP-1000 à plus grande échelle. Dans le même temps, elle continue d'investir dans la recherche pour concevoir son propre RBSC.

84. En France, AREVA continue à assurer la commercialisation de l'EPR de 1 600 MWe et de mettre au point le REP ATMEA de 1 100 MWe, avec l'entreprise japonaise Mitsubishi Heavy Industries, ainsi que le réacteur à eau bouillante (REB) KERENA de 1 250 MWe, en partenariat avec la compagnie allemande E.ON.

85. En Inde, cinq réacteurs sont en construction, soit trois réacteurs à eau lourde sous pression (REL) évolutifs de 700 MWe et deux réacteurs de puissance refroidis et modérés par eau (VVER) de 1 000 MWe. La Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL) a conçu un REL évolutif de 700 MWe. Le Centre de recherche atomique Bhabha (BARC) est en train de finaliser la conception d'un réacteur avancé à eau lourde (RAEL) de 300 MWe qui utilisera du thorium avec de l'eau lourde comme modérateur, de l'eau ordinaire bouillante comme caloporteur dans des tubes verticaux sous pression, et des systèmes de sûreté passive.

86. Au Japon, deux réacteurs avancés à eau bouillante (RAEB) sont en construction (Ohma et Shimane-3) et d'autres modèles de RAEB, sont à l'étude. Hitachi poursuit la mise au point des versions de 600, 900 et 1 700 MWe, ainsi que du RAEB-II de 1 700 MWe. Mitsubishi Heavy Industries a conçu pour le marché des États-Unis d'Amérique une version de 1 700 MWe du réacteur avancé à eau sous pression (RAEP), dont le processus de certification par la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis est en cours. Une version européenne du RAEP est aussi en train d'être mise au point et sera évaluée en fonction des exigences des compagnies d'électricité européennes. En outre, le Japon continue de mettre au point un modèle de RESC.

87. En République de Corée, la construction du premier réacteur de puissance avancé, APR-1400, progresse comme prévu. Une version européenne de l'APR-1400, qui sera évaluée en fonction des exigences des compagnies d'électricité européennes, continue d'être mise au point. Le processus de certification de la version de l'APR-1400 pour le marché des États-Unis a été lancé auprès de la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis, l'objectif étant d'obtenir la certification finale en 2015. Parallèlement, la mise au point de l'APR+ de 1 500 MWe et de l'APR-1000 s'est poursuivie en 2011.

88. Aux États-Unis, la NRC a modifié en décembre 2011 l'amendement de certification du modèle Westinghouse AP-1000 en incorporant des mesures de modernisation et d'amélioration de la conception.

89. La construction de huit VVER, dont des modèles VVER-1000 et VVER-1200, s'est poursuivie en Fédération de Russie. Les plans de mise au point du VVER-1200A, ainsi que du VVER 600 et du VVER-1800, basés sur le modèle VVER-1200 actuel, se sont poursuivis. En outre, la Fédération de Russie a continué de travailler sur un modèle innovant de RESC, le VVER-SC, et la construction du KLT-40S, petit réacteur flottant destiné à des applications spécialisées, se poursuit.

B.1.2. Systèmes à neutrons rapides

90. Des réacteurs à neutrons rapides, principalement des surgénérateurs, sont mis au point depuis de nombreuses années dans plusieurs pays. La surgénération au plutonium, avec le retraitement et le recyclage du combustible, permet aux réacteurs à neutrons rapides d'extraire de l'uranium 60 à 70 fois plus d'énergie que les réacteurs thermiques ; cette capacité permettrait d'augmenter considérablement la production d'énergie d'origine nucléaire à long terme. Les réacteurs à neutrons rapides peuvent également contribuer à réduire les stocks de plutonium ainsi que la durée d'isolement requise pour les déchets radioactifs de haute activité en utilisant des radio-isotopes transuraniens et en transmutant certains produits de fission à longue période.

91. En Chine, le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de type piscine de 65 MWth (20 MWe), qui a divergé pour la première fois le 21 juillet 2010, a été couplé au réseau le 21 juillet 2011. Le programme de démarrage physique de ce réacteur est actuellement en cours.

92. Les travaux de construction du prototype indien de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe à Kalpakkam sont bien avancés : les cuves de sécurité et les cuves primaire et interne ont été installées, et le bâtiment du réacteur a été fermé. La mise en service est prévue pour le début de l'année 2013.

93. Le Japon met actuellement au point le réacteur japonais à neutrons rapides refroidi au sodium de 1 500 MWe dans le cadre de son projet de développement de la technologie d'un cycle pour réacteurs à neutrons rapides (FaCT). À la suite de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011, le Japon est en train de réévaluer la poursuite de son programme, et une décision devrait être prise quant à la poursuite du projet une fois qu'un consensus se sera dégagé sur la politique du gouvernement en matière d'énergie nucléaire.

94. La République de Corée conduit actuellement un vaste programme de recherche-développement pour le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de 600 MWe appelé KALIMER.

95. En Fédération de Russie, qui exploite à Beloyarsk le réacteur à neutrons rapides commercial le plus puissant qui existe (BN-600), la construction du réacteur BN-800 progresse. Le chantier devrait s'achever en 2014 et la mise en service devrait avoir lieu la même année. De plus, la Fédération de Russie a lancé en 2010 le programme fédéral cible sur les technologies électronucléaires de nouvelle génération pour 2010-2015 et les tendances futures jusqu'en 2020, qui vise à mettre au point un réacteur avancé à neutrons rapides refroidi au sodium (BN-1200), deux réacteurs rapides innovants refroidis par métaux lourds liquides (le réacteur BREST-OD-300 refroidi au plomb et le réacteur SVBR-100 refroidi par mélange eutectique de plomb et de bismuth), ainsi que leurs cycles du combustible connexes, et un nouveau réacteur de recherche à neutrons rapides à usage multiple refroidi au sodium appelé MBIR.

96. Divers programmes industriels ont été lancés récemment en Europe, en Fédération de Russie, au Japon, en République de Corée, le but étant la mise en service de nouveaux réacteurs à neutrons rapides et prototypes de démonstration à l'horizon 2025–2030.

97. Afin de répondre aux besoins énergétiques européens à long terme, qui incluent la sécurité de l'approvisionnement, la sûreté, la durabilité et la compétitivité économique, l'UE — dans le cadre de son plan stratégique pour les technologies énergétiques (Plan SET) — a défini en novembre 2010 la voie technologique qu'elle suivrait pour ce qui est du développement de réacteurs à neutrons rapides. Le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium est une première piste — sur la base de l'expérience acquise avec ce modèle en Europe ; deux autres filières, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au

plomb (RNRRP) et les réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNRRG), sont à étudier à plus long terme. Le programme de démonstration et de mise en œuvre correspondant — l'Initiative industrielle européenne pour une énergie nucléaire durable (ESNII) — prévoit la construction, en France, du prototype de réacteur refroidi au sodium appelé ASTRID et de deux centrales de démonstration, ALFRED et ALLEGRO, pour les filières RNRRP et RNRRG respectivement. Le programme est également appuyé par la construction en Belgique d'une installation d'irradiation en spectre rapide appelée MYRRHA, qui sert également d'installation pilote pour le prototype à neutrons rapides refroidis au plomb, Alfred. Pour tester le suivi de la sous-criticité, une maquette de MYRRHA à puissance nulle, appelée GUINEVERE, a été construite et est actuellement exploitée dans les laboratoires du Centre belge d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN), à Mol.

B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz

98. En Chine, le plan de mise en service du réacteur de démonstration à haute température refroidi par gaz (RHTRG) a été approuvé par le Conseil des affaires d'État en février 2008. La licence pour ce projet est à l'étude.

99. Au Japon, des essais plus rigoureux – 90 jours au total dont 50 à 950 °C – du réacteur expérimental à haute température (HTTR) ont été achevés. Le gouvernement japonais envisage la faisabilité du couplage de ce réacteur à un système de production d'hydrogène en vue de la production d'hydrogène à petite échelle.

100. La République de Corée continue d'investir dans un certain nombre d'installations d'essais en vue d'essais techniques de systèmes et de composants pour un réacteur à haute température couplé à une installation de production d'hydrogène. Des applications de la chaleur industrielle sont aussi prévues, et un certain nombre d'utilisateurs de cette chaleur collaborent avec la communauté de la recherche nucléaire pour trouver des méthodes optimales de production de chaleur et d'hydrogène grâce à un réacteur à haute température. On s'attend à choisir un modèle de réacteur d'ici à 2015. Le projet de développement et de démonstration de la production nucléaire d'hydrogène (NHDD) bénéficie d'un solide appui de l'industrie et du gouvernement.

101. En Afrique du Sud, les plans visant à passer à la phase de construction du réacteur modulaire à lit de boulets (PBMR) ont été stoppés en 2010 en raison, notamment, des difficultés de financement soulevées par la crise financière mondiale. Le projet reste soumis à un « plan d'entretien et de maintenance » visant à protéger la propriété intellectuelle et les biens concernés jusqu'à ce que le gouvernement décide des prochaines mesures à prendre.

102. Aux États-Unis d'Amérique, les essais expérimentaux de la sûreté du combustible isotrope à triple revêtement (TRISO), mesurée par les défaillances du combustible sur de longues périodes d'irradiation ont continué au réacteur d'essai avancé du Laboratoire national de l'Idaho. L'objectif de ces expériences est de fournir des données sur la performance du combustible sous irradiation pour permettre son développement, de qualifier le combustible pour des conditions de fonctionnement normales, de transitoire, ou d'accident, de contribuer à l'amélioration et à la validation du code de simulation PARFUME sur la performance du combustible et le rejet de produits de fission, et de fournir du combustible irradié TRISO pour l'examen après irradiation et pour des essais de sûreté/échauffement. Les examens après irradiation et les essais d'échauffement se poursuivent sur le combustible TRISO irradié et les spécimens compacts provenant de la première expérience réalisée sur le combustible (AGR-1). La deuxième expérience de ce type (AGR-2) a été réalisée au réacteur d'essai avancé en juin 2010 et est en cours. Les troisième et quatrième expériences (AGR-3/4) ont été regroupées en une série d'essais expérimentaux et comprennent des particules TRISO conçues pour se rompre de manière à fournir des données sur le rejet des produits de fission pour la validation des modèles de simulation, ainsi que des informations sur la performance sous irradiation du combustible

TRISO à des températures très élevées. AGR-3/4 a été insérée dans le réacteur d'essai du Laboratoire national de l'Idaho en décembre 2011 et est soumise à une irradiation de deux ans. Des expériences sur le fluage du graphite sous irradiation se poursuivent dans le réacteur d'essai avancé du Laboratoire national de l'Idaho, ce qui permettra de fournir des informations sur la performance de plusieurs types de graphite nucléaire de qualité commerciale. Le second dispositif pour l'expérience de fluage du graphite, AGC-2, a été inséré dans le réacteur défait en février 2011 et les irradiations se poursuivent. L'examen de la conception pour l'AGC-3 a été mené à bien et la fabrication sera terminée en 2012. Les efforts de financement du projet de centrale nucléaire de la prochaine génération (CNPNG) sont consacrés à la poursuite des campagnes d'irradiation du graphite et du combustible TRISO et à la création d'un partenariat public-privé pour la conception, l'autorisation et la construction d'un réacteur de démonstration CNPG.

B.1.4. Réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP)¹⁸

103. D'après la classification adoptée par l'Agence, les réacteurs de faible puissance sont des réacteurs dont la puissance électrique équivalente est inférieure à 300 MWe et les réacteurs de moyenne puissance ont une puissance électrique équivalente comprise entre 300 MWe et 700 MWe. Les RFMP peuvent être une option électronucléaire intéressante et économique pour de nombreux pays en développement ayant un réseau électrique peu développé, une infrastructure insuffisante et des capacités d'investissement limitées, ou lorsqu'une certaine souplesse est requise pour la production énergétique. Les RFMP sont aussi particulièrement intéressants pour les systèmes dits de cogénération et pour les nombreuses applications avancées de la chaleur industrielle à l'avenir.

104. Aujourd'hui, 13 RFMP sont en construction dans les six pays suivants : Argentine, Chine, Fédération de Russie, Inde, Pakistan et Slovaquie. Des RFMP sont actuellement mis au point pour les principales filières de réacteurs comme les réacteurs à eau ordinaire (REO), les réacteurs à eau lourde (REL), les réacteurs refroidis par gaz (RRG) et les réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide (RRML).

105. En Argentine, la mise en place du réacteur CAREM — modèle de REO sous pression de type intégré de faible puissance, où tous les composants du circuit primaire sont à l'intérieur de la cuve du réacteur et dont la production électrique est de 150 à 300 MWe — a commencé avec les travaux de terrassement du site qui abritera le prototype CAREM de 27 MWe en septembre 2011.

106. Au Brésil, le modèle conceptuel de réacteur à lit fixe de 70 MWe, qui ne nécessite pas de rechargement sur place, a été mis au point.

107. Le Canada a conçu et installé sa série de réacteurs CANDU, aux puissances variées. Le réacteur CANDU-6 amélioré est une nouvelle version, qui conserve les caractéristiques fondamentales du modèle CANDU-6 et a une puissance électrique brute de 740 MWe.

108. La Chine a mis au point des REP de 300 MWe et 600 MWe. Plusieurs tranches ont déjà été installées, et deux tranches CNP-600 sont en construction depuis 2011. Le Pakistan a également installé deux tranches CNP-300, importées de Chine. Par ailleurs, la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) a signé en novembre 2011 un accord avec les autorités municipales de la ville de Zhangzhou afin de construire deux réacteurs modulaires de faible puissance.

¹⁸ Une brochure intitulée *Status of Small and Medium Sized Reactor Designs* a été publiée par l'Agence et peut être téléchargée à l'adresse suivante : <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf>. Elle complète le Système d'information sur les réacteurs avancés (ARIS) de l'Agence, qui peut être consulté à l'adresse suivante : <http://aris.iaea.org>.

109. Ces deux dernières années, la France travaille à la mise au point de Flexblue, une centrale sous-marine de faible puissance (autour de 150 MWe), qui sera installée à même le fond marin puis connectée aux réseaux électriques à terre.

110. En Inde, 21 REL de 220 MWe, 540 MWe et 700 MWe sont en service ou en construction. Le réacteur avancé à eau lourde (RAEL) de 304 MWe, qui utilisera du combustible à mélange d'oxydes (MOX) d'UFE et de thorium et qui intégrera des tubes de force verticaux et des caractéristiques de sûreté passive, en est au stade de la conception de base.

111. Le Japon met actuellement au point le réacteur 4S (« Super-Safe, Small and Simple ») — qui est un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de faible puissance conçu pour produire de 10 à 50 MWe et qui peut être installé sous terre dans une enceinte scellée de forme cylindrique, avec son bâtiment en surface.

112. La République de Corée a développé le modèle de réacteur avancé modulaire intégré (SMART), doté d'une capacité thermique de 330 MWth. Il est destiné au dessalement de l'eau de mer. Un projet d'étude de centrale pilote a été lancé pour une vérification complète de la performance. Le modèle SMART de 100 MWe devrait obtenir l'approbation finale au premier trimestre 2012, avant la construction d'un prototype de centrale.

113. Au Pakistan, trois RFMP sont en service, à savoir Kanupp-1, Chasnupp-1 et Chasnupp-2. Deux réacteurs CNP-300, importés de Chine pour les tranches 3 et 4 de la Chasnupp, sont en construction.

