

Conférence générale

GC(59)/INF/2

13 juillet 2015

Distribution générale

Français

Original : anglais

Cinquante-neuvième session ordinaire

Point 17 de l'ordre du jour provisoire
(GC(59)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2015

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus en 2014.
- Le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2015 couvre les domaines suivants : applications énergétiques, données atomiques et nucléaires, applications dans les accélérateurs et les réacteurs de recherche, techniques nucléaires destinées à améliorer la santé animale, progrès en dosimétrie médicale, radiopharmaceutiques, isotopes dans les études climatiques et hydrologiques, et compréhension des changements dans l'environnement marin grâce à des techniques nucléaires.
- La version définitive sera établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et communiquée aux États Membres comme document d'information à la 59^e session ordinaire de la Conférence générale.
- Des informations sur les activités de l'Agence dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires figurent également dans le Rapport annuel de l'AIEA pour 2014 (GC(59)/7), en particulier dans la partie Technologie, et dans le Rapport sur la coopération technique pour 2014 (GC(59)/INF/3).
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations particulières faites par le Conseil des gouverneurs et d'autres observations communiquées par les États Membres.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2015

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. Avec 438 réacteurs en service à la fin de 2014, la capacité mondiale de production d'énergie nucléaire était de 376,2 GWe. Il n'y a eu qu'une seule mise à l'arrêt définitif. Cinq nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau et trois nouveaux réacteurs ont été mis en chantier. Les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie, et en particulier en Chine. Quarante-six des 70 réacteurs en construction étaient dans cette région, de même que 32 des 40 derniers nouveaux réacteurs à être couplés au réseau depuis 2004.
2. Trente pays utilisent actuellement l'électronucléaire et un nombre équivalent de pays envisagent ou prévoient son inclusion dans leur bouquet énergétique, ou y travaillent activement. Sur les 30 pays exploitant des centrales nucléaires, 13 sont en train de construire de nouvelles centrales ou d'achever activement des chantiers qui avaient été suspendus, et 12 prévoient d'en faire autant. Plusieurs pays qui ont décidé d'introduire l'électronucléaire sont à des stades avancés de préparation de l'infrastructure.
3. Les projections 2014 de l'Agence indiquent une croissance de 8 % à 88 % de la capacité électronucléaire d'ici à 2030. La croissance démographique et l'augmentation de la demande en électricité dans le monde en développement, la reconnaissance du rôle de l'électronucléaire dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'importance de la sécurité de l'approvisionnement énergétique et la volatilité des prix du combustible fossile laissent prévoir un rôle important de l'énergie nucléaire dans le bouquet énergétique à long terme.
4. On a continué d'améliorer la sûreté dans les centrales nucléaires dans le monde, notamment grâce à la détermination et à l'application des enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi, à l'amélioration de l'efficacité de la défense en profondeur, au renforcement des capacités de préparation et de conduite des interventions d'urgence, à l'amélioration de la création de capacités et à la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants.
5. Bien que les dépenses de prospection et de mise en valeur aient été considérables, un grand nombre de nouveaux projets d'extraction de minerai ont été retardés ou devraient l'être en raison du faible prix de l'uranium. Les ressources non classiques d'uranium augmentent encore la base de ressources, et la recherche relative à la récupération économique d'uranium dans les océans a donné des résultats encourageants.
6. La capacité globale d'enrichissement est restée supérieure à la demande annuelle totale et les autres activités du cycle du combustible se sont maintenues à un niveau relativement constant. Afin de contribuer au cadre d'assurance de l'approvisionnement, des travaux importants ont porté sur les

dispositions financières, juridiques et techniques relatives à la création de la banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA au Kazakhstan.

7. Pratiquement tous les États Membres doivent gérer des déchets radioactifs sous une forme ou une autre. Lors du forum scientifique, qui s'est tenu pendant la 58^e session ordinaire de la Conférence générale de l'Agence, on a insisté sur la nécessité d'une approche « de bout en bout » complète et intégrée de la gestion des déchets radioactifs et souligné l'existence de solutions pouvant être mises en œuvre.

8. En raison du report de la décision de politique générale concernant la gestion du combustible usé dans de nombreux États Membres, la quantité mondiale de combustible usé entreposé n'a cessé d'augmenter. En 2014, environ 10 000 t de métal lourd (ML) ont été déchargées comme combustible usé de toutes les centrales nucléaires, ce qui a porté la quantité cumulée à environ 380 500 t de ML, dont près de 258 700 t étaient entreposées dans des installations sur le site du réacteur ou hors du site de celui-ci.

9. La solide expérience acquise en matière de déclasséement depuis le début de ce siècle aidera à effectuer le travail considérable prévu dans ce domaine au cours des années à venir. En effet, 149 réacteurs nucléaires de puissance dans le monde ont été définitivement mis à l'arrêt ou sont en cours de déclasséement, et 17 d'entre eux ont été entièrement déclassés. Un peu plus de la moitié de l'ensemble des réacteurs en service ont plus de 30 ans et environ 14 % d'entre eux ont plus de 40 ans. Si certains pourraient encore fonctionner jusqu'à 60 ans, nombre d'entre eux seront retirés du service au cours des deux prochaines décennies. De plus, plus de 480 réacteurs de recherche et assemblages critiques et plusieurs centaines d'autres installations nucléaires, telles que des installations de gestion des déchets radioactifs ou du cycle du combustible, ont été déclassés ou sont en cours de déclasséement.

10. De même, certains pays ont mis en place des ressources techniques et des compétences appropriées dans la remédiation des terres contaminées en raison des pratiques antérieures et des accidents survenus, mais de nombreux programmes nationaux se heurtent encore à des difficultés importantes empêchant la mise en œuvre de programmes de remédiation. Le Japon a accompli des progrès importants dans la remédiation des terres contaminées par l'accident de Fukushima Daiichi, et la coordination entre les activités de remédiation, d'une part, et les efforts de reconstruction et de revitalisation, d'autre part, a été bonne. Il est primordial de partager les enseignements tirés des travaux de remédiation avec la communauté internationale.

11. La communauté internationale des spécialistes des données nucléaires a entrepris d'unifier les Fichiers de données nucléaires évaluées, sur lesquels se fonde toute technologie nucléaire, grâce au projet de l'Organisation internationale de collaboration pour une bibliothèque de données évaluées, lancé par l'Agence de l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN). Cette démarche aboutira à la création de fichiers uniques pour les noyaux considérés comme prioritaires, à savoir l'hydrogène, l'oxygène, le fer et les actinides majeurs, fichiers qui pourront être utilisés dans tous les projets d'évaluation, pour toutes les applications.

12. Deux projets d'accélérateurs à grande échelle ont été lancés, en Europe, en 2014. La nouvelle installation multi-technique expérimentale de l'Agence, conçue comme une station finale de la ligne de faisceaux à fluorescence X à l'installation Elettra, à Trieste (Italie), permettra à des groupes de recherche d'États Membres, notamment de pays en développement, d'avoir accès à un synchrotron ultramoderne.

13. La majorité des 247 réacteurs de recherche et des installations critiques en service restent largement sous-utilisés et ont, en moyenne, plus de 45 ans. Six pays en construisent de nouveaux et plusieurs autres pays prévoient ou envisagent de faire de même. Des initiatives comme l'Internet

Reactor Laboratory et le Centre international s'appuyant sur un réacteur de recherche, désigné par l'AIEA, sont destinées à favoriser la coopération internationale dans la formation théorique et pratique, ainsi que l'utilisation efficace de telles installations.

14. S'il n'y a pas eu, en 2014, de pénuries importantes d'approvisionnement en molybdène 99 (isotope médical), les difficultés d'exploitation dans les installations de traitement et les réacteurs de recherche plus anciens demeurent.

15. Les activités globales destinées à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur du nucléaire civil ont continué : dans le cadre de la mise en œuvre de l'Initiative des États-Unis pour la réduction de la menace mondiale, 92 réacteurs de recherche sur 200 ont été convertis en réacteurs à uranium faiblement enrichi (UFE) ou ont vu leur mise à l'arrêt confirmée. Fin 2014, les programmes de reprise de combustible à l'UHE provenant des États-Unis ou de Russie étaient achevés à 76 % et 86 %, respectivement.