114. En Fédération de Russie, six modèles de RFMP refroidis par eau ordinaire sont en cours de mise au point. Deux tranches de la série KLT-40S sont en construction et seront montées sur barge puis utilisées à des fins de cogénération (production de chaleur industrielle et d'électricité). La Fédération de Russie a aussi mis au point le SVBR 100, qui est un réacteur à neutrons rapides de faible puissance refroidi par un alliage eutectique de plomb et de bismuth ayant une puissance de 100 MWe.

115. En Slovaquie, deux VVER-440, basés sur la technologie russe, sont en construction pour les tranches 3 et 4 à la centrale de Mochovce. Ils devraient entrer en service respectivement en 2012 et 2013.

116. Aux États-Unis, quatre REP de type intégré refroidis par eau ordinaire sont en cours de mise au point : mPower, NuScale, le réacteur modulaire intrinsèquement sûr Holtec (HISMUR) et le RFMP de Westinghouse. Le mPower est un modèle de centrale bimodulaire comprenant deux réacteurs de 185 MWe et offrant la possibilité d'ajouter deux modules supplémentaires en fonction des besoins. NuScale Power envisage la conception d'une centrale nucléaire incorporant jusqu'à 12 modules autonomes de 45 MWe dans la zone de la centrale et fonctionnant dans des conditions de circulation naturelle et dans des conditions accidentelles. Le RFMP de Westinghouse est un modèle conceptuel de 225 MWe qui inclut des systèmes de sûreté passive et applique certaines philosophies de sûreté passive et caractéristiques de conception du grand REO AP-1000. L'HISMUR est un modèle de 145 MWe qui, à l'instar des modules NuScale, n'a pas besoin de pompes pour la circulation du réfrigérant. Les quatre concepts devraient être soumis à la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis pour un examen en vue de leur certification entre 2013 et 2015. Par ailleurs, le projet de réacteur international innovant et sécurisé (IRIS), qui est à présent sous la conduite d'un consortium international, vise à développer un modèle de REP intégré doté d'une puissance électrique de 335 MWe. Le réacteur modulaire de type PRISM, qui est un réacteur surgénérateur à neutrons rapides à métal liquide de 311 MWe, a été mis au point et une demande de certification à soumettre à la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis est à l'étude.

117. Plusieurs modèles de RRG de faible ou moyenne puissance sont actuellement au stade de la mise au point. La Chine a construit le HTR-10, réacteur expérimental à lit de boulets à haute température refroidi par hélium. En complément à ce modèle, le gouvernement chinois a, en mars 2011, approuvé la construction du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM), composé de deux modules de 250 MWth. Aux États-Unis d'Amérique, le réacteur modulaire refroidi par hélium et couplé à une turbine à gaz (GT-MHR), de 150 MWe, est un modèle conceptuel ayant le potentiel de produire de l'hydrogène par électrolyse à haute température ou par séparation thermo-chimique de l'eau. Enfin, le modèle Energy Multiplier Module (EM²) vise à utiliser le combustible nucléaire usé sans retraitement classique.

B.1.5. INPRO et GIF

118. Le projet international de l'AIEA sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO), qui aide les États Membres à mettre au point et à déployer des systèmes d'énergie nucléaire durables, a accueilli trois nouveaux pays en 2011, à savoir l'Égypte, Israël et la Jordanie, ce qui porte à 35 le nombre de participants à ce projet. La publication portant sur la perspective de développement INPRO 2012-2017, élaborée en 2011, énonce comme objectif stratégique d'œuvrer à la viabilité des systèmes d'énergie nucléaire au niveau mondial en modélisant et en analysant des scénarios de transition ; en promouvant les innovations techniques et institutionnelles requises ; et en aidant les États Membres à élaborer des stratégies nationales à long terme pour l'énergie nucléaire¹⁹.

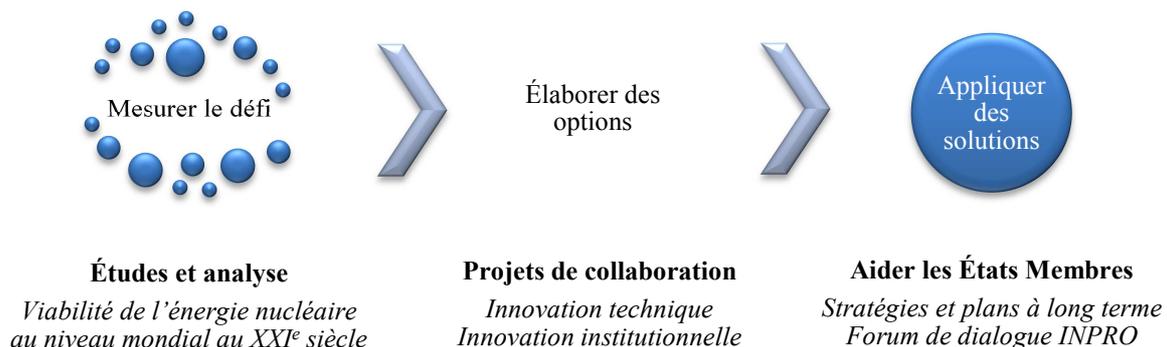


FIG. B-1. Viabilité de l'énergie nucléaire au niveau mondial et contribution de l'INPRO.

119. En 2011, un nouveau projet a été lancé dans le cadre du Forum de dialogue de l'INPRO sur les innovations concernant l'énergie nucléaire pour identifier des « critères communs d'utilisation », en particulier par les utilisateurs de réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP). Toujours en 2011, quatre évaluations des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) étaient en cours au Bélarus, en Indonésie, au Kazakhstan et en Ukraine, et le module de soutien aux NESA mis au point par l'Agence pour appuyer les pays en matière d'auto-évaluation a été étendu pour inclure des données types et le logiciel e-NESA. Le projet de collaboration INPRO sur l'Architecture globale des systèmes nucléaires innovants faisant appel à des réacteurs à neutrons thermiques et rapides comportant des cycles du combustible fermés (GAINS) s'est achevé en 2011. Il a permis d'identifier et de quantifier les avantages du passage à un système d'énergie nucléaire durable au niveau mondial qui s'appuie sur les réacteurs à neutrons rapides et les cycles fermés du combustible. Un projet complémentaire,

¹⁹ Cette publication est disponible à l'adresse suivante :
[http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO_Development_Vision_\(Final\).pdf](http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO_Development_Vision_(Final).pdf)

SYNERGIES (Synergetic Nuclear Energy Regional Group Interactions Evaluated for Sustainability), a été lancé en 2011 en vue de quantifier précisément les avantages d'une collaboration et de synergies entre pays dans ce processus de transition.

120. À travers un système de contrats et d'accords, le Forum international Génération IV (GIF) coordonne les activités de recherche sur six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems* (réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNRRG), réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb (RNRRP), réacteurs à sels fondus (RSF), réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, réacteurs refroidis à l'eau supercritique (RESC) et réacteurs à très haute température (RTHT)). Les six systèmes sélectionnés font appel à diverses technologies dans les domaines des réacteurs, de la conversion de l'énergie et du cycle du combustible. Leur conception comporte un spectre des neutrons thermiques et des neutrons rapides, des cycles du combustible ouverts et fermés et toute une gamme de réacteurs de très faible à très forte puissance. En fonction de leurs niveaux respectifs de développement technique, ces systèmes devraient être disponibles à des fins d'introduction commerciale entre 2020 et 2030 et au-delà. Le GIF compte actuellement 13 membres²⁰.

121. L'Agence et le GIF coopèrent dans les domaines suivants : risque et sûreté ; résistance à la prolifération et protection physique ; modélisation et méthodologies de l'évaluation économique ; et autres questions comme les RFMP, l'utilisation du thorium et les conséquences pour le cycle du combustible. En 2011, la cinquième réunion de coordination GIF/INPRO a permis de réaffirmer la coopération entre le GIF et l'INPRO, en particulier sur les méthodes d'évaluation de la résistance à la prolifération et les aspects relatifs à la sûreté des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.

B.2. Fusion

122. Le Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) est un projet expérimental visant à démontrer la faisabilité scientifique et technique ainsi que les caractéristiques de sûreté de l'énergie de fusion à des fins pacifiques. La Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'Union européenne participent à ce projet de coopération internationale. ITER évolue rapidement, comme en témoignent les travaux de construction intensifs sur le site et le nombre croissant de commandes passées pour les différents dispositifs et éléments de l'installation. En 2011, l'avancement du chantier d'ITER a porté notamment sur l'achèvement du bâtiment de la cellule chaude, le terrassement pour l'atelier de montage, la mise en place du radier en béton de la fosse sismique du complexe tokamak, et la construction de l'installation de bobinage des aimants de champ poloidal. À la fin de l'année 2011, 65 des 126 arrangements relatifs aux achats avaient déjà été signés, ce qui représente un montant total de plus de 3 milliards d'euros et 74 % de la valeur totale des achats pour la construction d'ITER. La construction des éléments importants (comme la chambre à vide) et la production de pièces essentielles (comme les supraconducteurs de champ toroïdal) sont en cours dans les États participant au projet ITER. Cependant, des mesures doivent être prises pour réduire le plus possible les retards de calendrier causés par le séisme et le tsunami survenus au Japon en mars 2011.

123. Outre le projet ITER, des efforts internationaux ont aussi été déployés pour mettre au point une feuille de route pour la production d'électricité par la fusion à confinement magnétique. Les activités menées dans ce cadre étaient axées sur les questions scientifiques et technologiques qui se posent lors de la mise en place d'une centrale de démonstration à fusion ainsi que sur les travaux de recherche-développement nécessaires à cette fin. Un certain nombre de questions importantes du point

²⁰ Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, Euratom, Fédération de Russie, France, Japon, République de Corée, Royaume-Uni et Suisse.

de vue stratégique, auxquelles la communauté internationale doit prêter davantage attention, ont été identifiées :

- Hypothèses admises dans les codes de calcul pour la fusion — les modèles de réacteurs de fusion dépendent largement des hypothèses physiques et technologiques retenues au stade de la conception ;
- Mise au point des matériaux de fusion — les essais d'irradiation sont nécessaires et peuvent servir à déterminer le chemin critique pour la mise au point des matériaux de structure et des matériaux de revêtement de la première paroi pour DEMO ;
- Mise au point des couvertures — l'autonomie en tritium est une condition préalable au développement de la fusion après ITER, et il faudra mettre au point des couvertures tritigènes pour toute future centrale de fusion industrielle, quel que soit son objectif ;
- Solutions pour les effluents du plasma — les conditions à appliquer aux flux de chaleur et de particules dans des dispositifs de fusion à haut coefficient d'utilisation vont bien au-delà de celles du projet ITER ;
- Conditions requises pour différentes options d'installation industrielle – un plan est nécessaire pour combler les lacunes dans les préparatifs et répondre à temps aux besoins de développement des technologies de fusion clés afin de respecter les échéances pour les futures installations.

124. Ces questions ont une importance stratégique car leur traitement aura une forte influence sur la voie générale qui sera suivie. Elles ne font pour l'instant pas consensus chez les spécialistes internationaux de la fusion.

125. La 24^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion se tiendra du 8 au 13 octobre 2012, à San Diego, en Californie (États-Unis d'Amérique).



FIG. B-2. Levage de bobines de correction supraconductrices destinées au projet ITER, Institut de physique des plasmas de Hefei (Chine).

C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

126. Des sources de neutrons alimentées par accélérateur, telles que celles présentes dans les installations de sources de neutrons de spallation, sont utilisées depuis ces dernières décennies, pour compléter les réacteurs de recherche. De nouvelles installations de sources de neutrons de spallation sont en cours de conception et de construction en Chine et en Suède. En Chine, la mise en chantier de la source chinoise de neutrons de spallation (SCNS), qui sera essentiellement composée d'un accélérateur linéaire pour les ions négatifs H⁻ et d'un synchrotron à protons de cycle rapide, a eu lieu le 20 octobre 2011. Les travaux devraient durer sept ans, la mise en service et l'exploitation étant prévues pour 2016 et 2018, respectivement. En Suède, la mise au point de la source de spallation européenne (ESS) est en cours. Située à Lund (Suède) et hébergée conjointement par la Suède et le Danemark, elle sera financée et exploitée par 17 pays européens partenaires. Un examen de la conception technique est en cours. Il servira de document directeur pour la construction, qui devrait démarrer en 2013. L'ESS devrait entrer en service en 2019 et offrir de nouvelles perspectives aux chercheurs dans un large éventail de domaines de recherche s'intéressant à l'analyse de matériaux au niveau tant global que moléculaire. Ces domaines comprennent : la métallurgie ; les sciences des matériaux, notamment des nanomatériaux et des matériaux nouveaux pour la recherche sur l'énergie ; l'archéologie ; le génie environnemental ; la technologie alimentaire ainsi que les sciences chimiques, biochimiques et pharmaceutiques.

127. Le tremblement de terre et le tsunami qui se sont produits au Japon en mars 2011 ont durement touché le Complexe japonais d'accélérateurs de protons pour la recherche. En 2011, les dégâts causés ont été évalués et une fois les réparations terminées, le complexe devrait être remis en service.

128. On construit actuellement, partout dans le monde, de nouvelles installations de rayonnement synchrotron pour répondre à la demande croissante de la communauté scientifique. MAX IV, installation de rayonnement synchrotron de troisième génération, est en cours de construction à Lund (Suède). La mise en service de l'installation achevée est prévue pour 2014. Sa conception prévoit aussi l'installation d'un laser à électrons libres (LEL) lors d'une deuxième étape de développement. Le Laboratoire de lumière synchrotron ALBA en Espagne a, quant à lui, lancé la mise en service du faisceau en 2011 et devrait accueillir ses premiers visiteurs au début de 2012.

129. En ce qui concerne la quatrième génération d'installations basées sur les LEL, à savoir FERMI@Elettra (Italie), XFEL (Allemagne) et SwissFEL (Suisse), des progrès considérables ont été réalisés. Mise en service au printemps 2011, FERMI@Elettra est capable de produire des impulsions extrêmement courtes (durée inférieure à 10⁻¹⁵s) dans une plage de longueurs d'ondes allant de dix à 100 nanomètres (nm). L'introduction des lasers femtosecondes a révolutionné de nombreux domaines scientifiques, de la physique de l'état solide à la biologie. Ce nouvel axe de recherche sur les ultraviolets du vide et les rayons X ultrarapides stimule le développement de toutes nouvelles sources pour la génération d'impulsions femtosecondes.

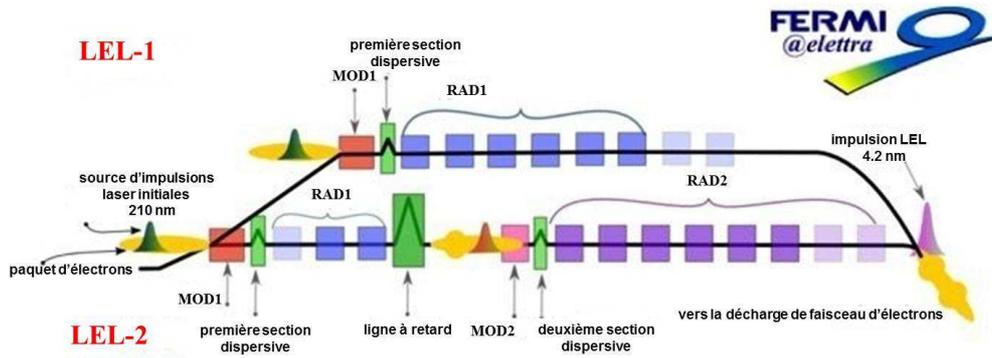


FIG. C-1. Diagramme schématique du laser à électrons libres FERMI et vues intérieures des installations (Photos : FERMI@Elettra).

130. La collaboration internationale joue un rôle déterminant dans le domaine des applications des faisceaux d'ions. On peut citer à titre d'exemple le projet CHARISMA financé par l'Union européenne. Ce projet de recherche, qui réunit les principaux musées (tels que le musée du Prado et le British Museum), laboratoires de recherche (comme Synchrotron Soleil) et groupes de recherche universitaire d'Europe, a pour ambition de mettre en commun des infrastructures de recherche et des technologies avancées pour le patrimoine culturel et de dispenser une formation aux jeunes chercheurs. Plusieurs méthodes, dont des techniques d'analyse classiques et avancées, sont utilisées pour étudier les propriétés générales, microscopiques et de surface d'objets tels que des peintures, des sculptures, des œuvres en métal, des céramiques, des manuscrits et des livres imprimés ou encore des pièces archéologiques.

C.2. Réacteurs de recherche

131. Ces cinq dernières années, un certain nombre d'États Membres ont manifesté davantage d'intérêt pour l'énergie nucléaire ou d'autres techniques nucléaires notamment, les isotopes à usage médical et industriel produits en réacteur et l'application des technologies nucléaires pour faire avancer la science. Les réacteurs de recherche sont donc des composants de plus en plus essentiels dans la conception d'infrastructures nucléaires nationales ou régionales²¹. En outre, étant donné que l'Agence coopère avec les États Membres pour améliorer la durabilité des installations grâce à des associations

²¹ Des informations supplémentaires sont données dans la pièce jointe correspondante au Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012 sur le site web GovAtom/GC.

internationales de mise en commun d'une ou plusieurs installations, on tend à davantage utiliser et rénover les réacteurs de recherche anciens.

132. Fin 2011, on recensait dans le monde 672 installations de réacteurs de recherche, dont 232 étaient en service, 13 temporairement mises à l'arrêt, 211 définitivement mises à l'arrêt, 213 déclassées et trois en construction²². S'agissant des projets, deux étaient en cours et cinq avaient été annulés. Lors de discussions préliminaires tenues avec l'Agence, 14 États Membres (voir ci-après) ont indiqué qu'ils envisageaient la construction ou la planification de nouveaux réacteurs de recherche. Pour nombre d'entre eux, il s'agit de la première étape d'un programme national d'introduction de l'électronucléaire qui accompagne d'autres applications pacifiques des techniques nucléaires. De fait, l'Arabie saoudite, l'Azerbaïdjan, le Soudan et la Tunisie commencent à planifier la construction d'un réacteur de recherche dans le cadre du développement de leur programme électronucléaire national. La construction d'un réacteur de recherche polyvalent de 5 MW a débuté en Jordanie, tandis qu'un projet de réacteur de recherche a été lancé au Vietnam à l'appui du programme électronucléaire national. Des pays ayant des programmes électronucléaires bien établis – 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 commerciales spécifiques.

133. Étant donné que les réacteurs de recherche anciens sont déclassés et remplacés par des réacteurs plus polyvalents mais moins nombreux, le nombre de réacteurs de recherche et d'installations critiques en service devrait diminuer pour se situer entre 100 et 150 d'ici à 2020. Il faudra développer la coopération internationale pour permettre un large accès à ces installations ainsi que leur utilisation efficiente. Les réseaux de coopération internationaux s'avèrent aussi utiles pour moderniser les installations existantes et en établir de nouvelles. Ainsi, outre les six associations de réacteurs de recherche qui existent dans les régions d'Afrique centrale, d'Asie centrale, de la Baltique, des Caraïbes (Amérique latine comprise), d'Europe orientale et de la Méditerranée, des associations et réseaux nouveaux sont envisagés - et nécessaires - pour accroître l'utilisation des réacteurs de recherche ainsi que pour assurer la réelle viabilité des réacteurs de recherche anciens qui ne sont pas encore déclassés. À cet égard, l'Agence aide les États Membres à créer un réseau thématique d'installations de réacteurs de recherche susceptibles de collaborer dans le cadre d'activités d'exploitation et de maintenance communes, notamment en élaborant une méthodologie pour la mise en œuvre du service d'évaluation de l'exploitation et de la maintenance des réacteurs de recherche de l'Agence (OMARR). Les missions OMARR ont pour principaux objectifs de réaliser des examens par des pairs complets de l'exploitation et de la maintenance d'une installation de réacteur de recherche ; de vérifier le respect des procédures en vigueur ; de suggérer des axes d'amélioration ; et de faciliter le transfert mutuel des connaissances et expériences entre les experts de la mission et le personnel du réacteur. Le réseau permettra aussi à ses membres de mettre en commun des informations relatives à la gestion du vieillissement des réacteurs de recherche, de collaborer aux projets de recherche coordonnée pertinents, d'aborder les problèmes communs et d'élaborer des activités conjointes.

134. Les principaux défis et questions liés aux réacteurs de recherche qui se posent actuellement ont été largement discutés à la Conférence internationale sur la gestion sûre et l'utilisation efficace des réacteurs de recherche, qui s'est tenue à Rabat (Maroc) du 14 au 18 novembre 2011. Organisée par l'Agence, cette grande manifestation sur les réacteurs de recherche a lieu tous les quatre ans. Lors de la dernière conférence, on a notamment conclu que les associations de réacteurs de recherche permettaient, grâce aux réacteurs multiples, de proposer des produits et services qu'il ne serait pas possible de proposer avec un seul réacteur et que les États Membres devaient donc recourir à ces

²² Selon la base de données sur les réacteurs de recherche de l'Agence (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/>).

associations dans la mesure du possible. Elle a aussi conclu que les États Membres planifiant un nouveau réacteur de recherche devaient appliquer « l'approche par étapes » de l'Agence et veiller à ce que les plans d'utilisation ainsi que les infrastructures de sûreté et de réglementation appropriés soient en place. Les concepteurs et fournisseurs de réacteurs de recherche proposent désormais un large éventail de réacteurs de recherche et d'installations auxiliaires. Durant la conférence, on leur a conseillé d'adopter une approche « sûreté-criticité » et de faire tout leur possible pour optimiser les paramètres de sûreté et d'efficacité, en particulier les enseignements tirés de l'accident de Fukushima-Daiichi. À cet égard, on a noté sur la base d'une enquête par questionnaire menée par l'Agence que, dans deux tiers des installations de réacteurs de recherche ayant participé à l'enquête, des mesures avaient été prises à la suite de l'accident de Fukushima-Daiichi. On a recommandé aux exploitants de réacteurs de recherche de réexaminer activement leur base de conception et leur analyse de la sûreté pour évaluer les éventuelles modifications et améliorations à apporter – en fonction des caractéristiques du site et des installations – afin que les installations puissent résister à plusieurs événements externes graves.

135. L'Initiative pour la réduction de la menace mondiale, parrainée par les États-Unis, s'est poursuivie en 2011. Elle vise à réduire le plus possible la présence d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur nucléaire civil, notamment en le remplaçant par de l'uranium faiblement enrichi (UFE) dans le combustible des réacteurs de recherche et dans les cibles utilisées pour la production de radio-isotopes. En 2009, la portée de cette initiative a été étendue de 129 à quelque 200 réacteurs de recherche utilisant du combustible à l'UHE et, à la fin de l'année 2011, 76 de ces réacteurs avaient été convertis à l'utilisation de combustible à l'UFE ou mis à l'arrêt. On peut citer l'exemple récent du réacteur de recherche vietnamien qui, le 30 novembre 2011, a divergé avec 72 assemblages combustibles à l'UFE, aboutissement des travaux commencés en 2008 pour convertir le cœur du réacteur et remplacer l'UHE par de l'UFE.

136. Avec le soutien de l'Agence, plusieurs États Membres ont rapatrié du combustible à l'UHE des réacteurs de recherche vers son pays d'origine. En 2010, 2 500 kg de combustible usé ont ainsi été rapatriés avec succès de Vinča (Serbie) en Fédération de Russie. D'importantes activités de rapatriement ont été menées à bien en 2011, dans d'autres États Membres également. Un contrat tripartite a été signé pour que l'Institut de physique et de technologie de Kharkov (Ukraine) rapatrie son dernier stock de combustible neuf à l'UHE (près de 224 kg) en Fédération de Russie avant mars 2012. La Chine a redoublé d'efforts pour remplacer l'UHE par de l'UFE dans ses réacteurs sources de neutrons miniatures (RSNM) et envisage aussi 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. Le gouvernement mexicain a signé des accords en août et en novembre 2011 pour convertir à l'UFE le réacteur de recherche TRIGA et rapatrier le combustible aux États-Unis. La première expédition a eu lieu en décembre 2011 et le rapatriement était terminé dès février 2012.

137. Le remplacement de l'UHE par de l'UFE dans les processus de production d'isotopes à usage médical s'est également poursuivi en 2011, des progrès considérables ayant été accomplis dans ce domaine. Des États Membres ont connu d'importantes pénuries de molybdène 99 (⁹⁹Mo) de la fin de l'année 2007 au troisième trimestre 2010, en raison de l'arrêt récurrent et imprévu de réacteurs anciens utilisés pour l'irradiation de cibles et d'une installation de traitement de cibles d'uranium. En 2011, après la remise en service des réacteurs et des installations de production, d'une part, et l'ouverture à de nouveaux producteurs du marché relativement réduit des fournisseurs, d'autre part, les pénuries se sont atténuées et les producteurs ont repris leurs activités de remplacement de l'UHE par de l'UFE dans les cibles de ⁹⁹Mo. L'Australie a annoncé une augmentation de sa production de ⁹⁹Mo au moyen de cibles à l'UFE et l'Égypte a confirmé en novembre 2011 que les essais d'irradiation et de mise en service pour la production de ⁹⁹Mo au moyen de cibles à l'UFE étaient réussis. L'Afrique du Sud a continué de produire, à des fins commerciales, du ⁹⁹Mo au moyen de cibles à l'UFE, tandis que

deux grands producteurs d'isotopes à usage médical (la Belgique et les Pays-Bas) ont commencé à élaborer et à exécuter des plans de travail pour le remplacement de l'UHE par de l'UFE dans leurs processus de production à l'échelle commerciale. De plus, en 2011, l'Agence a mené à terme un projet de recherche coordonnée de six ans qui a aidé sept États Membres (le Chili, l'Égypte, le Kazakhstan, la Libye, la Malaisie, le Pakistan et la Roumanie) à évaluer la faisabilité d'une production nationale à petite échelle de ^{99}Mo par fission au moyen de cibles à l'UFE ou par des méthodes d'activation neutronique. Enfin, les recherches sur d'autres voies possibles de production de ^{99}Mo basées sur la technologie des accélérateurs se sont intensifiées en 2011 et se poursuivront vraisemblablement ces prochaines années.

138. Les combustibles avancés à très haute densité à base d'uranium et de molybdène qui sont actuellement mis au point sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et à haute performance. Bien qu'on ait enregistré en 2011 des avancées notables dans la mise au point et la qualification du combustible à l'uranium-molybdène, des progrès et des essais supplémentaires, notamment dans le cadre des programmes d'irradiation et d'examen après irradiation, s'avèrent nécessaires pour pouvoir assurer en temps voulu l'approvisionnement commercial en combustibles à l'UFE qualifiés à très haute densité.

D. Alimentation et agriculture

D.1. Production et santé animales

139. Une résolution déclarant l'éradication de la peste bovine dans le monde a été adoptée par la Conférence de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en juin 2011. L'Agence a célébré cette étape importante au cours de la 55^e session ordinaire de la Conférence générale, en septembre 2011. Les techniques nucléaires et connexes ont apporté une importante contribution à l'éradication de la peste bovine avec l'élaboration et la mise en œuvre de tests de diagnostics. En particulier, le dosage immuno-enzymatique (ELISA), un test permettant de détecter les anticorps spécifiques de la peste bovine, ainsi que le virus, a joué un rôle essentiel dans le suivi de la campagne de vaccination et de la situation de la maladie dans les troupeaux, ainsi que dans la surveillance des populations de bovins pour confirmer l'absence de la maladie. Il était basé sur une technique de radiomarquage d'anticorps mise au point précédemment, utilisant le phosphore 32 et le soufre 35 comme marqueurs pour les anticorps secondaires. Les systèmes ELISA actuels utilisent des composants irradiés (sérum et antigènes) pour inactiver les agents potentiellement infectieux et garantir la sûreté des tests sérologiques. Ces techniques sont aussi utiles en ce qui concerne d'autres maladies animales transfrontières.

140. Le traçage classique des chemins de migration des oiseaux sauvages, à l'aide de marqueurs extrinsèques classiques ou de technologies satellitaires (marquage avec des anneaux ou des émetteurs) ne peut donner des informations que pour le nombre limité d'oiseaux sauvages ainsi marqués. En 2011, on a démontré que la technologie de traçage des isotopes stables pouvait fournir des informations sur chaque oiseau capturé ou mort. Cela se révèle extrêmement utile dans les enquêtes épidémiologiques sur la grippe aviaire (retraçage de l'origine d'une épidémie), dans la mesure où la maladie peut être facilement transmise sur de longues distances dans une période de temps relativement courte. L'utilisation de cette technologie pour remonter à l'origine des produits animaux destinés au commerce, indépendamment de la documentation statutaire requise pour leur importation et leur exportation, suscite un intérêt croissant. En particulier, dans le cas des oiseaux, les profils d'isotopes stables des plumes, des griffes et du bec peuvent varier en fonction des mouvements et des modes d'alimentation des sujets, et cela permet de déterminer les chemins de migration. Un « essai de validation » a été établi en 2011, et des activités de recherche ont démarré en 2012 dans le cadre d'un

projet de recherche coordonnée (PRC) pour fusionner les données obtenues du profilage des isotopes stables et celles de la détection de virus dans des échantillons de l'environnement (fèces, réservoirs d'eaux naturelles) et de l'établissement de code-barres génétiques. Cela permettra de déterminer simultanément les chemins de migration, les espèces d'oiseaux concernées et leur statut de porteurs à l'aide de stratégies d'échantillonnage plus souples.

141. Alors que des résultats prometteurs ont été enregistrés avec les vaccins irradiés par rayons gamma pour les pathogènes bactériens (*Brucella abortus*, *Listeria monocytogenes*), à protozoaires (*Trypanosoma anulata*, *Schistosoma japonicum*, *Plasmodium*, *Theileria parva*) et parasitaires (*Dictiocaulus viviparous*, *Dictiocaulus filarial*), la production de vaccins antiviraux irradiés est encore insuffisamment étudiée. Il ressort des résultats présentés par des scientifiques de l'école des sciences moléculaires et biomédicales (*School of Molecular and Biomedical Science*) de l'université d'Adélaïde (Australie), au cours de la réunion d'experts tenue au Siège de l'Agence à Vienne (Autriche) en avril 2011, que les vaccins antigrippaux inactivés par rayons gamma peuvent induire une réponse immunitaire beaucoup plus large que les vaccins classiques (inactivés ou atténués). Cela comprend l'immunité induite aussi bien par les lymphocytes T que par les lymphocytes B, alors que les vaccins classiques n'entraînent qu'une immunité liée aux lymphocytes B. Qui plus est, ces vaccins ont une réactivité croisée entre les différents sous-types de grippe, ce qui élargit le profil de protection. On s'attend à ce que dans un avenir proche de nouvelles recherches sur la possibilité de recourir à l'irradiation pour la production de vaccins antiviraux (contre la fièvre aphteuse, la fièvre de la vallée du Rift, la grippe et d'autres agents pathogènes viraux) permettent de contribuer sensiblement à l'amélioration des stratégies de lutte contre certaines maladies animales.