16. Depuis 1962, les laboratoires des applications nucléaires de l'Agence à Seibersdorf, près de Vienne, contribuent à rendre les applications pacifiques des technologies nucléaires plus accessibles aux États Membres. Cette assistance est fournie en grande partie par le biais du programme de coopération technique de l'AIEA, qui répond directement aux besoins des États Membres dans les domaines de l'alimentation et de l'agriculture, de la santé humaine, de l'environnement terrestre et de l'instrumentation nucléaire. La nouvelle initiative de l'Agence, le projet de Rénovation des laboratoires des applications nucléaires (ReNuAL), prévoit la première rénovation complète des laboratoires depuis leur création. Elle a pour but d'adapter ces laboratoires à l'usage prévu pour aider les États Membres à relever les défis du développement mondial au cours des deux prochaines décennies.

17. Les technologies nucléaires et connexes jouent un rôle important dans la santé animale, notamment en ce qui concerne le diagnostic des maladies et la caractérisation des organismes pathogènes.

18. Les vaccins sont des outils importants pour la protection des animaux et des êtres humains contre les maladies. Des progrès récents dans l'irradiation des vaccins permettent la création de vaccins métaboliquement actifs, et pourtant non répliquants, donc qui provoquent une réponse du système immunitaire analogue à celle qu'entraîne l'exposition à un agent pathogène vivant.

19. Un diagnostic précoce et rapide est essentiel pour lutter contre la propagation de maladies transfrontières. Bien que les enzymes et les teintures fluorescentes soient efficaces pour le diagnostic et pratiques à utiliser dans ce domaine, des techniques nucléaires sont nécessaires lorsque des niveaux de sensibilité et de spécificité élevés sont requis (par exemple, pour diagnostiquer la grippe aviaire H5N1, la fièvre aphteuse, la fièvre de la vallée du Rift ou la peste porcine africaine).

20. L'apparition des technologies reposant sur une plateforme d'amplification des acides nucléiques (comme la réaction de polymérisation en chaîne) a permis une amélioration importante du diagnostic des maladies infectieuses. Le principal avantage de ces techniques est la possibilité de détecter des niveaux d'infection extrêmement bas chez les animaux, et de détecter ainsi un agent pathogène avant que la maladie se déclare. La détection précoce des agents pathogènes est essentielle pour prévenir une épidémie, comme celle de fièvre Ebola en Afrique de l'Ouest en 2014, la pire épidémie de cette maladie. L'Agence a complété les efforts internationaux en aidant les États Membres africains à créer des capacités nationales et régionales ou à renforcer les capacités existantes et à travailler en réseau pour l'application de techniques de diagnostic et de lutte contre la maladie rapides et précises. Une plateforme technologique du type susmentionné, la transcription inverse - réaction de polymérisation

en chaîne (RT-PCR), est reconnue comme une technique de diagnostic rapide et efficace de la fièvre Ebola.

21. La technique de l'analyse des isotopes stables peut être utilisée pour comprendre l'épidémiologie des zoonoses. Pour utiliser des isotopes stables aux fins de caractérisation d'une population, il faut examiner la signature isotopique de quelques individus représentatifs de l'ensemble de cette population. Une fois établi le profil isotopique d'une population donnée, tout individu de cette population peut fournir des informations sur la migration globale de l'espèce en question.

22. Il est important de mesurer efficacement la dose de rayonnements à laquelle un patient est exposé au cours d'une radiothérapie et d'une radiologie diagnostique pour vérifier que le traitement dispensé est conforme à la prescription ou pour estimer le risque lié à l'exposition d'un patient à des rayonnements dans le cadre d'une procédure d'imagerie médicale.

23. L'imagerie diagnostique aux rayons X est utilisée dans de nombreux types d'exams, de la radiographie à projection simple à l'imagerie dynamique transversale avancée. En conséquence, un large éventail de grandeurs dosimétriques, d'instruments et de techniques de mesure ont été mis au point et sont tous source de difficultés pour les personnes travaillant dans l'environnement clinique.

24. Des normes et des procédures dosimétriques de référence homogènes sont une exigence clé dans le processus de radiothérapie. De nouvelles normes et de nouveaux principes directeurs sont en cours d'élaboration afin de progresser au même rythme que les techniques de radiothérapie et la technologie.

25. Récemment, l'utilisation des techniques de radiothérapie à petits champs s'est développée, renforçant le caractère incertain de la dosimétrie clinique et amenant à se demander s'il était approprié d'appliquer les protocoles dosimétriques de référence existants, qui avaient été élaborés pour de plus grands champs. Un code de bonne pratique relatif à la dosimétrie, qui permettra de normaliser la dosimétrie des petits champs, est en cours d'élaboration.

26. Les chambres à puits étalonnées sont les dosimètres préférés pour l'étalonnage des sources radioactives utilisées en curiethérapie. Cependant, il n'existe pas de lignes directrices harmonisées au niveau international pour l'assurance/le contrôle de la qualité pour toutes les sources utilisées en curiethérapie ainsi que pour les instruments de dosimétrie connexes recommandés. Des efforts sont faits pour établir des normes relatives à la dose absorbée dans l'eau en vue d'une harmonisation avec les codes de bonne pratique concernant la dosimétrie en radiothérapie externe.

27. Des progrès impressionnants ont été réalisés dans la mise au point de techniques de production de radio-isotopes, ce qui a amélioré l'accès à un certain nombre de nouveaux radionucléides, dont le gallium 68, le cuivre 64, le zirconium 89 et le zinc 63, et facilité la mise au point de technologies reposant sur des accélérateurs pour produire à des fins commerciales du technétium 99m, radionucléide qui reste le plus largement utilisé pour le diagnostic. La disponibilité de nouveaux radio-isotopes pour des applications médicales pourrait permettre de résoudre des problèmes cliniques jusqu'à présent insoupçonnés. Ces progrès sont en train de bouleverser le paysage de la médecine nucléaire.

28. Dans de nombreux pays, il est toujours difficile de garantir l'accès à une eau potable ainsi qu'un approvisionnement adéquat en eau douce pour l'assainissement et la production alimentaire et énergétique. De nouveaux outils et de nouvelles approches isotopiques, associés aux progrès innovants de l'analyse, ont contribué ces dernières années au développement important de l'utilisation d'isotopes

de l'environnement pour comprendre, suivre et évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et d'autres ressources naturelles.

29. Des évaluations des ressources en eau complètes et reposant sur une base scientifique sont essentielles à un développement durable. Des instruments laser plus simples, meilleur marché et nécessitant peu de maintenance contribuent au développement d'applications utilisant des isotopes stables. La demande de nouveaux outils isotopiques de datation des eaux souterraines, nécessitant des méthodes analytiques plus sophistiquées pour mesurer les isotopes de gaz rares et les radionucléides à longue période, devrait se maintenir dans l'avenir immédiat.

30. L'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère a un impact progressif sur l'environnement marin. Les radionucléides offrent des outils performants pour comprendre les changements dans le cycle du carbone et leurs effets sur les organismes. Ils peuvent aussi servir à reconstituer les modifications de la chimie de l'eau de mer au cours des temps géologiques afin de comprendre les changements actuels et l'incidence qu'ils peuvent avoir à l'avenir sur les océans.

31. Lorsque l'océan absorbe du CO_2 , l'eau s'acidifie et cela a un impact sur les organismes marins. Les radio-isotopes servent à étudier les changements survenant dans les processus d'organismes marins, tels que la calcification, la biominéralisation et le métabolisme, en réponse à l'augmentation de l'acidité.

32. Des techniques utilisant des isotopes radioactifs et des isotopes stables servent à reconstituer des événements de pollution passés, à déterminer les tendances de la pollution et à évaluer l'efficacité des mesures de lutte contre celle-ci. Elles servent également à étudier les sources terrestres de pollution des nutriments responsables de l'eutrophisation côtière, à différencier les concentrations anthropogènes et naturelles de polluants, à répertorier les sources de pollution dans le cadre d'études criminalistiques de la pollution et à identifier les biotoxines responsables de la prolifération d'algues toxiques.

33. La pollution des eaux côtières par les hydrocarbures est un problème environnemental mondial dû aux rejets d'hydrocarbures pétroliers. On a de plus en plus besoin de méthodes sensibles et fiables pour surveiller la pollution par les hydrocarbures et son impact et mettre au point des méthodes permettant de déterminer l'origine d'une telle pollution à des fins réglementaires. L'analyse des taux d'isotopes stables du carbone dans les hydrocarbures pétroliers est utilisée en combinaison avec des méthodes chimiques pour établir avec plus de précision les caractéristiques spécifiques d'une nappe de pétrole dans le but de déterminer d'où provient ce pétrole dans l'environnement marin.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2015

Rapport principal

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2014, il y avait 438 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité totale de 376,2 GWe¹ (voir tableau A-1). Cela représente une légère augmentation (environ 4,5 GWe) de la capacité totale par rapport à 2013.

2. Parmi les réacteurs en service, environ 81,5 % sont modérés et refroidis par eau ordinaire, 11,2 % modérés et refroidis par eau lourde, 3,4 % refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite, et 3,4 % refroidis par gaz (fig. A-1.). Deux d'entre eux sont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide.

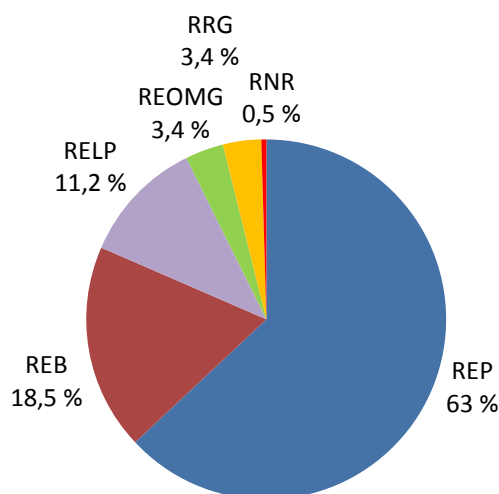


FIG. A-1. Répartition actuelle des types de réacteurs. (REB : réacteur à eau bouillante ; RNR : réacteur à neutrons rapides ; RRG : réacteur refroidi par gaz ; REOMG : réacteur à eau ordinaire modéré au graphite ; RELP : réacteur à eau lourde sous pression ; REP : réacteur à eau sous pression).

3. Au Japon, les 48 tranches de réacteurs qui étaient exploitées auparavant sont restées à l'arrêt en 2014. En novembre 2014, le gouverneur de la Préfecture de Kagoshima a approuvé le redémarrage de Sendai 1 et 2, les deux premiers réacteurs du pays que l'autorité de réglementation nucléaire a déclarés conformes aux nouvelles normes de sûreté imposées à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi survenu en mars 2011. En décembre 2014, l'Autorité japonaise de

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

réglementation nucléaire a approuvé le redémarrage des tranches de réacteur 3 et 4 de la centrale de Takahama.

4. En 2014, cinq nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau : Atucha-2 (692 MWe) en Argentine, Ningde-2 (1 018 MWe), Fuqing-1 (1 000 MWe) et Fangjiashan-1 (1 000 MWe) en Chine, et Rostov-3 (1 011 MWe) en Russie. La construction du réacteur Atucha-2 devait initialement débuter en 1981, mais elle a été retardée. Les travaux n'ont repris qu'en 2009.

5. Il n'y a eu qu'une seule mise à l'arrêt définitive en 2014. L'exploitation commerciale de la centrale à un seul réacteur de Vermont Yankee (États-Unis d'Amérique) a pris fin le 29 décembre 2014 pour des raisons financières.

6. Seuls trois chantiers ont été lancés en 2014 : Belarussian-2 au Bélarus, Barakah-3 aux Émirats arabes unis et CAREM-25, un modèle de REO sous pression de type intégré de faible puissance, en Argentine.

7. Au 31 décembre 2014, 70 réacteurs étaient en construction. Comme les années précédentes, l'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (voir la fig. A-2.), en Chine en particulier. Sur le nombre total de réacteurs en construction, 46 se trouvent en Asie, de même que 32 des 40 nouveaux réacteurs couplés au réseau depuis 2004.

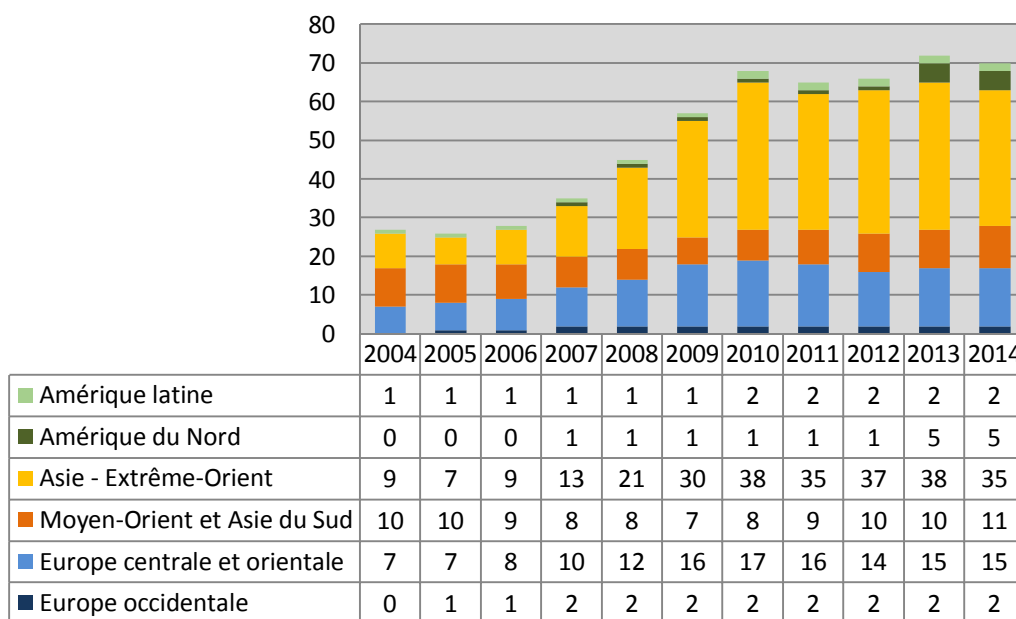


FIG. A-2. Nombre de réacteurs en construction par région.

8. En 2014, plusieurs pays ont accompli des progrès notables vers la mise en place de leur première centrale nucléaire. Aux Émirats arabes unis, l'Autorité fédérale de réglementation nucléaire a approuvé la demande soumise par la Société de l'énergie nucléaire des Émirats arabes unis concernant la construction de deux autres tranches sur le site de Barakah. Les tranches 1, 2 et 3 de ce site sont déjà en construction et devraient être mises en service respectivement en 2017, 2018 et 2020.

9. Le Bélarus a procédé à la première coulée de béton de sa deuxième tranche en avril 2014 et commencé les travaux de construction de surface de la tranche 1. Les deux tranches sont des réacteurs VVER-1200 construits dans le cadre du contrat signé en juillet 2012 avec la société Atomstroyexport de la Fédération de Russie.

10. La Turquie continue à développer l'infrastructure de son programme électronucléaire. En décembre 2014, le Ministère de l'environnement et du développement urbain a approuvé l'évaluation de l'impact environnemental des quatre tranches VVER-1200 en projet pour le site d'Akkuyu. L'organisme de réglementation turc a fait appel en octobre 2014 à un organisme d'appui technique afin que celui-ci l'aide à examiner et évaluer la demande de permis de construire de ce site, laquelle devrait être présentée en 2015. À la suite de la signature en 2013 d'un accord intergouvernemental avec le Japon, la Turquie travaille sur un deuxième projet de centrale nucléaire à Sinop et a lancé, en coopération avec ses partenaires, les études de site et la préparation d'une étude de faisabilité technique.

11. En janvier, le Conseil des ministres polonais a confirmé la décision d'ajouter environ 6 000 MWe de capacité nucléaire au bouquet énergétique, l'exploitation de la première tranche étant prévue en 2024.