142. En réaction à l'accident de Fukushima en 2011, l'Agence s'emploie à améliorer le logiciel ayant trait à la collecte, l'analyse, l'interprétation et la prise de décisions en ce qui concerne les échantillons destinés à étudier la contamination des aliments en cas d'urgence nucléaire ou radiologique. Le logiciel a été conçu comme une base de données d'intégrité référentielle utilisant des nombres uniques pour lier divers paramètres dans le processus d'échantillonnage/d'établissement de rapports. De fait, l'idée est que le logiciel pourra produire de nombreux rapports définis par l'utilisateur en temps réel. En outre, des trousseaux d'informations exhaustives ont été élaborés à l'intention des États Membres pour les aider dans la mise en œuvre de mesures de remédiation liées aux produits animaux et aux autres produits agricoles. Une fois achevé, ce logiciel servira de plateforme pour fournir aux États Membres des orientations en vue de l'amélioration de leurs plans nationaux d'urgence et du renforcement des contremesures agricoles à la suite d'un accident nucléaire.

D.2. Gestion des sols et de l'eau

143. On s'attend à ce que la population mondiale atteigne 9 milliards de personnes à l'horizon 2050, soit une augmentation de quelque 2 milliards en 39 ans. Cela se traduit par une hausse de 50 % de la demande d'eau. L'agriculture utilise aujourd'hui 11 % de la surface terrestre mondiale pour la production végétale, et 70 % de l'eau tirée des aquifères, des ruisseaux et des lacs. Sur la base des tendances actuelles de gains d'efficacité et de rendement de l'utilisation de l'eau en agriculture, on projette que cette demande ne pourra être satisfaite sans une augmentation de l'efficacité de cette utilisation et l'amélioration des pratiques pour la protection de la qualité de l'eau dans les paysages agricoles. Les progrès dans le domaine de la technologie nucléaire peuvent aider à relever ces défis.

D.2.1. Estimation des pertes d'eau et de leurs impacts sur la salinité dans les systèmes d'irrigation par submersion à l'aide des isotopes stables

144. Il ressort d'études récentes²³ que les mesures des changements des signatures isotopiques de l'eau (deutérium et oxygène 18) à différents stades au cours de l'irrigation par submersion peuvent servir à estimer les pertes d'eau par évaporation et par transpiration des terres de cultures pour divers types de sols et différentes modalités d'irrigation. Cette approche est basée sur le principe selon lequel, lors de l'évaporation, les molécules d'eau ayant des isotopes plus légers (hydrogène 1 et oxygène 16) quittent plus facilement la surface du liquide que celles ayant des isotopes plus lourds (deutérium et oxygène 18), l'eau restante étant enrichie en isotopes plus lourds. Ces études ont aussi démontré que le suivi des concentrations en deutérium, en oxygène 18 et en chlore de l'eau d'irrigation, de l'eau du sol et de l'eau de surface au cours du temps peut aider à évaluer les impacts de l'évaporation et de la transpiration sur l'évolution de la salinité du sol dans les systèmes d'irrigation par submersion. Les résultats obtenus sur quatre sites d'études en Australie en 2011 indiquent que la transpiration est la principale cause de perte d'eau et donc le facteur le plus important contribuant à l'impact sur la salinité tel que mesuré par l'augmentation de la concentration de sel dans les sols sur une période d'étude de 14 jours pendant l'irrigation par submersion. Les impacts sur la salinité dus à la transpiration (0,4 à 2,6 t de sel/ha) étaient 3 à 50 fois plus importants que ceux dus à l'évaporation (0,01 à 0,3 t de sel/ha) en irrigation et dans l'eau du sol.

D.2.2. Mesure de l'humidité du sol à l'échelle d'une zone à l'aide de neutrons de rayons cosmiques

145. Les informations relatives au taux d'humidité du sol à l'échelle d'une zone sont utiles pour estimer les besoins en eau de différentes cultures et aident donc dans la planification de l'irrigation à grande échelle, les prévisions des rendements des cultures et les études du changement climatique. L'obtention de cette mesure a été un défi dans le passé dans la mesure où la plupart des dispositifs disponibles avaient une faible portée de détection de l'humidité du sol, qui se situe dans un diamètre de 0,05 à 1 m du dispositif. En conséquence, il faut un grand nombre de mesures, ce qui peut être à la fois long et coûteux. Le développement récent de l'approche des neutrons de rayons cosmiques en Australie et aux États-Unis d'Amérique constitue une avancée majeure²⁴. Cette technique met en jeu la mesure des neutrons rapides produits naturellement par les rayons cosmiques et ceux produits par les sols à partir de la collision avec l'eau de la surface ou proche de la surface du sol, ce qui permet de cartographier l'état de l'humidité du sol dans une zone d'environ 700 m de diamètre jusqu'à une profondeur de 70 cm, qui couvre la zone d'enracinement de la plupart des cultures. Ce nouvel instrument peut ainsi compléter les dispositifs de mesure en un point donné, comme l'humidimètre à neutrons, pour donner une mesure fiable du taux d'humidité du sol au niveau de l'ensemble du champ. Qui plus est, l'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques utilisé dans cette technique appelée COSMOS (système d'observation de l'humidité du sol par rayons cosmiques) est robuste, facile à transporter sur le terrain, et intègre les données d'humidité du sol sur une zone 1 000 fois plus grande que celle couverte par l'humidimètre à neutrons. La technique COSMOS demande donc moins de temps et est plus économique pour les mesures d'humidité du sol à l'échelle d'une zone. Elle peut aussi servir à évaluer l'uniformité et l'efficacité de la répartition de l'eau des systèmes d'irrigation à grande échelle.

²³ Van den AKKER, J. et al. : *Salinity Effects from Evaporation and Transpiration under Flood Irrigation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering **137** (2011) :1-1

²⁴ DESILETS, D. et al. *Nature's neutron probe : Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays*. Water Resour. Res., 46 (2010) : W11505, doi :10.1029/2009WR008726.



FIG. D-1. Installation COSMOS sur un pâturage en Australie (photo : M. Chris Smith, Organisation du Commonwealth pour la recherche scientifique et industrielle et (CSIRO), Canberra)

D.2.3. Utilisation possible du plutonium (^{239}Pu et ^{240}Pu) comme radionucléide de retombées pour évaluer l'érosion des sols et la dégradation des terres

146. Il ressort d'études récentes^{25,26} que les isotopes du plutonium émetteurs alpha, plutonium 239 et plutonium 240 (avec des périodes de 24 110 et 6 561 ans respectivement) peuvent servir au traçage des mouvements du sol et des sédiments dans les plans d'eau. Ces isotopes sont similaires au césium 137²⁷ en ceci que ce sont des radionucléides de retombées provenant d'essais d'armes nucléaires et sont normalement présents dans la plupart des sols, ce qui signifie qu'on n'a pas besoin de marquer le sol avec ces isotopes. Toutefois, le principal avantage du plutonium 239 et du plutonium 240 par rapport au césium 137 réside dans leurs plus longues périodes comparées à celle du césium (30 ans), ce qui fait qu'ils sont disponibles à long terme comme traceurs du mouvement du sol et des dépôts. Des études supplémentaires s'avèrent nécessaires pour tester ces isotopes dans différentes conditions agro-écologiques.

D.3. Pratiques et technologies de remédiation agricole pour l'atténuation des impacts de la contamination radiologique

147. C'est après l'accident de Kyshtym en 1957, à l'usine de retraitement du combustible de Mayak, en ex-Union soviétique, que des contremesures agricoles ont été introduites pour la première fois à grande échelle²⁸ contre la contamination radiologique. Ces pratiques ont été adaptées, développées

²⁵ TIMS, S.G. et al. : *Plutonium as a tracer of soil and sediment movement in the Herbert River, Australia*. Nucl Instrum Meth Section B. **268** (2010) 1150-1154.

²⁶ HOO, W.T et al. 2011 : Using fallout plutonium as a probe for erosion assessment. *J. Environ. Radio.* **102** (2011), 937-942.

²⁷ ZUPANC, V and MABIT, L. 2010. Nuclear techniques support to assess erosion and sedimentation processes : preliminary results of the use of ^{137}Cs as soil tracer in Slovenia. *Dela*, **33** (2010) 21-36.

²⁸ Alexakhin, R.M., "Remediation of areas contaminated after radiation accidents and incidents", *Remediation of contaminated environments* (Voigt, G. and Fesenko, S., Eds.), Elsevier, Amsterdam (2009) 177-222, Ch. 4.

encore et mises en œuvre dans les régions touchées par l'accident de Tchernobyl de 1986. De nouvelles mesures de remédiation agricole basées sur l'évaluation des propriétés des sols ont été suggérées pour les sols arables et les pâturages (Fig. D.2). Des contremesures efficaces visant à réduire au minimum la contamination des produits animaux – comme l'application de liants de radionucléides spécifiques en alimentation animale (par exemple le recours à l'hexacyanoferrate d'ammonium ferrique pour réduire l'absorption de radiocésium dans l'intestin des animaux au pâturage), l'addition d'analogues stables tels que le calcium pour bloquer l'absorption de radiostrontium, une alimentation propre et le suivi d'animaux en milieu réel – ont aussi été élaborées et utilisées à grande échelle dans les zones touchées par l'accident.



FIG. D-2. Application d'options de remédiation basées sur les sols sur une prairie de tourbe humide dans la localité de Yelne, région de Rivno (Ukraine) (photo : Institut ukrainien de radiologie agricole, Kyev).

148. Cela a permis de collecter et d'analyser une grande quantité de données sur l'efficacité des contremesures agricoles, ainsi que des informations sur les facteurs secondaires comme les ressources nécessaires et les coûts. En outre, des efforts notables ont été déployés pour déterminer de nombreux autres facteurs dont dépendent les possibilités d'application des diverses options de remédiation. Au nombre de ces facteurs, il convient de citer les différentes conditions environnementales, les propriétés des radionucléides, l'utilisation des terres dans les zones contaminées et les pratiques de remédiation déjà mises en place par les parties prenantes et les paysans locaux. Tous ces facteurs peuvent avoir un impact important sur l'efficacité des contremesures agricoles. Ces constatations et ces enseignements tirés ont récemment fait l'objet d'un examen critique de l'Agence dans le rapport du Forum Tchernobyl²⁹ et dans certains examens de suivi effectués par celle-ci et par certaines organisations internationales³⁰.

²⁹ http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf

³⁰ Fesenko, S.V., Alexakhin, R.M., Balonov, M.I., Bogdevich, I.M., Howard, B.J., Kashparov, V.A., Sanzharova, N.I., Panov, A.V., Voigt, G., Zhuchenko, Y.M., An extended review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident, *Sci. Total. Environ.* **383** (2007) 1-24.

149. L'accident survenu à Fukushima (Japon) en 2011, qui a eu des incidences majeures sur une vaste zone de terres agricoles, s'est accompagné de nouveaux défis. Bien que de nombreuses options appliquées avec succès après les accidents de Kyshtym et de Tchernobyl (comme des mesures de remédiation des sols et des mesures agrochimiques) soient en train d'être testées et partiellement mises en œuvre dans la région de Fukushima, les conditions propres à la zone touchée appellent de nouvelles stratégies pour assurer la sécurité sanitaire des aliments et une production agricole durable. En particulier, de nouvelles techniques ont été suggérées pour la remédiation des rizières inondées.

150. Il est bien connu que l'enlèvement traditionnel de la couche supérieure du sol se traduit par la perte de grandes quantités de terre. L'utilisation d'un durcisseur de sol a été testée au Japon comme moyen d'enlever plus facilement les couches les plus superficielles de l'horizon supérieur du sol (fig. D.3). L'avantage de cette technique est qu'elle permet d'éliminer plus rapidement et plus efficacement la radioactivité (plus de 80 %) des sols contaminés. La remédiation ne prend que jusqu'à dix jours par hectare (y compris le temps nécessaire pour que l'horizon supérieur du sol se durcisse après application de la solution de durcisseur).



FIG. D-3. Essais d'enlèvement de la partie supérieure du sol après application d'un durcisseur (avec l'aimable autorisation du Ministère de l'agriculture, des forêts et des pêches / de l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) / de l'Organisation nationale de recherche sur l'agriculture et l'alimentation (NARO) (Japon)).

151. Une deuxième technique nouvelle en train d'être testée au Japon est spécifiquement conçue pour les terres inondées (c'est-à-dire les rizières). On réduit les niveaux de radioactivité dans le sol en asséchant la couche mince de la partie supérieure du sol inondé, en drainant la terre en suspension (fraction d'argile et de limon léger), en séparant les sédiments de l'eau, et finalement en se débarrassant uniquement des sédiments (fig. D.4).



FIG. D-4. Drainage de la terre en suspension dans des rizières au Japon comme option de remédiation (avec l'aimable autorisation de l'Organisation nationale de recherche sur l'agriculture et l'alimentation du Ministère de l'agriculture, des forêts et des pêches).

152. Il ressort d'observations effectuées en 2011 sur un site d'essais de la préfecture de Fukushima que l'efficacité de cette technique pour réduire la concentration en radiocésium du sol et le débit de dose externe varie de 15 % à 70 % en fonction des propriétés du sol, c'est-à-dire des taux d'argile et d'humus. Il convient de noter que cette technique produit jusqu'à 30 fois moins de déchets que celles basées sur l'enlèvement traditionnel de 4 cm de la couche supérieure du sol. Cette méthode permet donc de réduire au minimum la dégradation de la fertilité du sol.

D.4. Solutions de substitution de l'irradiation gamma pour la technique de l'insecte stérile³¹

153. La stérilisation d'insectes dans le cadre de programmes de lutte contre les insectes ravageurs s'effectue habituellement à l'aide d'irradiateurs au cobalt 60 ou au césium 137 qui produisent des rayonnements ionisants gamma. Toutefois, compte tenu de la complexité croissante des problèmes et des difficultés logistiques liés à l'expédition transfrontières des radio-isotopes, des efforts ont commencé pour étudier d'autres options de stérilisation des insectes pour utilisation dans les programmes de gestion des insectes ravageurs. Les irradiateurs autonomes à rayons X de faible énergie, qui sont utilisés dans des établissements médicaux pour l'irradiation du sang, n'émettent des rayons X que si le courant électrique est en marche, et l'énergie est de l'ordre de quelques centaines de keV, ce qui nécessite beaucoup moins de protection qu'avec les irradiateurs gamma.