12. En 2013, le Viet Nam a achevé les études de faisabilité pour deux sites de centrales nucléaires d'une capacité totale de 4 000 MWe à Ninh Thuan. Le pays a accueilli en novembre 2014 une mission d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) de suivi qui a donné lieu à un retour d'information sur l'évolution des mesures prises pour développer l'infrastructure nucléaire nationale. Le Kenya, le Maroc et le Nigéria ont officiellement demandé des missions INIR pour 2015.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde
(au 31 décembre 2014)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2014		Expérience d'exploitation totale en 2014	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			14,8	6,2	60	3
ALLEMAGNE	9	12 074			91,8	15,8	808	1
ARGENTINE	3	1 627	1	25	5,3	4,1	73	2
ARMÉNIE	1	375			2,3	30,7	40	8
BÉLARUS			2	2 218				
BELGIQUE	7	5 927			32,1	47,5	268	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 245	14,5	2,9	47	3
BULGARIE	2	1 926			15,0	31,8	157	3
CANADA	19	13 500			98,6	16,8	674	6
CHINE	23	19 007	26	25 756	123,8	2,4	181	7
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	23	20 717	5	6 370	149,2	30,4	450	1
ÉMIRATS ARABES UNIS			3	4 035				
ESPAGNE	7	7 121			54,9	20,4	308	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	99	98 639	5	5 633	798,6	19,5	4 012	4
FÉDÉRATION DE RUSSIE	34	24 654	9	7 371	169,1	18,6	1 157	3
FINLANDE	4	2 752	1	1 600	22,6	34,7	143	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	418,0	76,9	1 990	4
HONGRIE	4	1 889			14,8	53,6	118	2
INDE	21	5 308	6	3 907	33,2	3,5	418	6
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			3,7	1,5	3	4
JAPON	48	42 388	2	2 650	0,0	0,0	1 694	4
MEXIQUE	2	1 330			9,3	5,6	45	11
PAKISTAN	3	690	2	630	4,6	4,3	61	8
PAYS-BAS	1	482			3,9	4,0	70	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 904			28,6	35,8	140	10
ROUMANIE	2	1 300			10,8	18,5	25	11
ROYAUME-UNI	16	9 373			57,9	17,2	1 543	7
SLOVAQUIE	4	1 814	2	880	14,4	56,8	152	7
SLOVÉNIE	1	688			6,1	37,3	33	3
SUÈDE	10	9 470			62,3	41,5	422	6
SUISSE	5	3 333			26,5	37,9	199	11
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	83,1	49,4	443	6
Total ^{b, c}	438	376 216		68 450	2 410,4		16 096	10

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

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

6 tranches en service (5 032 MWe) et 2 en construction (2 600 MWe) ;

40,8 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 18,9 % de la production électrique totale.

c) L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) et à Taïwan (Chine) (200 ans et un mois).

13. Plusieurs pays qui ont décidé d'introduire l'électronucléaire sont à des stades avancés de préparation de l'infrastructure. À la suite d'un accord intergouvernemental conclu en 2011 avec la Fédération de Russie sur la coopération en vue de la construction de la centrale nucléaire à deux tranches de Rooppur, le Bangladesh a entamé les travaux de préparation du site en 2013, et la construction devrait débuter en 2016. En octobre 2013, la Jordanie a choisi la société Atomstroyexport de la Fédération de Russie comme fournisseur privilégié et travaille actuellement sur la caractérisation du site d'Amra. Une mission INIR organisée en août 2014 a abouti à la conclusion que la Jordanie avait fait des progrès dans le développement de son infrastructure nucléaire et a recommandé des mesures supplémentaires.

14. Plusieurs pays continuent d'envisager l'introduction de l'électronucléaire. Certains se préparent activement à prendre des décisions en connaissance de cause sur la mise en œuvre potentielle d'un programme électronucléaire et plusieurs pays élaborent leurs stratégies énergétiques pour y inclure une option électronucléaire. À ce stade, l'accent est mis sur l'élaboration de l'infrastructure juridique et réglementaire étendue nécessaire pour appuyer un programme électronucléaire en sus de la mise en valeur des ressources humaines nécessaires.

15. La création de capacités joue toujours un rôle important car elle permet de compter sur du personnel compétent disponible en permanence pour la gestion sûre, sécurisée et durable des programmes électronucléaires ou pour leur abandon. Cette importance a également été soulignée dans le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire (approuvé à la Conférence générale de 2011), qui engage les États Membres ayant des programmes électronucléaires et ceux qui prévoient d'en lancer à renforcer, développer, maintenir et mettre en œuvre leurs programmes de création de capacités. À la Conférence internationale sur la mise en valeur des ressources humaines pour les programmes électronucléaires : renforcement et maintien des capacités, tenue à Vienne en mai 2014, plus de 300 participants venus de 65 États Membres et cinq organisations internationales ont étudié la question du défi mondial que représente la création des capacités et souligné qu'il importait de pouvoir compter à long terme sur des ressources humaines qualifiées.

16. Les articles contrefaits, frauduleux et suspects (ACFS) suscitent une inquiétude croissante chez les organismes exploitants et les organismes de réglementation, et on détecte actuellement des cas d'ACFS accompagnés de certificats de qualité falsifiés. Il est arrivé que l'utilisation d'ACFS dans des centrales nucléaires en exploitation ou en construction ait entraîné de graves conséquences sur le plan économique, voire des arrêts temporaires de centrales. Les organismes exploitants prennent un nombre toujours plus grand de mesures de prévention, telles que le renforcement de la sensibilisation et de la formation, l'approfondissement des spécifications d'achat et des inspections, et la réduction des intermédiaires. De leur côté, les organismes de réglementation demandent de plus en plus souvent des rapports sur les ACFS, notamment concernant ceux qui ont été découverts avant l'installation dans les centrales. Afin d'aider à résoudre ce problème, l'Agence a tenu en septembre 2014 une réunion technique sur les activités d'achat et les ACFS. Elle a aussi commencé à élaborer des principes directeurs relatifs à l'ingénierie des achats. Ceux-ci comprennent des recommandations sur les moyens d'éviter l'utilisation d'ACFS.

17. Sur les 438 réacteurs nucléaires de puissance en service, 225 sont exploités depuis 30 ans ou plus (voir la fig. A-3.). Certains modèles de gestion de la durée de vie des centrales prévoient une exploitation à long terme au-delà des périodes prévues dans la licence. Le modèle suivi par les États-Unis et quelques autres États Membres est fondé sur le concept de la demande de renouvellement de licence. Selon ce modèle, l'autorité compétente délivre une licence d'exploitation pour une durée maximale de 40 ans qui peut être renouvelée pour une nouvelle période de 20 ans au maximum, à chaque fois. À la fin de 2014, pour 73 des 99 réacteurs en service aux États-Unis la licence avait été renouvelée pour une durée de 20 ans. Selon un autre modèle principalement utilisé en Europe, l'exploitant doit exécuter un processus d'examen périodique de la sûreté à intervalles réguliers, généralement tous les dix ans, afin de vérifier que le réacteur sous licence satisfait toujours aux conditions de la licence et aux normes environnementales. Couvrant tous les aspects importants de la sûreté, cet examen périodique vise à déceler et à combler les failles de sûreté, conformément aux prescriptions en vigueur en matière de licence. Les principaux défis posés par l'exploitation à long terme sont l'élaboration et la mise en œuvre de programmes de gestion du vieillissement qui permettent d'évaluer l'intégrité des structures et systèmes essentiels, ainsi que la durée de vie restante des composants fondamentaux. L'Agence a élaboré un guide programmatique et de nombreux autres guides relatifs à des composants spécifiques traitant de la gestion du vieillissement.