154. Des essais de stérilisation ont été effectués pour comparer les effets du cobalt 60 ou des rayons X sur les insectes. Les informations relatives à la fertilité résiduelle, ainsi qu'à l'émergence et à la compétitivité pour l'accouplement des adultes entre les mâles traités avec des rayons gamma et ceux traités avec des rayons X en compétition pour des femelles fertiles en cages sur le terrain n'ont jusque-là pas révélé de différences significatives. Des appareils intégrant toutes les modifications déterminées au cours de la phase de validation ont déjà été fournis à plusieurs États Membres de l'Agence. Toutefois, plusieurs années seront nécessaires pour collecter suffisamment de données et confirmer s'il s'agit réellement d'une solution de substitution viable pour stériliser les insectes dans les conditions habituelles d'exploitation à grande échelle.

³¹ Des informations supplémentaires disponibles dans l'appendice approprié du *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* sur le site web GovAtom/GC.

E. Santé humaine

E.1. Nutrition

E.1.1. La qualité de la croissance pendant les 1 000 premiers jours de vie influe ultérieurement sur la santé

155. Il est de plus en plus reconnu qu'une nutrition appropriée pendant les 1 000 premiers jours de vie, de la conception à l'âge de deux ans, peut avoir un impact profond sur la capacité d'un enfant à grandir et à apprendre et sur le risque qu'il a de contracter ultérieurement des maladies chroniques comme le diabète et des pathologies cardiaques³². Les normes actuelles de croissance de l'enfant reposent essentiellement sur le poids et la longueur ou la taille (OMS, Genève, 2006³³ et 2011³⁴). Les professionnels de la santé peuvent surveiller la croissance de l'enfant à l'aide de graphiques indiquant la croissance normale en termes de poids et de longueur ou de taille pour l'âge. Si ces mesures anthropométriques sont essentielles, des mesures de la « qualité de la croissance » doivent aussi être prises en compte dans la définition de ce qui constitue une croissance saine. Une croissance saine est associée au développement des tissus maigres, tandis qu'un excès de masse grasseuse implique un risque plus élevé de contracter des maladies non transmissibles à l'âge adulte. Toutefois, il n'existe actuellement aucune norme de composition corporelle des enfants.

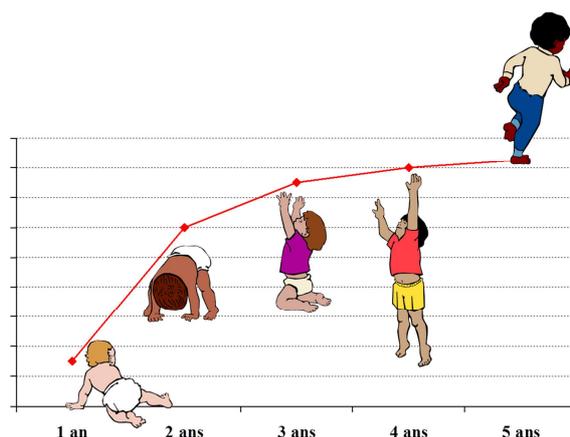


FIG. E-1. Image des Normes OMS de croissance de l'enfant montrant la croissance d'un enfant au cours des cinq premières années de vie. Ces normes reposent sur les données (taille, poids, âge) rassemblées pour environ 8 500 nourrissons allaités au sein et jeunes enfants en bonne santé ayant des origines ethniques et des environnements culturels très divers (Brésil, États-Unis d'Amérique, Ghana, Inde, Norvège et Oman). (Copyright OMS, 2006).

156. Dans de nombreux pays en transition, on a observé chez les enfants une amélioration du poids, qui ne s'est toutefois pas accompagnée d'une amélioration proportionnelle de la taille. Par conséquent, lorsqu'on mesure la taille d'enfants de poids normal, on considère de plus en plus souvent que ces

³² Voir le site web 1,000 Days : <http://www.thousanddays.org/>.

³³ Groupe sur l'étude multicentrique de l'OMS sur la référence de croissance. Normes OMS de croissance de l'enfant : Longueur/taille pour l'âge, poids pour l'âge, poids pour la longueur, poids pour la taille et indice de Quételet pour l'âge : Méthodes et élaboration. Genève : Organisation mondiale de la Santé (OMS), 2006. Voir : <http://www.who.int/childgrowth/standards/fr/>.

³⁴ Logiciel Anthro de l'OMS (version 3.2.2, janvier 2011) : Logiciel d'évaluation de la croissance et du développement des enfants dans le monde. Voir : <http://www.who.int/childgrowth/software/en/>.

derniers sont de petite taille et en léger surpoids. Cette situation suscite des inquiétudes en ce qui concerne la « qualité de la croissance ». Des nourrissons ayant un poids ou une taille semblable peuvent avoir une composition corporelle très différente. Par exemple, les nourrissons indiens sont à la naissance petits et minces par rapport aux nouveau-nés européens mais présentent davantage de masse grasseuse et un risque plus élevé de contracter des maladies non transmissibles à l'âge adulte³⁵. De toute évidence, même si les mesures de la taille et du poids fournissent des informations utiles, il est nécessaire d'évaluer les éléments qui contribuent à déterminer le poids corporel, en particulier les proportions relatives de masse maigre et de masse grasse.

157. Les techniques nucléaires, comme les techniques de dilution isotopique stable, offrent des avantages en termes de sensibilité et de spécificité pour la surveillance de changements relativement infimes dans la composition corporelle et peuvent notamment être utilisées pour évaluer des programmes d'intervention nutritionnelle conçus pour lutter contre le double problème des affections liées à la nutrition, où une malnutrition aiguë coexiste avec l'obésité, et des maladies chroniques associées³⁶.

158. Au Chili, les techniques des isotopes stables sont utilisées pour évaluer les programmes nationaux d'intervention visant à réduire la prévalence de l'obésité chez les enfants d'âge préscolaire. La prévalence de l'obésité chez les enfants (de 2 à 3 ans) fréquentant des garderies nationales a diminué, passant de 10,4 % à 8,4 %. La nécessité d'une intervention plus précoce ayant été reconnue, un nouveau programme faisant appel aux techniques des isotopes stables a été créée en 2011 en vue de valider un programme de promotion du développement moteur et de l'activité physique chez les enfants de six à 24 mois.

159. L'Agence, en étroite collaboration avec des experts internationaux, a élaboré en 2011 des lignes directrices destinées à normaliser les techniques utilisées pour évaluer la composition corporelle des nourrissons et des jeunes enfants³⁷. Ces lignes directrices constituent un premier pas décisif vers l'introduction de normes permettant d'évaluer la croissance et la nutrition des nourrissons et des jeunes enfants à l'aide des techniques nucléaires ou autres méthodes d'évaluation de la composition corporelle.

E.2. Progrès de la médecine radiologique pour le traitement du cancer

E.2.1. La radiothérapie moderne exige une gestion des données sur la qualité

160. Ces dix dernières années, les techniques de radio-oncologie sont devenues de plus en plus complexes et informatisées. Un certain nombre de dispositifs et d'accessoires insérés manuellement dans les faisceaux de rayonnements pour modifier leur fluence (intensité) et ainsi optimiser le traitement, existent désormais aussi sous forme numérique. Par exemple, la forme du faisceau de rayonnements est aujourd'hui souvent définie par des collimateurs multilames, qui non seulement façonnent le champ mais peuvent aussi se déplacer à l'intérieur de celui-ci lors du traitement.

³⁵ YAJNIK, C.S. et al., Neonatal anthropometry : the thin-fat Indian baby. The Pune Maternal Nutrition Study, *Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord.* 27 2 (2003) 173–180. ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, Appropriate body-mass index for Asian populations and its implications for policy and intervention strategies, *Lancet* 363 (2004) 157–163.

³⁶ CORVALAN, C. et al., Impact of growth patterns and early diet on obesity and cardiovascular risk factors in young children from developing countries, *Proc. Nutr. Soc.* 68 3(2009) 327–337.
UAUY, R., KAIN, J. and CORVALAN, C., How can the Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) hypothesis contribute to improving health in developing countries?, *Am. J. Clin. Nutr.* 94 6 (2011) 1759S–1764S.

³⁷ Agence internationale de l'énergie atomique, Évaluation de la composition corporelle, de la naissance à l'âge de deux ans (sous presse).

Le traitement de chaque patient en radiothérapie est déterminé par un certain nombre de paramètres. Du fait de cette complexité, il n'est plus possible de programmer et d'administrer manuellement les traitements. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des dossiers médicaux électroniques. Ces derniers contiennent non seulement les informations d'ordre administratif, les prescriptions thérapeutiques et les relevés de doses de rayonnements concernant un patient, mais aussi le détail de tous les paramètres qui définissent chacun des champs de rayonnements. Des mesures de sécurité hiérarchiques, avec protection par mot de passe, sont nécessaires pour préserver l'intégrité des dossiers et l'exactitude des informations qu'ils contiennent, et ainsi garantir que le traitement peut être reproduit chaque jour pendant la durée de la radiothérapie, laquelle est généralement de quelques semaines.

161. Les « systèmes d'enregistrement et de vérification » (SEV) sont des systèmes de gestion de base de données sur les patients en radiothérapie qui sont utilisés dans la plupart des services modernes de radiothérapie numérique. Ils relient tous les équipements d'imagerie, de planification de traitement et d'administration de traitement utilisés en radiothérapie (voir Fig. E.2.). Le matériel de radiothérapie est souvent fourni par différents vendeurs ; il est donc nécessaire de respecter des protocoles de communication numérique communs pour garantir l'intégrité du transfert de données sur toutes les interfaces. En règle générale, l'ensemble du matériel de radiothérapie est soumis à des procédures rigoureuses de contrôle de la qualité garantissant le bon fonctionnement de toutes les modalités. Il n'existe cependant pas de lignes directrices internationales sur les essais de réception et le processus systématique d'assurance de la qualité des SEV. Pour promouvoir un traitement sûr et efficace des patients, l'Agence a élaboré en 2011 des lignes directrices pour une bonne gestion de la qualité des SEV, qui ont été approuvées par tous les grands fournisseurs de matériel de radiothérapie.

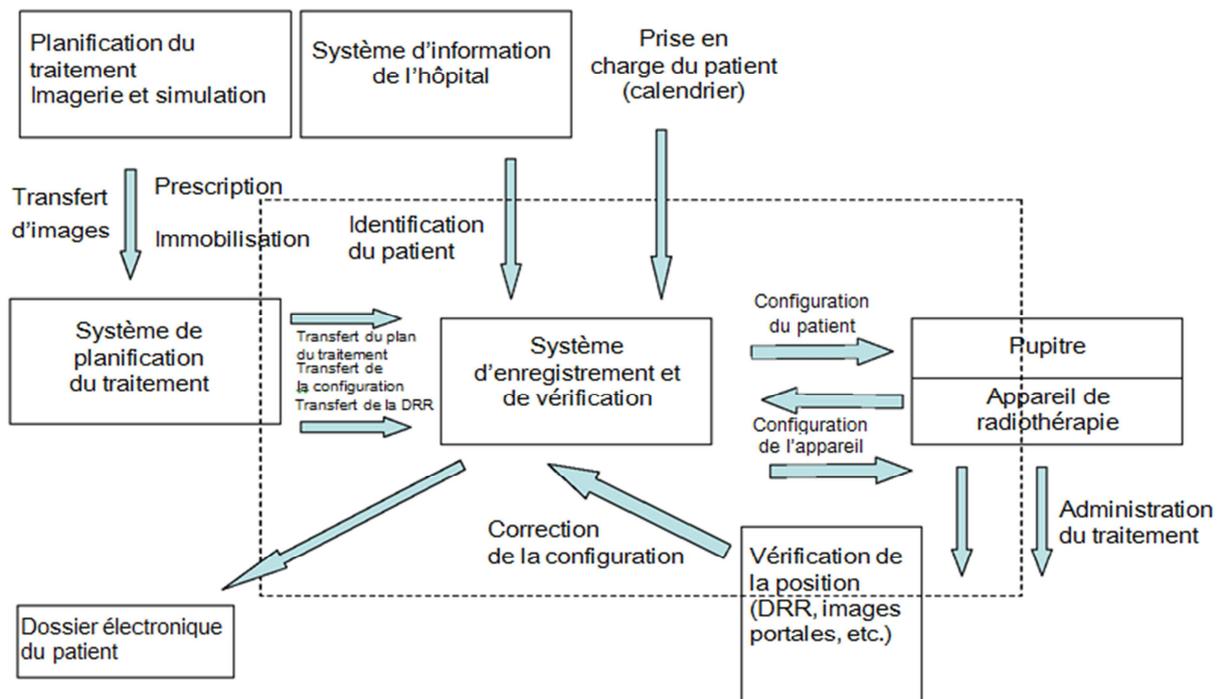


FIG. E-2. Illustration d'échanges de données caractéristiques entre un SEV et d'autres équipements dans un service moderne de radiothérapie. Les solutions peuvent varier en fonction des fabricants, qui proposent un degré d'intégration des divers composants plus ou moins élevé.

E.2.2. Tendances actuelles du traitement du cancer par radiothérapie

162. Cibler précisément les tumeurs en épargnant le plus possible les tissus normaux a été l'objectif premier de la pratique radiothérapeutique. Ces 20 dernières années, la capacité de réaliser cet objectif a fait des progrès sensibles, grâce à des avancées dans la technologie de l'imagerie, et plus particulièrement le développement de la tomographie informatisée (CT), de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), de la tomographie à émission de positons (PET) et la fusion d'images PET/CT³⁸.

163. Le perfectionnement de la technologie de l'imagerie couplé à des avancées en technologie informatique a fondamentalement modifié les procédures de ciblage des tumeurs et de planification de la radiothérapie. La capacité d'afficher des données anatomiques dans une sélection infinie d'images a débouché sur l'émergence de la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RTC-3D), modalité dans laquelle le volume traité cadre exactement avec le volume tumoral.

164. La **radiothérapie par modulation d'intensité (IMRT)** attribue des intensités différentes à des faisceaux extrêmement fins appelés « segments ». La capacité à moduler de manière optimale l'intensité de chaque rayon dans chaque faisceau permet de beaucoup mieux contrôler la fluence globale des rayonnements (à savoir le nombre total de photons/particules pénétrant un volume donné par unité de temps). Ceci permet par ricochet d'individualiser la distribution optimale des doses. L'amélioration de cette dernière permet souvent d'affiner le contrôle tumoral et de réduire la toxicité dans les tissus normaux³⁹.

165. La **radiothérapie guidée par l'image (IGRT)** peut être définie comme une technologie visant à augmenter la précision de la radiothérapie par l'imagerie fréquente de la cible et/ou des tissus sains juste avant le traitement et par l'adaptation de ce dernier à partir de ces images. Plusieurs options existent dans ce domaine : examens CT non intégrés, imagerie par rayons X (kv) intégrée, marqueurs implantés actifs, ultrasons, tomographie à coupe unique, tomographie traditionnelle ou tomographie à faisceau conique intégrée⁴⁰.

166. La **tomothérapie hélicoïdale** est une modalité de radiothérapie qui permet d'administrer des rayons coupe par coupe (d'où le préfixe d'origine grecque qui signifie « morceau coupé »). Elle se distingue donc des autres formes de radiothérapie externe dans lesquelles l'ensemble du volume tumoral est irradié en une seule fois⁴¹. Son principal avantage est le temps d'irradiation globale relativement court.