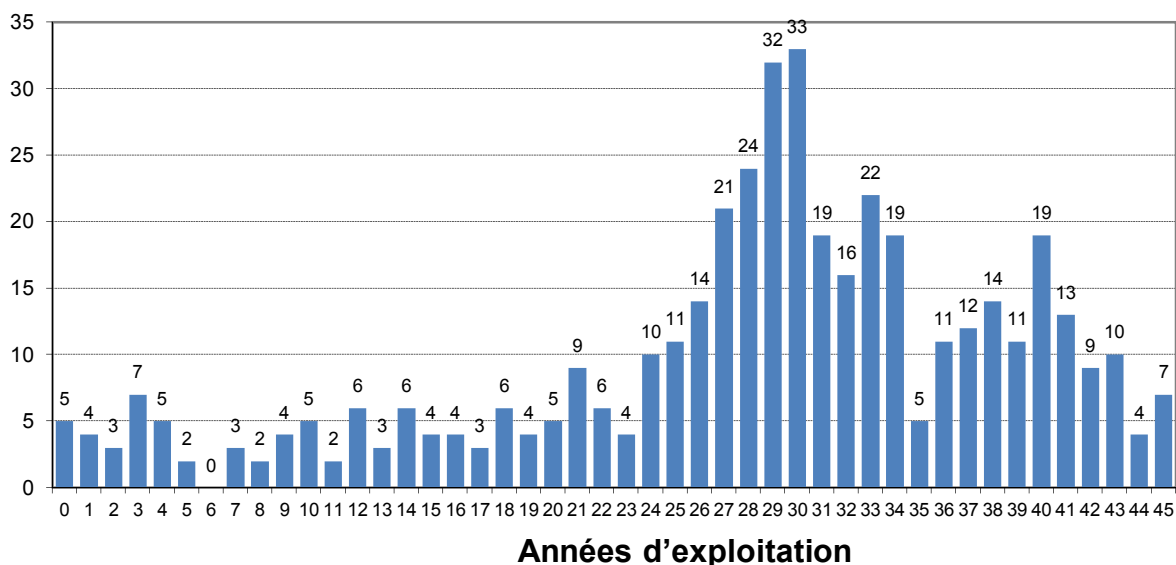


FIG. A-3. Répartition des réacteurs de puissance en exploitation par ancienneté au 31 décembre 2014. (Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'Agence <http://www.iaea.org/pris>)

18. Les tranches Doel-3 et Tihange-2 en Belgique ont été mises à l'arrêt en 2012 après que des défauts ont été décelés dans des cuves sous pression des réacteurs (RPV). Après une enquête approfondie et une fois les prescriptions réglementaires satisfaites, elles ont été redémarrées en mai 2013. Toutefois, de nouveaux essais métallurgiques ont amené la compagnie d'électricité Electrabel à les remettre à l'arrêt en mars 2014 en raison d'incertitudes quant à la résistance mécanique aux neutrons de l'acier dont sont constitués les RPV. Aux fins de la mise en commun des enseignements tirés sur l'intégrité structurale, un cours de formation de l'Agence portant sur l'évaluation des mécanismes de dégradation de composants du circuit primaire dans les centrales nucléaires a été organisé en septembre 2014, à Madrid (Espagne), par le Centre de recherche sur l'énergie, l'environnement et les technologies associées (CIEMAT).

19. Les réévaluations de la sûreté à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi ont entraîné dans de nombreux cas des dépenses d'équipement supplémentaires pour que les nouvelles prescriptions réglementaires soient respectées. Cela aura une incidence sur le coût de la production d'électricité d'origine nucléaire et pourrait avoir des conséquences sur la viabilité économique de l'exploitation à long terme des centrales. Afin d'évaluer les incidences économiques, l'Agence a commencé à élaborer un nouveau guide technique sur les méthodes d'évaluation économique de l'exploitation à long terme des centrales nucléaires.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

20. Les prévisions 2014 de l'Agence indiquent que la capacité électronucléaire devrait, d'ici à 2030, passer de 372 à 401 GWe selon la projection basse et à 699 GWe selon la projection haute. Ces prévisions indiquent une croissance de 8 % selon la projection basse et de 88 % selon la haute. Les projections de 2014 sont inférieures d'environ 23 GWe dans l'hypothèse haute et de 34 GWe dans l'hypothèse basse² à celles de 2013. Les facteurs qui contribuent à cette baisse sont notamment les arrêts survenus plus tôt que prévu, les constructions retardées, et les surcoûts entraînés par la mise en

² Les projections portent autant sur la capacité disponible (qui alimente déjà le réseau électrique) que sur la capacité nominale installée (disponible, mais n'alimentant pas le réseau).

œuvre de modifications supplémentaires liées à la sûreté. Quoi qu'il en soit, l'électronucléaire continue de susciter un intérêt marqué dans certaines régions, en particulier dans les pays dont les économies et les besoins énergétiques se développent. La poursuite de cette croissance semble indiquer que les bases justifiant de continuer de recourir à l'électronucléaire n'ont pas changé.

21. Ces projections ont été établies en regroupant les évaluations pays par pays. Les experts prennent en compte tous les réacteurs en exploitation, les prolongations de licence éventuelles, les mises à l'arrêt prévues et les projets de construction plausibles prévus au cours des quelques décennies à venir dans les États Membres de l'Agence. Les projections sont basées sur l'évaluation de la plausibilité de chaque projet compte tenu des hypothèses générales haute et basse. Elles n'ont pas vocation à prédire l'avenir avec certitude et ne reflètent pas toutes les hypothèses possibles entre la plus basse et la plus haute.

22. À court terme, les faibles prix du gaz naturel et les capacités croissantes dans le domaine des énergies renouvelables subventionnées auront vraisemblablement des retombées sur les perspectives de croissance du nucléaire dans certaines régions du monde développé. La faiblesse des prix du gaz s'explique en partie par une baisse de la demande engendrée par les conditions macroéconomiques, ainsi que par les progrès technologiques. Qui plus est, la crise financière actuelle continue d'entraver les projets à forte intensité de capital, notamment les projets électronucléaires. Les experts estiment que les difficultés susmentionnées, outre l'accident de Fukushima Daiichi, pourraient retarder provisoirement la mise en place de certaines centrales. Les facteurs sous-jacents que sont la croissance de la population et de la demande d'électricité dans les pays en développement, la reconnaissance du rôle que joue l'énergie nucléaire en évitant les émissions de CO₂, les questions liées à la sécurité des approvisionnements énergétiques et l'instabilité des prix des combustibles fossiles laissent supposer que l'énergie nucléaire continuera à long terme d'occuper une place importante dans les bouquets énergétiques.

Les émissions de CO₂ que permet déjà d'éviter l'électronucléaire³

Cela fait plus de 50 ans que l'énergie nucléaire est utilisée pour la production d'électricité dans le monde. Cette source d'énergie présente l'avantage supplémentaire d'éviter les émissions de CO₂. La figure A-4 illustre l'évolution dans le temps des émissions de CO₂ produites par le secteur de l'électricité dans son ensemble et de celles qui sont évitées grâce à l'énergie hydroélectrique, à l'énergie nucléaire et aux sources d'énergie renouvelable. La courbe du secteur énergétique, en bas du graphique, correspond aux émissions de CO₂ réelles produites au cours des 40 années passées. Les courbes tracées au-dessus représentent les émissions évitées grâce au nucléaire, à l'hydroélectricité et aux énergies renouvelables. En 2011, ces sources d'énergie ont permis d'économiser près de 6 gigatonnes (Gt) d'émissions de CO₂, soit un tiers des émissions totales qui auraient été produites sinon. La part de cette économie d'émissions de CO₂ réalisée grâce à l'énergie nucléaire est estimée à un peu plus d'un tiers (2,1 Gt).

Ces estimations d'émissions évitées peuvent varier en fonction des sources d'énergies qui auraient été hypothétiquement utilisées en remplacement. On est parti du principe que l'électricité aurait été produite en augmentant la production de charbon, de pétrole et de gaz naturel, proportionnellement aux parts qu'ils représentent dans les bouquets énergétiques. Il s'agit d'une approche prudente car il est plus probable que le charbon aurait remplacé l'électricité d'origine nucléaire en raison de son abondance dans les pays.