167. L'**arthérapie volumétrique modulée** est une technique qui consiste à ciseler très précisément la distribution des doses en 3D avec une seule rotation à 360° du support mobile de l'accélérateur linéaire⁴². Ceci est possible grâce à un algorithme de la planification du traitement qui modifie simultanément trois paramètres pendant le traitement : la vitesse de rotation du support mobile,

³⁸ VIKRAM, B., COLEMAN, C.N., DEYE, J.A., Current status and future potential of advanced technologies in radiation oncology : challenges and resources. *Oncol* 23 3 (2009) 279.

³⁹ GALVIN, J.M., EZZEL, G., EISBRUCH, A., et al., Implementing IMRT in clinical practice : a joint document of the American Society for Therapeutic Radiology and Oncology and the American Association of Physicists in Medicine, *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 58 5 (2004) 1616–34.

⁴⁰ VAN HERK, M., Different styles of image guided radiotherapy, *Seminars in Radiation Oncology*, 17 4 (2007) 258–267.

⁴¹ ROCK MACKIE, T., et al., Tomotherapy ; a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy. *Med Phys* 20 6 (1993) 1709–1719.

⁴² OTTO, K., Volumetric modulated arc therapy : IMRT in a single gantry arc. *Med Phys* 35 1 (2008) 310.

la forme de l'ouverture au moyen du mouvement des mâchoires du collimateur multilames et le débit de la dose administrée.

168. **Radiothérapie stéréotaxique** (aussi appelée « radiochirurgie » bien qu'il n'y ait aucun acte chirurgical) consiste à administrer une dose relativement élevée de rayonnement à un petit volume en recourant à une technique de localisation stéréotaxique précise. La composante stéréotaxique de la technique renvoie au dispositif rigide conçu pour l'immobilisation ou la contention du patient qui établit un système de repères pour chacun d'entre eux pendant tout le processus thérapeutique⁴³. Cette modalité de traitement est habituellement utilisée pour les tumeurs intracrâniennes. Après la pose du dispositif stéréotaxique sur la tête, qui est habituellement fixé sur le cuir chevelu au moyen de quatre vis qui touchent la table externe du crâne, on procède à un examen par imagerie (CT/IRM) pour localiser le volume cible par rapport aux repères donnés par le dispositif.

169. La **radiothérapie robotisée** est un système de radiochirurgie robotisé sans cadre. Ses deux principaux éléments 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.

170. La **curiethérapie** consiste à insérer des sources radioactives à proximité de tumeurs ou de cavités de l'organisme ou directement à l'intérieur. On peut ainsi administrer localement à la tumeur une dose élevée de rayonnement qui va rapidement décroître dans les tissus normaux adjacents. Alors que dans le passé on utilisait essentiellement des sources au radium ou au radon, on fait maintenant de plus en plus appel à des radionucléides artificiels comme le césium 137, l'iridium 192, l'or 198, l'iode 125 et le palladium 103.

171. **La radiothérapie asservie à la respiration.** Les radio-oncologues sont confrontés à des problèmes particuliers lorsqu'ils traitent des parties du corps où les organes et les tumeurs peuvent bouger pendant le traitement. Le mouvement de la cible sous l'effet de la respiration ou pour toute autre raison pendant le traitement augmente le risque de ne pas atteindre la zone ciblée ou de sous-doser le traitement. À mesure que la dose de rayonnement administrée devient plus précise, les mouvements des organes et de la tumeur deviennent un facteur important qui influe sur la précision de l'administration de la dose. Cela est particulièrement sérieux pour les tumeurs situées dans la poitrine, qui bougent pendant la respiration. Il en est de même des tumeurs situées dans le larynx, l'abdomen (foie), la prostate et la vessie, ainsi que le pelvis en général, qui bougent tous pendant et entre les applications thérapeutiques.

172. **La PET dans la planification du traitement radiothérapeutique.** On a constaté ces dernières années une tendance croissante à recourir en oncologie à l'imagerie PET et PET/CT. Outre le diagnostic, la détermination du stade tumoral, le diagnostic de rechutes et le suivi, l'une des principales applications de la PET/CT est l'évaluation de la réaction au traitement et la planification de celui-ci. La PET fournit des informations moléculaires sur le micro-environnement des tumeurs (« imagerie fonctionnelle ») en plus de l'imagerie anatomique. Il est donc très avantageux d'intégrer des données PET dans la planification d'un traitement radiothérapeutique. L'utilisation de l'imagerie fonctionnelle pour mieux délimiter la cible à traiter est un bon exemple de traitement individualisé. En fait, au lieu d'utiliser un champ ou une série de champs préétablis, la dose de rayonnement est configurée en fonction de la tumeur pour chacun des patients⁴⁴.

⁴³ BOURLAND, J.D., "Stereotactic radiosurgery", Clinical Radiation Oncology, 2nd edn (GUNDERSON, L.L., TEPPER, J., Eds), Elsevier Churchill Livingstone, (2007) 151 Ch. 6.

⁴⁴ CHITI, A., KRIENKO, M., GREGOIRE, V., Clinical use of PET-CT data for radiotherapy planning ; What are we looking for? Radiot Oncol 96 (2010) 277-279.

173. **La radiothérapie par particules : faisceau de protons et ions lourds.** On fait de plus en plus appel à la radiothérapie par particules en radio-oncologie en privilégiant l'application de la protonthérapie. Selon les données du Groupe de coopération de la protonthérapie, il y avait, en mars 2010, 30 centres de protonthérapie en service dans le monde, et plus de 67 000 patients avaient été traités par ce biais. Le nombre de tels centres devrait doubler dans un avenir proche.

174. Les récents progrès technologiques en radio-oncologie ont permis de mieux distribuer les doses et de réduire la toxicité dans les sites tumoraux ciblés ce qui, par ricochet, peut offrir de meilleures chances en termes de contrôle tumoral local et d'amélioration des taux de guérison. C'est une des raisons de l'engouement des radio-oncologues et des administrateurs hospitaliers pour ces traitements. Néanmoins, l'augmentation des recettes tirées de l'IMRT et d'autres technologies nouvelles peut entraîner une surutilisation de ces technologies. De manière générale, les preuves scientifiques cliniques concernant le contrôle tumoral local et l'amélioration globale de la survie au cancer pour la plupart des sites tumoraux ne sont pas concluantes à l'heure actuelle.

175. Par le biais de son Programme d'action en faveur de la cancérothérapie (PACT), l'AIEA, en coopération avec des partenaires comme l'Organisation mondiale de la santé, continue d'aider les États Membres à lutter de manière exhaustive contre le cancer. En 2011, huit missions intégrées du PACT (imPACT) ont évalué les capacités et les besoins nationaux dans divers volets de la lutte exhaustive contre le cancer en Algérie, en Bolivie, en Colombie, au Lesotho, au Nigeria, en Ouganda, au Paraguay et aux Philippines. À l'exception d'un seul, les huit sites modèles de démonstration du PACT (Albanie, Ghana, Nicaragua, Mongolie, Sri Lanka, Tanzanie, Vietnam et Yémen) ont accueilli une mission de suivi du PACT et de ses partenaires pour donner suite aux recommandations concernant une approche basée sur les partenariats pour une lutte exhaustive contre le cancer.

E.2.3. Imagerie diagnostique et traitement du cancer du sein⁴⁵

176. Bien que l'incidence du cancer du sein (exprimée en taux standardisé sur l'âge) soit près de trois fois plus élevée dans les pays développés que dans les pays en développement, il s'agit du cancer le plus répandu chez les femmes, quel que soit le niveau socio-économique national. La mortalité progresse, notamment dans les régions du monde où il n'existe pas de programmes de dépistage. L'âge, les antécédents familiaux et la génétique, une première grossesse tardive et l'obésité sont des facteurs de risque connus de cette affection. L'imagerie est essentielle pour détecter les cancers du sein, ainsi que pour classifier et définir l'étendue des tumeurs du sein.

177. La plupart des cancers du sein sont détectés par mammographie par rayons X, généralement dans le cadre de programmes nationaux de dépistage. On a couramment recours aux examens par ultrasons qui sont un complément essentiel des examens physiques et des mammographies destinés à évaluer les masses mammaires suspectes/de nature incertaine. La méthode des ultrasons a aussi été retenue pour guider les procédures d'intervention percutanée sur des masses mammaires, de la biopsie au trocart à l'ablation. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) avec agent de contraste joue un rôle important pour déterminer si des masses mammaires de nature incertaine sont malignes ou bénignes, ainsi que pour définir l'étendue locale d'une affection maligne.

178. Outre l'imagerie radiologique (mammographie, ultrasons, IRM), les techniques d'imagerie nucléaire se révèlent de plus en plus complémentaires pour le diagnostic de lésions du sein, notamment lorsque des dispositifs d'imagerie mammaire dédiés sont utilisés. C'est le cas lors de la scintimammographie classique et, surtout, lors de la tomographie à émission de positons (PET).

⁴⁵ Des informations supplémentaires disponibles dans l'appendice approprié du *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* sur le site web GovAtom/GC.

Les procédures de traitement par radionucléides jouent un rôle fondamental dans la chirurgie radioguidée pratiquée sur des patientes atteintes d'un cancer du sein, soit pour le repérage radioguidé des lésions occultes (ROLL) soit pour la biopsie radioguidée de ganglions lymphatiques sentinelles pendant la phase de traitement primaire. La PET corps entier revêt également une importance cruciale pour le bilan d'extension, pour le bilan d'extension complet après le traitement néo-adjuvant d'un cancer du sein localement avancé et pour l'évaluation de l'efficacité de la thérapie antitumorale.

179. Le cancer du sein est habituellement traité au moyen d'une approche combinant chirurgie, radiothérapie, chimiothérapie et hormonothérapie. Le choix du traitement est basé sur des facteurs pronostiques cliniques et pathologiques, dont le stade de la maladie lors du premier examen, l'histologie et la différenciation de la tumeur, l'âge et la phase ménopausique, la présence ou l'absence de récepteurs des œstrogènes et/ou de la progestérone et la surexpression du récepteur de type 2 pour les facteurs de croissance épidermiques humains (*HER2/neu*).

180. Aux stades précoces du cancer du sein, la radiothérapie postopératoire améliore le contrôle tumoral local et la survie. Par contre, les survivantes ont plus de risques de souffrir de complications à long terme. Des cardiotoxicités secondaires (coronaropathies, péricardites, cardiomyopathies, valvulopathies, troubles de la conduction cardiaque, etc.) apparaissent habituellement dix ans ou plus après le traitement. Au cours des dix dernières années, les progrès de la technologie de la radiothérapie ont contribué à réduire la toxicité du traitement du cancer du sein. Le recours à la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RTC-3D) permet d'administrer la dose de rayonnement nécessaire au volume traité qui cadre exactement avec le volume tumoral. Dans le même temps, les organes normaux (par exemple cœur, poumons) peuvent être épargnés.

181. La radiothérapie par modulation d'intensité (IMRT) est un type perfectionné de radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle qui attribue des intensités différentes à des faisceaux extrêmement fins appelés « segments ». La capacité de moduler de façon optimale l'intensité de chaque rayon dans chaque faisceau (« modulation de dose ») permet une distribution des doses bénéfique : dose élevée à la tumeur et dose faible aux organes normaux (cœur, poumons, peau, etc.).

182. Une autre technique de radiothérapie avancée de haute précision, qui est utilisée avec succès pour la radiothérapie du cancer du sein, traite le problème du mouvement de la cible sous l'effet de la respiration. Cette technique prend en compte la quatrième dimension, le mouvement dans le temps, et c'est la raison pour laquelle elle est aussi appelée « radiothérapie conformationnelle quadridimensionnelle » (RTC-4D). Cette radiothérapie informatisée asservie à la respiration permet d'analyser les mouvements de la poitrine et déclenche le faisceau thérapeutique qui est synchronisé avec le cycle respiratoire. Une phase respiratoire spécifique (inspiration ou expiration) peut être choisie pour l'irradiation. La cible sera donc toujours touchée par le faisceau de rayonnements sans que des organes vitaux soient excessivement exposés en raison de la réduction de la marge de sûreté⁴⁶.

183. Pour l'irradiation partielle accélérée du sein (IPAS) – pour laquelle le lit de la tumeur est traité avec une dose élevée par fraction et l'ensemble du traitement postopératoire local est achevé en cinq jours, voire moins -, la curiethérapie à débit de dose élevé peut être utilisée conjointement avec la téléthérapie. La curiethérapie consiste à insérer des sources radioactives à proximité de tumeurs/lits de tumeurs ou de cavités de l'organisme ou directement à l'intérieur. On peut ainsi administrer localement à la tumeur une dose élevée de rayonnement qui va rapidement décroître dans les tissus normaux adjacents. Dans le cas du cancer du sein, on peut recourir à la curiethérapie interstitielle par cathéters ou à la curiethérapie intracavitaire au moyen d'un ballon.

⁴⁶ GIKAS, S.M., YORKE, E., Deep inspiration breath hold and respiratory gating strategies for reducing organ motion in radiation treatment, *Seminars in Radiat Oncol* 14 1 (2004) 6575.

184. Le traitement d'un cancer du sein localement avancé (tumeur avancée au sein >5 cm ou affectant aussi la peau ou la paroi de la cage thoracique, ou toute tumeur au sein avec métastases dans les ganglions régionaux) constitue toujours un défi de taille^{47,48}. Quand l'opération est possible (si la tumeur et les ganglions ne sont pas fixés et s'il n'y a pas de métastases à distance, par exemple dans les os, le cerveau, le foie, etc.), le traitement consiste à combiner chirurgie, chimiothérapie et/ou hormonothérapie, et radiothérapie. L'effet bénéfique de chaque modalité a été démontré lors d'essais aléatoires étendus^{49,50,51,52}. Même lorsqu'une chimiothérapie adjuvante est administrée, il existe un risque substantiel de récurrence locale-régionale après une chirurgie adéquate. Les facteurs de risque à cet égard sont notamment l'âge, la taille de la tumeur, la phase préménopausique, le nombre de ganglions lymphatiques positifs et l'application d'une thérapie systémique. De telles récurrences peuvent apparaître au bout de trois à 12 mois⁵³, mais la plupart apparaissent dans les trois ans suivants.

185. Dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée (CRP E33025), l'AIEA mène une étude sur des patientes atteintes d'un cancer du sein qui, après avoir subi une mastectomie, doivent suivre une radiothérapie postopératoire. Cet essai clinique compare deux configurations différentes de champs radiothérapeutiques pour déterminer si l'irradiation de la région supraclaviculaire peut être évitée ou non. Étant donné que les objectifs des recherches cliniques de l'AIEA sont basés sur l'avantage potentiel de stratégies d'économie des ressources, le fractionnement utilisé dans l'étude réduit la durée totale de la radiothérapie à trois semaines, contre cinq semaines avec un fractionnement traditionnel. Cette approche permettrait à des services de radiothérapie très sollicités où les listes d'attente sont longues d'utiliser des protocoles basés sur des données scientifiques impliquant des traitements plus courts ou plus simples.

⁴⁷ SINGLETARY S.E., ALLRED, C., ASHLEY, P., et al., Revision of the American Joint Committee on Cancer Staging System for breast cancer. *J Clin Oncol* 2002 ; 20 (17) : 3628-3636.

⁴⁸ GREENE, F.L., PAGE, D.L., FLEMING, I.D., et al (eds), *AJCC Cancer Staging Manual, Sixth Edition*, 2002 ; New York, NY, Springer-Verlag.

⁴⁹ TAGHIAN, A.G., JEONG, J.H., MAMOUNAS, E.P., et al, Low locoregional recurrence rate among node-negative breast cancer patients with tumors 5 cm or larger treated by mastectomy, with or without adjuvant systemic therapy and without radiotherapy : results from five national surgical adjuvant breast and bowel project randomized clinical trials. *J Clin Oncol* 2006 ; 24 (24) : 3927-3932.

⁵⁰ TAGHIAN, A., JEONG, J., MAMOUNAS, E. et al., Patterns of loco regional failure in patients with operable breast cancer treated by mastectomy and adjuvant chemotherapy with or without tamoxifen and without radiotherapy : results from five national Surgical Adjuvant breast cancer and Bowel Project randomized clinical trials. *J Clin Oncol* 2004 ; 22 (21) : 4247-4254.

⁵¹ NIELSEN, H.M., OVERGAARD, M., GRAU, C., JENSON, A.R., OVERGAARD, J., Study of failure pattern among high-risk breast cancer patients with or without postmastectomy radiotherapy in addition to adjuvant systemic therapy : long-term results from the Danish Breast Cancer Cooperative Group DBCG 82 b and c randomized studies. *J Clin Oncol* 2006 ; 24 (15) : 2268-2275.

⁵² RECHT A., GRAY, R., DAVIDSON N.E., et al., Locoregional failure 10 years after mastectomy and adjuvant chemotherapy with or without tamoxifen without irradiation : experience of the Eastern Cooperative Oncology Group. *J Clin Oncol* 1999 ; 17 (6) : 1689-1700.

⁵³ ADENIPEKUN, A., CAMPBELL, O.B., OYESEGUN, A.R., ELUMELU, T.N., Radiotherapy of early breast cancer in Ibadan : outcome of chest wall irradiation alone in clinically nodes free axilla. *African Journal of Medicine & Medical Sciences* 2002 ; 31(4) : 345 - 7.

F. Environnement

F.1. Les méthodes de radio-analyse rapides peuvent faire une différence dans l'évaluation de la pollution radioactive dans les situations d'urgence

186. L'accident de Fukushima a démontré qu'on peut être amenés à analyser un nombre considérable d'échantillons de l'environnement en très peu de temps, et ainsi mettre à rude épreuve les ressources humaines, matérielles et logistiques des laboratoires d'analyse. Comme l'a montré le très grand nombre de données effectivement « en temps réel » communiquées régulièrement par les autorités japonaises, il est essentiel, dans ce genre de situation, de réduire le temps de traitement et d'optimiser les stratégies d'analyse pour pouvoir respecter les limites quantitatives réglementaires et les critères de qualité acceptés.

187. Qu'il s'agisse des urgences nucléaires, des rejets accidentels de diverses installations nucléaires ou d'actes malveillants mettant en jeu une attaque radiologique, la rapidité avec laquelle une évaluation des rejets dans l'environnement et de la contamination est mise à la disposition des autorités peut avoir des effets extrêmement importants sur la sûreté des individus et des populations à risques. Immédiatement après un incident impliquant des rejets potentiels dans l'environnement, le contrôle radiologique doit être effectué par des mesures du débit de dose et des techniques de détection rapide, telles que le contrôle de la radioactivité des aérosols et des gaz et la cartographie des rayonnements, qui sont les méthodes courantes qu'il est recommandé d'utiliser. Dans de nombreux types d'accident, on peut évaluer rapidement la contamination radioactive avec des techniques de spectrométrie gamma utilisées sur le terrain, qui supposent un contrôle *in situ* des dépôts, une cartographie de la contamination du sol à l'aide d'unités mobiles, ainsi que des levés gamma aériens ou subaquatiques. On peut donc contrôler une vaste zone en relativement peu de temps, déterminer l'étendue et l'échelle de la contamination et optimiser les stratégies d'échantillonnage.

188. À un stade plus avancé de l'événement nucléaire, il faudrait effectuer des analyses plus précises d'échantillons collectés conformément aux protocoles validés pour évaluer plus exactement la radioexposition. Une reconstruction de doses exhaustive passe par l'analyse de la gamme complète de radionucléides, y compris les formes gazeuses, particulaires et liquides, en commençant par les tout premiers stades du rejet. Des mesures brutes et spectrométriques des rayonnements alpha, bêta et gamma sont communément effectuées sur des échantillons en vrac ou traités par des procédés agrochimiques. L'accident de Fukushima a montré qu'il est important de disposer de laboratoires d'analyse capables de faire face à l'éventualité de fortes augmentations de leur volume de travail. Grâce à des méthodes rapides, le temps nécessaire aux analyses peut être réduit de plusieurs jours ou semaines à plusieurs heures ou jours. La validation et l'application de ces méthodes s'avèrent surtout nécessaires pour les radionucléides qui posent des risques radiologiques notables dans tous les milieux environnementaux potentiellement affectés et, – fait très important – pour les denrées destinées à l'alimentation humaine et animale.

189. L'utilisation de procédures d'échantillonnage et d'analyse bien caractérisées et validées est particulièrement importante dans le cas des évaluations transfrontières de l'impact environnemental auxquelles participent plusieurs laboratoires ou réseaux de laboratoires, et dans lesquelles la comparabilité des mesures est une question majeure. L'Agence appuie des laboratoires et des réseaux de laboratoires d'États Membres par la formation, des projets de recherche coordonnée (PRC), la fourniture de matières de référence pour un large éventail de contaminants, l'élaboration et l'utilisation concertées de techniques d'analyse, et l'organisation de tests de compétence et de comparaisons interlaboratoires. Le réseau ALMERA qu'elle coordonne est un réseau mondial de laboratoires d'analyse pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement, qui comprend des

laboratoires désignés par les États Membres et peut fournir en temps voulu des analyses fiables d'échantillons de l'environnement en cas de rejets accidentels ou intentionnels de radioactivité.

190. ALMERA est engagé dans la validation en collaboration de méthodes rapides et concentrera davantage ses efforts sur les radionucléides et les échantillons intéressants dans les situations d'urgence. Son test de compétences organisé en 2011 s'est concentré sur les émetteurs alpha, bêta et gamma dans des échantillons de sol et d'eau. Un court délai de trois jours après réception des échantillons avait été fixé pour la communication rapide des résultats sur les radionucléides émetteurs de rayonnements gamma afin de tester la performance des laboratoires d'analyse lorsque le temps est compté. À l'avenir, des matières de référence et des tests de compétence supplémentaires, avec de courts délais de communication des résultats, seront élaborées par l'Agence et par les laboratoires du réseau ALMERA pour couvrir de manière exhaustive tous les besoins liés aux situations d'urgence. En 2012, l'accent sera mis sur la qualité et la comparabilité des analyses d'échantillons d'aérosols.

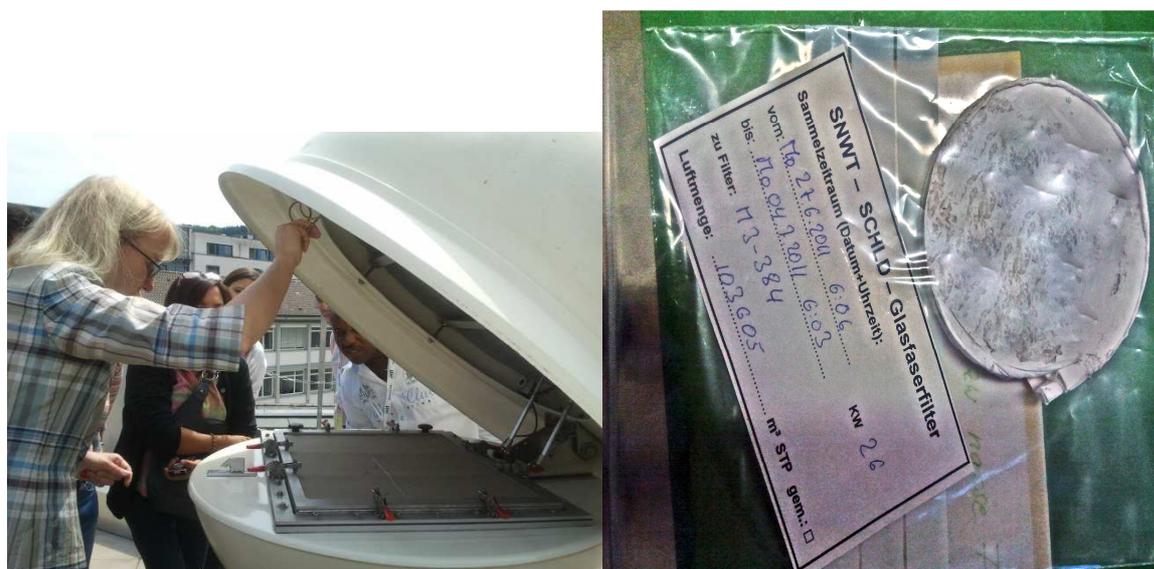


FIG. F-1. Collecteur d'aérosols de grand volume utilisé par l'Office fédéral de radioprotection à Salzgitter (Allemagne), et filtres d'aérosols compactés pour comptage immédiat de spectrométrie gamma – en démonstration aux participants au Cours régional interinstitutions avancé de l'Agence sur la radioactivité marine : techniques d'analyse et gestion de la qualité, accueilli par l'Institut de technologie de Karlsruhe en 2011.

191. L'accident de Fukushima a aussi montré que confier les analyses à des laboratoires au sein d'un réseau bien coordonné et déployer des laboratoires mobiles constituent des solutions supplémentaires utiles et nécessitent une planification préalable. Un mécanisme rapide et fiable de validation et de communication des résultats est tout aussi important pour appuyer la prise de décisions en temps voulu. La technologie moderne de communication mobile rassemble sur le terrain les forces combinées des bases de données relationnelles informatisées, des systèmes d'information géographique, de la documentation multimédia, de l'accès en ligne aux procédures et de l'assistance opérationnelle appuyant la traçabilité et la qualité des données. L'intégration de la télédétection et des observations ainsi que de la modélisation hydrométéorologiques est essentielle pour fournir des orientations rapides en vue du réajustement de la stratégie de surveillance, et plus tard, lors de la préparation de l'intervention des autorités. Par comparaison avec les levés aériens et terrestres de spectrométrie gamma *in situ* plus courants, un domaine où des progrès technologiques s'avèrent nécessaires est la surveillance subaquatique *in situ* par spectrométrie gamma à haute résolution en phases stationnaire et mobile de l'environnement marin côtier, qui permet de reconstruire les rejets de matières radioactives liquides et de détecter rapidement une contamination de l'eau et des sédiments.

G. Ressources en eau

192. La demande d'eau dans les secteurs agricole, énergétique et industriel et pour les utilisations urbaines continue d'augmenter dans le monde. Ajoutée aux inquiétudes croissantes concernant l'impact du changement climatique prévu sur le cycle hydrologique, cette demande croissante s'accompagne de changements majeurs dans l'allocation et la gestion des ressources en eau. Dans certains endroits, la situation a dégénéré en conflit en raison des difficultés rencontrées pour donner accès à l'eau potable, comme l'a souligné le rapport de la Journée mondiale de l'eau 2011⁵⁴, qui a examiné le problème de l'accès à l'eau dans le contexte du développement urbain. Étant donné que la plupart des eaux de surface ont été allouées et/ou deviennent polluées, on s'attend à ce que les eaux souterraines jouent un rôle encore plus important dans un avenir proche et fournissent l'essentiel de l'eau douce dans le monde. Malheureusement, la plupart des pays ne connaissent pas suffisamment leurs ressources en eaux souterraines pour pouvoir assurer un approvisionnement en eau adéquat.

193. L'adoption de politiques appropriées capables de faciliter le partage des ressources limitées passe par l'accès à des informations rigoureuses et exhaustives sur la disponibilité et les conditions des ressources en eau existantes. Les méthodes isotopiques fournissent des informations uniques qui peuvent servir à évaluer et à cartographier rapidement et efficacement les ressources en eaux souterraines. Les techniques isotopiques et les outils géochimiques connexes, ajoutées aux récentes percées enregistrées en cartographie grâce à l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) et de méthodes géostatistiques, aident les spécialistes et les responsables de la gestion de l'eau à mieux délimiter, quantifier et visualiser la géométrie, le volume et les propriétés des aquifères et des nappes d'eaux souterraines. Des cartes déterminant des plans d'eau plus résistants au changement climatique ou des zones de recharge active sont essentielles pour assurer l'accès à l'eau à long terme.

G.1. Tendances de l'accès aux données d'isotopes stables

194. En 2011, l'utilisation d'appareils d'analyse par spectroscopie laser des isotopes stables de l'eau (oxygène 18 et deutérium), bon marché et d'emploi facile, est devenue courante dans des groupes de recherche du monde entier. Grâce à cette innovation, de nombreux groupes dans les pays développés et les pays en développement peuvent réaliser de manière autonome des analyses des isotopes stables pour des études hydrologiques, ce qui leur évite d'attendre les résultats d'analyses de laboratoires très cotés et leur permet de faire des économies. Par exemple, des études visant à évaluer les ressources en eaux souterraines de la péninsule de Santa Elena en Équateur (voir Fig. G.1) sont conduites de manière plus efficiente en raison de la disponibilité d'un tel analyseur. Au cours de la prochaine année, on s'attend à voir s'accélérer le processus de mise au point de nouveaux analyseurs pour le carbone 13 et l'azote 15 basés sur la même technologie, ce qui facilitera l'utilisation de ces isotopes dans l'étude des eaux souterraines et des eaux de surface.

⁵⁴ Voir : http://www.unwater.org/downloads/World_Water_Day_2011_Final_Report_Web.pdf



FIG. G-1. L'amélioration des connaissances scientifiques due essentiellement aux données obtenues avec des analyseurs d'isotopes stables a notamment permis d'accroître l'accès aux ressources en eaux souterraines dans les communautés côtières en Équateur (avec l'aimable autorisation d'ESPOL, Guayaquil, Équateur).

G.2. Datation des eaux souterraines

195. Contrairement à la situation prévalant en ce qui concerne le matériel d'analyse des isotopes stables, de nombreux États Membres en développement ne possèdent pas le matériel d'analyse nécessaire pour mesurer les faibles niveaux d'activité de radionucléides souvent utilisés dans la datation des eaux souterraines, laquelle est importante pour évaluer la durabilité, la vulnérabilité à la pollution et les taux d'alimentation. Les radionucléides de l'environnement tels que le tritium ou le carbone 14 ont été couramment utilisés pour acquérir ces connaissances. Ces dernières années, un certain nombre de faits nouveaux pertinents ont permis d'améliorer l'analyse de ces isotopes (par exemple analyse du tritium grâce à la technique de mesure par l'hélium 3 et la spectrométrie de masse), mais le nombre d'installations reste limité. De même, la méthode du tritium/hélium 3 servant à dater les nappes d'eaux souterraines récemment rechargées est appliquée plus fréquemment, mais l'accès aux installations d'analyse pour appuyer cette technique est aussi limité.