³Des informations supplémentaires sur l'électronucléaire et le changement climatique sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/publications.html>

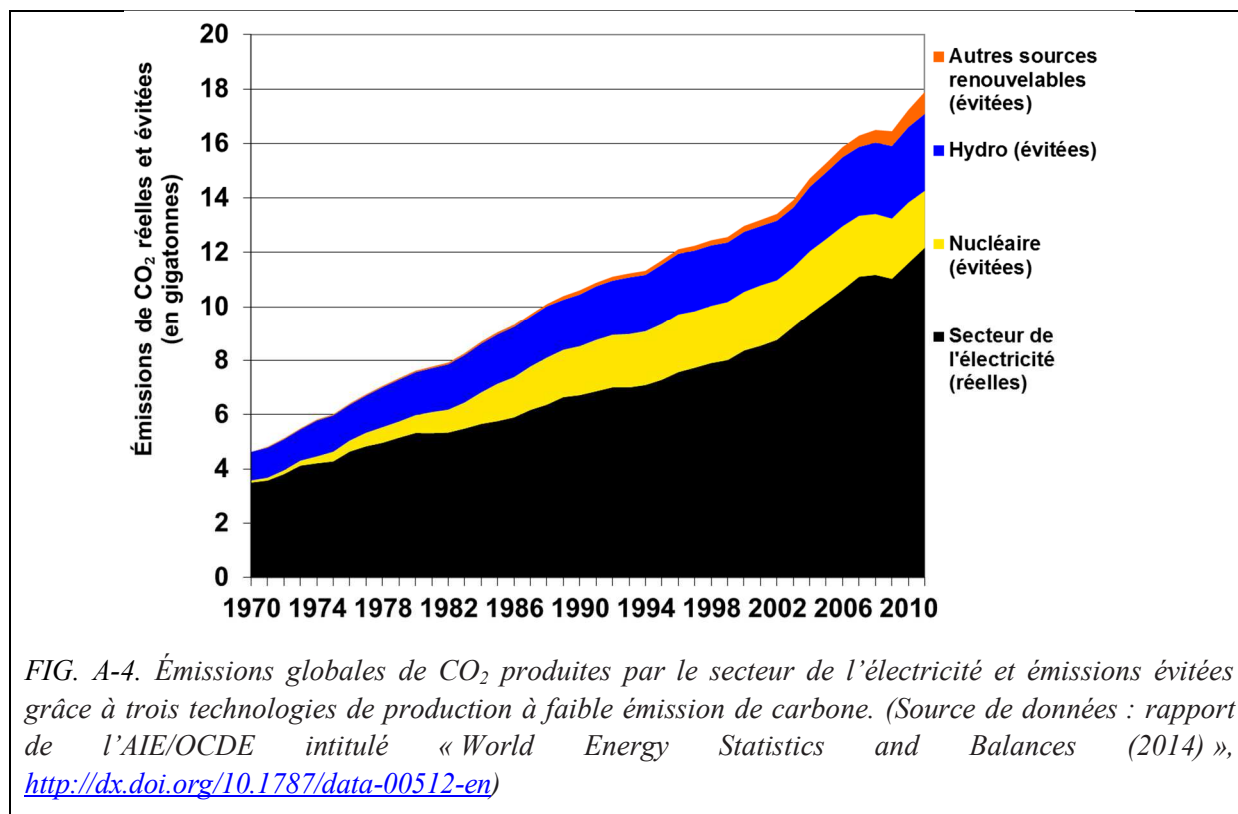


FIG. A-4. Émissions globales de CO₂ produites par le secteur de l'électricité et émissions évitées grâce à trois technologies de production à faible émission de carbone. (Source de données : rapport de l'AIE/OCDE intitulé « World Energy Statistics and Balances (2014) », <http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>)

23. L'Agence internationale de l'énergie de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AIE/OCDE) publie aussi des projections de la croissance électronucléaire mondiale. Le rapport de l'AIE/OCDE *Perspectives énergétiques mondiales 2014* prévoit, dans le cadre de son « scénario nouvelles politiques », que la capacité de production nucléaire mondiale atteindra 543 GWe en 2030. Ces projections restent pour l'essentiel inchangées depuis l'année précédente et elles correspondent quasiment à la moyenne des projections de l'AIEA. La figure A-5 compare les projections 2014 de l'AIEA, les scénarios 2014 de l'AIE/OCDE⁴ et les projections 2013 de la WNA. Les scénarios de projection haute des trois organismes pour 2020 et 2030 donnent des résultats similaires, alors que les scénarios de projection basse pour 2030 comportent des écarts relativement importants.

⁴ Les projections de l'AIE/OCDE ont été établies sur la base de valeurs en GWe bruts

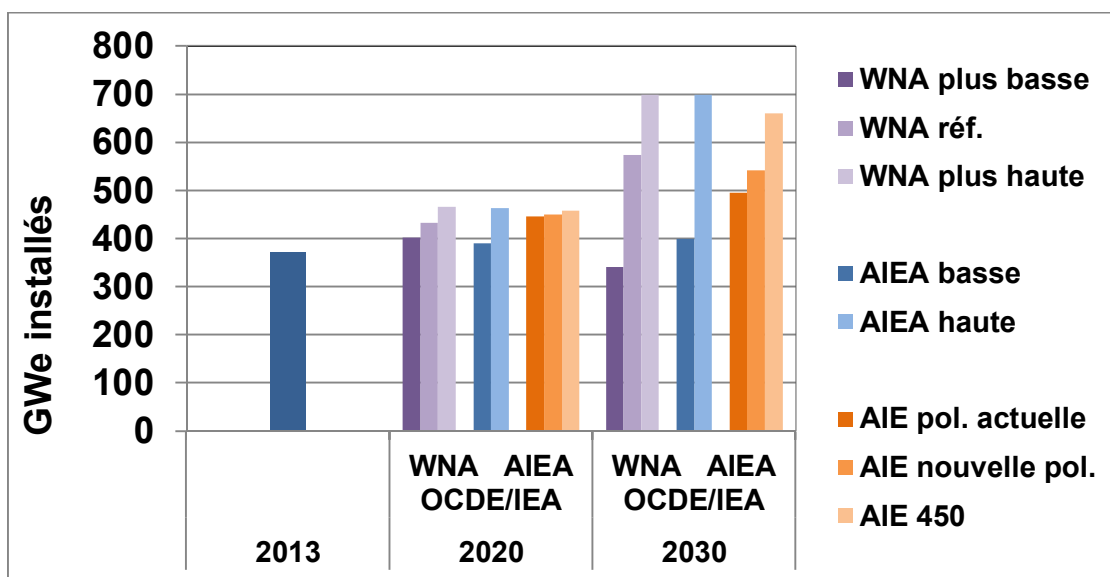


FIG. A-5. Comparaison des projections de l'électronucléaire effectuées par l'AIEA, des projections 2014 (établies d'après des valeurs en GWe bruts) de l'AIE et des projections 2013 de la WNA.

A.3. Cycle du combustible

A.3.1. Ressources et production d'uranium

24. Les prix au comptant de l'uranium ont continué de chuter, tombant de 90 \$/kg d'U au début de l'année à 70 \$/kg d'U en milieu d'année, soit leur niveau le plus bas depuis dix ans. Toutefois, en août 2014, ils ont commencé à remonter et ont atteint 115 \$/kg d'U en novembre 2014, avant de reculer légèrement à la fin de l'année. Même si les dépenses de prospection de l'uranium et de mise en valeur de cette ressource ont été considérables, un grand nombre de projets ont été retardés ou devraient l'être.

25. Les ressources non classiques d'uranium augmentent encore cette base de ressources. La quantité d'uranium potentiellement récupérable sous forme de sous-produits est estimée actuellement à environ 8 Mt d'U. En 2014, PhosEnergy a annoncé que le fonctionnement sur le site en régime continu de son usine de démonstration de son procédé PhosEnergy démontre que des taux élevés de récupération de l'uranium (> 92 %) ont été systématiquement enregistrés au cours du fonctionnement en régime permanent. Le projet brésilien phosphate/uranium de Santa Quitéria est en cours d'élaboration, et la production devrait débuter en 2016.