196. L'utilisation des isotopes de gaz rares pour dater les eaux souterraines dans plusieurs tranches d'âge a augmenté sensiblement ces deux dernières années, et continue de se développer, de même que la recherche dans ce domaine. Par exemple, des établissements tels que le Laboratoire national d'Argonne (États-Unis d'Amérique) et l'université d'Heidelberg (Allemagne) sont en train d'élaborer des techniques d'analyse de traces à l'aide de pièges atomiques (ATTA), qui ouvrent de nouvelles possibilités pour la datation des eaux souterraines avec des isotopes de gaz rares. Dans le cas des eaux souterraines rechargées récemment (jusqu'à il y a 100 ans), on utilise le krypton 85. En ce qui concerne les eaux souterraines dont la recharge remonte jusqu'à 2000 ans, on a aussi utilisé l'argon 39 avec succès. Dans le cas des grands aquifères des bassins sédimentaires, tels que le système aquifère des grès de Nubie (AGN) en Afrique du Nord et celui de Guarani en Amérique du Sud, deux aquifères profonds dont l'âge des eaux peut atteindre un million d'années, des radionucléides à longue période comme le krypton 81⁵⁵ sont de plus en plus utilisés, ce qui améliore les modèles relatifs à l'écoulement

⁵⁵ Voir :

<http://www.nytimes.com/2011/11/22/science/rare-krypton-81-isotope-helps-track-water-in-ancient-nubian-aquifer.html?src=dayp>

l'écoulement et aux transport des eaux souterraines. L'hydrologie isotopique peut permettre d'obtenir les informations nécessaires sur les quantités d'eau disponibles, ainsi que sur la qualité et l'évolution attendue de l'eau. L'Agence continue de jouer un rôle clé en examinant et en évaluant ces nouveaux outils et ces nouvelles méthodologies, en permettant aux États Membres d'y avoir accès et en leur transférant des connaissances.

H. Production de radio-isotopes et technologie des rayonnements

H.1. Radio-isotopes et radiopharmaceutiques

H.1.1. Progrès récents dans le domaine des radionucléides produits par générateur pour la PET

197. Les progrès en imagerie nucléaire ont toujours été étroitement liés à la production de nouveaux radionucléides dotés de propriétés physiques et chimiques toutes nouvelles. Les radionucléides produits par générateur afin d'être utilisés pour la PET sont de plus en plus accessibles parce qu'ils peuvent être produits dans des hôpitaux qui ne disposent pas d'un cyclotron sur place. Actuellement, le gallium 68 (^{68}Ga) peut être obtenu à partir de générateurs commerciaux $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ et est largement utilisé dans l'imagerie PET. Il s'agit d'une avancée technique importante car le ^{68}Ga , chimiquement similaire au lutécium 177 et à l'yttrium 90 (deux radionucléides de plus en plus utilisés pour la thérapie de certains cancers), pourrait marquer des peptides biologiquement actifs, tels que l'octréotide, en utilisant la voie chimique établie, par l'intermédiaire du ligand DOTA, et pourrait servir pour la délimitation des tumeurs neuroendocrines au moyen d'examens diagnostiques au scanner avant la thérapie. Compte tenu du succès obtenu avec le ^{68}Ga -DOTATATE, le potentiel des nouveaux peptides marqués au ^{68}Ga pour l'imagerie d'autres types de tumeurs est activement étudié par de nombreux chercheurs. Un exemple est la bombésine, peptide dont on sait qu'il possède des récepteurs dans les tumeurs du sein, de la prostate et des poumons. La bombésine a été marquée au ^{68}Ga et on évalue actuellement son utilité pour l'imagerie de telles tumeurs. Outre ce système de générateur de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$, d'autres systèmes de générateur potentiellement intéressants pour les émetteurs de positons sont en cours de fabrication dans divers centres de recherche, y compris, par exemple, des générateurs de titane 44/scandium 44, de sélénium 72/arsenic 72 et de néodyme 140/praséodyme 140.

H.1.2. Développement de systèmes basés sur la microfluidique pour la synthèse de traceurs PET

198. Les méthodes appliquées pour marquer des biomolécules au fluor 18 afin qu'elles deviennent des traceurs immuno-PET exigent une optimisation considérable des conditions de radiomarquage. De tels processus ont tendance à consommer des quantités importantes de biomolécules rares. Les systèmes microfluidiques utilisent de petites quantités de fluides qui contiennent des ingrédients actifs permettant la synthèse de radiopharmaceutiques de PET. Ces systèmes présentent de nombreux avantages, par exemple une plus grande efficacité des réactions chimiques grâce à des rapports surface/volume très élevés ainsi qu'un contrôle des températures rapide et précis. Les autres avantages sont une production de radiopharmaceutiques très contrôlée, flexible, reproductible et fiable grâce à l'automatisation des processus, ainsi que des éléments microfluidiques clés à faible coût, interchangeables, jetables et de qualité garantie. Satisfaire aux exigences de radioprotection avec un système microfluidique revient beaucoup moins cher du fait de sa petite taille. Un tel système permet également une meilleure utilisation de l'espace dans le laboratoire. Les systèmes microfluidiques sont

particulièrement efficaces lorsque des biomolécules rares et chères sont envisagées pour le radiomarquage PET.

199. Avec les toutes récentes puces numériques en microfluidique à génération de gouttelettes, on peut piloter par ordinateur le dosage et le mélange du marqueur fluor 18, de la biomolécule et du tampon dans des proportions définies. Cela permet d'optimiser rapidement les conditions de réaction dans des volumes de l'ordre du nanolitre et peut par la suite donner lieu à un marquage au fluor 18, à l'échelle de banc d'essai, de fragments d'anticorps mis au point à des fins de cancérologie. Ces techniques, disponibles depuis 2011, auront un impact important sur la recherche préclinique et sur les applications cliniques des nouveaux traceurs PET, notamment des traceurs immuno-PET dont les biomolécules essentielles sont disponibles en petites quantités. De nouvelles méthodes de marquage au fluor 18 faisant appel à des technologies de synthèse radiochimique basées sur la microfluidique sont en train d'être mises au point par un certain nombre de fabricants dans le monde entier.

H.1.3. Cyclotrons multi-particules pour la production d'isotopes

200. On a constaté en 2011 qu'un certain nombre de fabricants avaient mis à niveau leurs cyclotrons pour en augmenter l'intensité des faisceaux et les énergies afin de répondre à la demande actuelle de radionucléides destinés à des applications cliniques de la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT) et de la PET, ainsi qu'à visée thérapeutique. L'accent dans ce domaine est mis sur le développement de nouveaux cyclotrons multi-particules polyvalents de production d'isotopes, capables d'accélérer les protons, les deutons, l'hélium 3 et les particules alpha à haute intensité afin de pouvoir utiliser des faisceaux de particules autres que des protons pour la production de quantités raisonnables de radionucléides. Les faisceaux d'alpha peuvent être utilisés pour la production de nouveaux isotopes thérapeutiques tels que l'émetteur alpha astatine 211 et l'émetteur bêta cuivre 67. Même si chaque radionucléide peut théoriquement être produit par plusieurs voies nucléaires, la réaction (p, n) sur un isotope cible enrichi est la plus efficace. L'arrivée des cyclotrons multi-particules élargira l'éventail des radionucléides et apportera de nouvelles solutions pour la mise à disposition de radionucléides intéressants qui n'ont actuellement qu'une disponibilité limitée. Par exemple, le cuivre 64, l'iode 124 et l'yttrium 86, dont l'utilisation est éprouvée, ainsi que les nouveaux radionucléides tels que le cobalt 55, le brome 76, le zirconium 89, le rubidium 82m, le technétium 94m et l'iode 120, peuvent être produits par les réactions à faible énergie (p, n), (p, α) ou (d, n). La production de radionucléides comme le fer 52, le sélénium 73 et le strontium 83 à l'aide de protons ou de deutons d'énergie intermédiaire doit faire l'objet d'une attention particulière pour ce qui est du traitement chimique qui suit.

H.2. Applications de la technologie des rayonnements

H.2.1. Le vaccin irradié par rayons gamma a un potentiel en matière de lutte contre le paludisme

201. Le paludisme est une maladie parasitaire potentiellement mortelle qui touche des millions de personnes dans le monde. Même si des processus de vaccination fondés sur des vaccins à virus vivant atténué ont été une réussite pour un certain nombre de maladies infectieuses, notamment la polio, la fièvre jaune, la rougeole et la variole, la mise au point d'un vaccin efficace contre le *Plasmodium falciparum*, le plus mortel des parasites du paludisme, reste l'un des grands défis de la médecine moderne.

202. Lors de la dernière Réunion internationale sur le radiotraitement (IMRP-2011), qui s'est tenue à Montréal (Canada) en juin 2011, des chercheurs de Sanaria Inc., de l'Institut national des normes et de la technologie (NIST) et de Protein Potential ont signalé la mise au point d'un vaccin très efficace basé sur un sporozoïte radioatténué qui bloque le stade érythrocytaire, empêchant la maladie d'évoluer et bloquant également sa transmission. Le vaccin en question est constitué de sporozoïtes de *Plasmodium falciparum* atténués produits par irradiation gamma, non reproducteurs et métaboliquement actifs. Le défi portant sur la fabrication de quantités suffisantes du vaccin répondant aux normes réglementaires pour les essais cliniques initiaux a été relevé avec succès. D'importants objectifs tels que l'établissement d'une dose de rayonnement qui atténue tous les parasites sans diminuer la puissance ainsi que la mise en place d'une méthodologie et d'un système de surveillance des rayonnements pleinement conformes à toutes les bonnes pratiques de fabrication actuelles prescrites par l'Office de contrôle des produits alimentaires et pharmaceutiques (FDA), ont été atteints. Un essai de phase I du vaccin basé sur le sporozoïte de *Plasmodium falciparum*, auquel ont participé 80 volontaires, a été mené à bien et l'efficacité du vaccin démontrée. Le vaccin en est désormais à un stade avancé d'essais cliniques et pourrait remplacer les vaccins existants dont l'incidence de complications est relativement élevée.

H.2.2. Les membranes résultant d'un greffage par irradiation aident à décontaminer les eaux dans la région de Fukushima

203. À la suite du tsunami provoqué par le tremblement de terre dévastateur qui s'est produit au Japon en mars 2011, l'alimentation électrique et la circulation de l'eau de refroidissement du réacteur nucléaire ont été interrompues à la centrale de Fukushima-Daiichi. Du fait de la fusion du réacteur nucléaire, des matières radioactives ont été dispersées dans la zone alentour, y compris dans de nombreux plans d'eau.

204. Pour retirer sélectivement le radiocésium d'une eau contaminée, on a testé un absorbant en fibres polymères, mis au point par la Direction de la science quantique de l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) grâce à un greffage par irradiation d'un monomère approprié sur un non-tissé en polyéthylène. Insérés dans une cartouche, les absorbants greffés ont été utilisés pour retirer le radiocésium d'un étang à Litate-Mura et de la piscine d'une école à Fukushima. Ces deux essais ont été réalisés avec succès. En plus de permettre le retrait du radiocésium, cette technique a l'avantage, du fait de la collecte directe du composant toxique, d'éviter la production de boue, ce qui dispense d'activités de manutention et d'assainissement supplémentaires.



FIG. H-1. Utilisation de membranes greffées pour retirer le radiocésium de l'eau dans la région de Fukushima (crédit photo : JAEA Takasaki (Japon)).

H.2.3. Technologie des faisceaux d'électrons pour la production de bioéthanol à partir de résidus agro-industriels

205. Selon la récente feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) intitulée *Biofuels for Transport : utilisation des biocarburants dans les transports*, les biocarburants pourraient représenter 27 % de l'ensemble des carburants de transport d'ici à 2050, contre seulement 2 % aujourd'hui⁵⁶. Cette utilisation accrue permettrait de réduire considérablement les émissions de CO₂ tout en renforçant la sécurité des approvisionnements énergétiques, sans porter atteinte à la sécurité alimentaire du fait de l'utilisation de sous-produits agro-industriels. Les biocarburants conventionnels, dits de première génération, provenaient de produits alimentaires de base tels que le maïs et la canne à sucre, tandis que les biocarburants avancés, dits de deuxième génération, sont fabriqués à partir de résidus agro-industriels comme la paille, les épis de maïs et la bagasse de canne à sucre. Un exemple de biocarburant est le bioéthanol, qui a des propriétés similaires à celles de l'essence mais qui est sans soufre et facilement dégradable, et qui représente, parallèlement à la production agro-alimentaire, une nouvelle source de revenu pour les agriculteurs. Un biocarburant de deuxième génération comme le bioéthanol a comme autre avantage par rapport à l'essence de contribuer à la réduction des gaz à effet de serre : les études ont montré que l'éthanol de canne à sucre permettrait de faire baisser les gaz à effet de serre à hauteur de 86 à 90 % avec pratiquement la même utilisation des terres.

⁵⁶ Voir http://www.iea.org/papers/2011/biofuels_roadmap.pdf.

206. La production de biocarburants avancés en est encore au stade du développement car il faut continuer d'améliorer l'efficacité de conversion et de réduire les coûts. Dans le cas de la production de bioéthanol à partir de sources de cellulose, l'un des problèmes rencontrés est la lenteur et le coût de l'hydrolyse enzymatique de la cellulose.

207. Il ressort de la Réunion internationale sur le radiotraitement de juin 2011, que l'hydrolyse thermique (40 min, 180 °C) combinée à l'irradiation (50 kGy) par faisceaux d'électrons de bagasse de canne à sucre permettait de réduire la quantité d'oligosaccharides formés par la décomposition partielle de la cellulose et de l'hémicellulose. Selon des travaux entrepris précédemment par des groupes de recherche au Brésil, aux États-Unis, au Japon et en République de Corée, l'irradiation par faisceaux d'électrons (30 kGy) de bagasse de canne à sucre pourrait améliorer de 75 % l'hydrolyse enzymatique de la cellulose et accroître le rendement du bioéthanol.



FIG. H-2. Récolte de canne à sucre au Brésil (crédit photo : Institut de recherches énergétiques et nucléaires (IPEN), São Paulo (Brésil)).

H.3. Technologies des rayonnements utilisées dans l'industrie minière⁵⁷

208. Les radiotraceurs et les jauges nucléoniques sont de plus en plus employés dans l'industrie minière, essentiellement pour la prospection et l'exploitation efficace de ressources naturelles. Si les radiotraceurs les plus facilement détectables sont utilisés pour des études non invasives dans l'industrie, les jauges nucléoniques sont employées pour la prospection de ressources. La pénétration profonde des neutrons et des rayons gamma rend les techniques nucléaires appropriées pour les applications de diagraphie des sondages. Ces techniques sont donc largement utilisées dans les industries du pétrole, du gaz et de l'uranium, ce depuis longtemps. Elles commencent aujourd'hui à être employées également dans les industries charbonnière et minière.

209. En outre, diverses méthodes de spectrométrie nucléaire sont utilisées avec succès dans les gisements et dans les environnements industriels pour une analyse *in situ* des échantillons. Le spectromètre nucléaire portable moderne permet de réaliser des économies considérables de temps et de travail sans que la performance ne soit réduite par rapport à celle obtenue avec l'instrument de laboratoire classique.

210. Les industries minière, métallurgique et de traitement des minerais comptent parmi les principaux bénéficiaires de ces techniques et technologies. Du fait des avantages intéressants qui en découlent, l'emploi de radiotraceurs et de jauges nucléoniques dans ces industries se développe et ne cesse d'évoluer. De nouveaux radiotraceurs, des logiciels conviviaux, de nouveaux détecteurs et des systèmes d'acquisition de données sont actuellement développés et mis en place dans la pratique.

⁵⁷ Des informations supplémentaires disponibles dans l'appendice approprié du *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* sur le site web GovAtom/GC.