26. L'eau de mer a fait l'objet d'études approfondies comme source d'uranium non classique. Quelque 4,5 milliards de tonnes d'uranium représentant d'énormes ressources énergétiques sont dissoutes dans les océans à travers le monde, à des concentrations très faibles (environ 3,3 parties par milliard). Des recherches sur cette ressource potentielle sont toujours en cours. Des progrès récents dans la recherche-développement (R-D) au Ministère de l'énergie des États-Unis (DOE) ont permis de réduire d'environ 50 % les coûts de récupération, qui sont passés de 1 230 \$/kg d'U à 630 \$/kg d'U.

27. Les ressources mondiales de thorium sont estimées à environ six à sept millions de tonnes. Bien que le thorium ait été utilisé comme combustible dans le cadre de démonstrations, il reste encore beaucoup à faire avant de pouvoir le considérer comme pouvant être commercialisé. La production devrait démarrer à court terme dans quelques projets relatifs à des éléments de terres rares qui

pourraient produire du thorium comme sous-produit et des résidus en contenant, notamment à Kvanefjeld, au Groenland (Royaume du Danemark). Thor Energy a poursuivi son programme d'essais du combustible thorium-mélange d'oxydes (MOX) à Halden (Norvège).

28. La WNA estime que la production d'uranium était de 58 394 t d'U en 2012 et de 59 370 t d'U en 2013. En 2014, la capacité de production devrait augmenter d'environ 7 530 t d'U en raison de l'ouverture de la mine de Cigar Lake (Canada) et de la mine de Four Mile (Australie), du lancement de la production d'uranium en tant que sous-produit de la production de nickel à Talvivaara (Finlande) et de la mise en service de deux mines de lixiviation in situ aux États-Unis d'Amérique. Toutefois, l'augmentation sera en réalité inférieure en raison de l'interruption du projet de Talvivaara et d'un arrêt temporaire des opérations d'extraction à Cigar Lake pour des raisons techniques.

29. La proportion de la production par lixiviation in situ, qui reste la méthode prédominante, devrait continuer d'augmenter à moyen terme. La WNA indique qu'en 2013, environ 46 % de la production mondiale provenaient de l'extraction par lixiviation in situ, principalement du Kazakhstan (38 % de la production mondiale totale en 2013). La faiblesse du marché a provoqué un report de la mise en valeur de nouveaux gisements au Kazakhstan et, en 2014, le niveau de la production sera identique à celui de 2013 (22 500 t d'U).

30. La mine de Cigar Lake (Canada) a commencé ses activités en mars. Cependant, en raison de problèmes techniques persistants, les opérations d'extraction ont été temporairement suspendues en juillet 2014. La capacité annuelle de production, qui est actuellement de 5 000 t d'U/an, devrait dépasser 8 000 t d'U/an au début de 2018. Le premier concentré d'uranium à partir de minerai extrait de la mine de Cigar Lake a été produit à l'usine de McClean Lake en octobre 2014 (fig. A-6.). L'usine cherche actuellement à obtenir l'autorisation de porter la capacité autorisée à 9 200 t d'U. La demande en vue de construire et d'exploiter une nouvelle mine d'uranium souterraine dans le cadre du projet d'extraction de l'uranium Millenium dans le bassin d'Athabasca (nord de la Saskatchewan) a été officiellement retirée en raison de la faiblesse du marché mondial.



FIG. A-6. Au Canada, l'usine de McClean Lake a produit le premier concentré d'uranium à partir de minerai extrait à Cigar Lake. (Photo : Cameco Corporation)

31. En Namibie, en raison des conditions du marché, toutes les mines et usines produisant actuellement réduisent leur production et, hormis Husab, tous les autres projets de développement minier ont été interrompus en attendant que ces conditions s'améliorent. La construction se poursuit à la mine d'Husab, et celle-ci devrait entrer en service d'ici à 2015 et atteindre sa pleine capacité (5 770 t d'U) d'ici à 2017. Les opérations de traitement ont repris à Rössing après une brève interruption en raison d'une défaillance de la cuve de lixiviation. La Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) a acquis 25 % de la mine d'uranium de Langer Heinrich en Namibie.

32. Une nouvelle mine au Niger, Imouaren, ayant une capacité de 5 000 t d'U et dont l'exploitation devait commencer en 2015, ne sera probablement pas exploitée avant 2017 en raison des conditions du

marché. Le projet Madaouela pourrait démarrer dès 2017 avec une capacité de production de 1 040 t/an provenant de 39 600 t d'U en ressources et de 11 260 t d'U supplémentaires extraites du gisement de Miriam, qui peut être exploité à ciel ouvert.

33. En mai 2014, la faiblesse des prix de l'uranium a entraîné un arrêt de la production à la mine d'uranium de Kayelekera, exploitée par Paladin au Malawi. En attendant que les prix se redressent, il est possible de redémarrer la production dans un délai d'environ neuf mois. Le gisement d'uranium de Letlhakane au Botswana fait actuellement l'objet d'une étude de faisabilité détaillée qui devrait être achevée en 2015, et la production devrait démarrer en 2017. Une étude exploratoire a été achevée pour la mine d'uranium de Reguibat en République islamique de Mauritanie.

34. En Australie, Quasar Resources a commencé les opérations d'extraction par lixiviation dans les gisements de Four Mile East. L'autorité chargée de la protection de l'environnement en Australie occidentale a recommandé l'approbation par l'État du projet conjoint Cameco–Mitsubishi à Kintyre. Une décision relative à la réalisation de ce projet sera prise en fonction des conditions du marché futures. Les opérations de traitement du minerai stocké ont redémarré en juin 2014 à la mine Ranger après une rupture de la cuve de lixiviation à la fin de 2013. La production de la mine Ranger-3 Deeps devrait débuter en 2015. Olympic Dam prévoit un essai de lixiviation en tas dans des gisements de cuivre et d'uranium, laquelle serait une solution de rechange peu coûteuse par rapport au plan d'expansion prévu initialement, qui a été abandonné en 2012.

35. Aux États-Unis, la mine de Lost Creek au Wyoming a démarré la production en 2014.

36. Le Brésil prévoit de commencer une nouvelle opération d'extraction à ciel ouvert dans les gisements d'Engenho en 2015. Cette mine devrait produire environ 286 t d'U par an. Le minerai sera traité dans l'usine Caetité existante, pour laquelle il existe aussi un projet d'agrandissement dans le but de produire un total de 670 t d'U/an à partir de 2015.

37. En Turquie, des études de pré-faisabilité ont été achevées pour le projet d'extraction par lixiviation in situ de Temrezli et les autorisations nécessaires ont été accordées pour la mise en valeur. La production devrait démarrer en 2016 (385 t d'U par an). En avril 2014, un permis général d'exploitation minière a été délivré pour la mine d'uranium de Retortillo (Espagne). Cette mine pourrait devenir une installation du cycle du combustible nucléaire si la procédure d'autorisation engagée établissait qu'elle était conforme à la réglementation nucléaire dans ce domaine. La Roumanie prévoit d'ouvrir une nouvelle mine d'uranium dans l'est du pays car les ressources de la mine actuellement exploitée à Crucea sont épuisées.

38. La Jordanie prévoit d'investir 140 millions de dollars dans un projet d'extraction de l'uranium après l'annonce de la réévaluation des ressources dans le centre du pays. Le projet aura une capacité initiale de 300 à 400 t d'U/an, pouvant atteindre 1 500 t/an, et devrait être opérationnel dans 4 à 5 ans.

39. Au Groenland (Royaume du Danemark), une étude de faisabilité est actuellement réalisée pour évaluer la production d'uranium, d'éléments de terres rares et de zinc à Kvanefjeld. Si le projet va de l'avant comme prévu, la production devrait atteindre 425 t d'U/an en tant que sous-produit, à partir de 2016.

40. La République islamique d'Iran a annoncé que la mine d'uranium de Saghand est au dernier stade de sa mise en service. L'uranium sera extrait dans des mines à ciel ouvert ou souterraines et le minerai extrait sera traité à l'usine située à proximité d'Ardakan.

41. La WNA estime qu'en 2014, la production d'uranium couvrait environ 92 % de la consommation estimée d'uranium dans les réacteurs (70 015 t d'U). Ce pourcentage est beaucoup plus élevé que celui des années passées ; cela est principalement dû à la fin d'une source d'approvisionnement secondaire de premier plan provenant des stocks militaires, généralement connue

sous le nom de « accord UHE » ou de « programme des mégatonnes aux mégawatts », qui a pris fin en 2013. Les 8 % restants étaient couverts par quatre sources secondaires : les stocks d'uranium enrichi, l'uranium retraité provenant de combustible usé, le combustible à mélange d'oxydes (MOX) dans lequel l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium provenant de combustible usé retraité, et le réenrichissement de résidus d'uranium appauvri. Au rythme de consommation estimée de 2013, la durée de vie de 5,9 millions de t d'U, qui représentent les ressources totales économiquement viables aux prix actuels du marché, serait de 84 ans.

A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible

42. Six pays (Canada, Chine, États-Unis, Fédération de Russie, France et Royaume-Uni) exploitent à l'échelle commerciale des usines de conversion d'octoxyde de triuranium (U_3O_8) en hexafluorure d'uranium (UF_6), et de petites installations de conversion sont en service en Argentine, au Brésil, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran. Un procédé de volatilisation des fluorures par voie sèche est utilisé aux États-Unis, mais toutes les autres installations de conversion utilisent un procédé par voie humide. La capacité annuelle mondiale de conversion est restée aux alentours de 76 000 t d'U sous forme d' UF_6 . La demande totale de services de conversion (en supposant une teneur de rejet⁵ de 0,25 % d'uranium 235) est actuellement de l'ordre de 60 000 à 64 000 tonnes par an.

43. La société française AREVA remplace actuellement la capacité de conversion d'uranium existante de COMURHEX I, dont la fermeture est prévue en 2015, par le nouveau projet COMHUREX II avec des installations à Malvézi et à Pierrelatte. Pour moderniser ses capacités de conversion, la Société de combustible TVEL de la Fédération de Russie prévoit d'entreprendre la construction d'un centre au Complexe chimique de Sibérie en 2015, la mise en service de la première étape étant prévue en 2018 et celle de la deuxième étape en 2020.

44. La capacité mondiale totale d'enrichissement est actuellement d'environ 65 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande annuelle totale d'environ 49 millions d'UTS. Des services d'enrichissement commercial sont fournis par cinq sociétés : la CNNC en Chine, AREVA en France, la Société nationale d'énergie atomique «Rosatom» dans la Fédération de Russie, l'USEC aux États-Unis et URENCO en Europe et aux États-Unis. Il y a aussi de petites installations d'enrichissement en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran. L'Argentine reconstitue ses capacités d'enrichissement par diffusion gazeuse à Pilcaniyeu.

45. La deuxième phase de l'usine d'enrichissement d'uranium d'URENCO USA au Mexique est devenue pleinement opérationnelle en 2014, avec une capacité de 3,7 millions d'UTS ; elle s'ajoute à la première phase des opérations qui a débuté en juin 2010 et atteint sa pleine capacité de 1,6 million d'UTS en 2012. La construction de la phase III a déjà commencé ; une fois celle-ci achevée d'ici à 2022, la capacité totale de l'usine sera portée à environ 5,7 millions d'UTS.

46. URENCO USA est la seule usine d'enrichissement d'uranium en exploitation dans le pays. Trois usines d'enrichissement supplémentaires sont prévues. AREVA prévoit de construire une usine de centrifugation de 3,3 millions d'UTS à Eagle Rock dans l'Idaho. Global Laser Enrichment prévoit de construire une usine d'enrichissement par laser à Wilmington, en Caroline du Nord. Les deux

⁵ La teneur de rejet, c'est-à-dire la concentration d'uranium 235 dans la fraction appauvrie, détermine indirectement le volume de travail requis sur une quantité d'uranium donnée afin d'obtenir une teneur donnée dans le produit. Une augmentation de la teneur de rejet associée à une quantité déterminée et une teneur déterminée de l'uranium enrichi produit se traduit par une baisse du volume d'enrichissement requis mais accroît les besoins en uranium naturel et en conversion, et vice-versa. La teneur de rejet peut varier considérablement et modifiera la demande de services d'enrichissement.

usines devraient démarrer leurs opérations avant 2020. L'Installation américaine de centrifugation (ACP) de l'USEC, dont les opérations ont été mises en veilleuse en 2009, lancera un nouveau programme de R-D, l'American Centrifuge Technology Demonstration and Operations Program, qui s'achèvera fin 2015. Le but recherché est de maintenir la technologie de l'American Centrifuge Project et de remédier à certains problèmes techniques qui sont apparus en 2014 avec les centrifugeuses ACP.

47. L'usine d'enrichissement de Resende, exploitée par Indústrias Nucleares do Brasilles (INB), fournira 80 % de l'uranium enrichi nécessaire en 2015 pour le rechargement en combustible de la centrale nucléaire Angra-1. INB prévoit de porter progressivement ce pourcentage à 100 %. Une étude sur la réponse aux besoins d'enrichissement pour tous les réacteurs nucléaires brésiliens est en cours.

48. La déconversion⁶ d' UF_6 appauvri en oxyde d'uranium (UF_4) est entreprise en vue de l'entreposage à long terme de l'uranium appauvri sous une forme plus stable. La capacité mondiale actuelle de déconversion est restée à environ 60 000 t d' UF_6 /an en 2014. Actuellement, les principales installations en exploitation sont l'usine d'AREVA du Tricastin (France), deux usines d'Uranium Disposition Services à Portsmouth et Paducah (États-Unis), et l'usine de déconversion W-ECP à l'Usine électrochimique (ECP) de Zelenogorsk en Sibérie (Fédération de Russie). Aux États-Unis, une usine au Nouveau Mexique exploitée par International Isotopes est en construction. URENCO ChemPlants (Royaume Uni) a obtenu un agrément (réglementation et planification) pour une installation de gestion des résidus en 2010 et son démarrage est prévu en 2016. L'installation traitera le stock de sous-produits d'uranium appauvri d'URENCO en Europe et elle comprendra une usine de déconversion de l' UF_6 et un certain nombre d'installations d'entreposage, de maintenance et de traitement des résidus.

49. La demande annuelle actuelle de services de fabrication de combustible pour réacteurs à eau ordinaire (REO) s'est maintenue aux alentours de 7 000 t d'uranium enrichi dans les assemblages combustibles, mais devrait atteindre environ 8 000 t d'U par an d'ici à 2015. Pour les réacteurs à eau lourde sous pression (REL P), les besoins étaient de 3 000 t d'U/an. Il existe actuellement plusieurs fournisseurs en concurrence pour la plupart des types de combustibles. La capacité mondiale de fabrication de combustible s'est maintenue à environ 13 500 t d'U par an (uranium enrichi) pour le combustible des réacteurs à eau ordinaire (REO) et à environ 4 000 t d'U par an (uranium naturel) pour le combustible des réacteurs à eau lourde sous pression (REL P). Dans le cas du combustible à l'uranium naturel destiné à ces réacteurs, l'uranium est purifié et converti en dioxyde d'uranium (UO_2) en Argentine, au Canada, en Chine, en Inde et en Roumanie.

50. Après avoir obtenu l'agrément des autorités compétentes, la tranche de Tianwan 1 en Chine, qui est un réacteur de puissance refroidi et modéré par eau (VVER), a commencé à utiliser le nouveau combustible TVS-2M de la Société de combustible TVEL, ce qui permet une utilisation élargie dans le cœur pendant 18 mois. Ce type de combustible est déjà utilisé dans les centrales nucléaires de Balakovo et de Rostov, en Fédération de Russie. La tranche Tianwan 2 doit être aussi convertie pour utiliser ce combustible. Le combustible TVS-2M qui sera utilisé dans les tranches Tianwan 3 et 4 toujours en construction sera fabriqué dans l'usine de combustible d'Yibin en Chine.

51. Des capteurs thermo-acoustiques permettant de détecter les neutrons, placés à l'intérieur des assemblages de barres de combustible sont actuellement mis au point par Westinghouse aux États-Unis pour contrôler la puissance du cœur et la répartition de la température. Ces capteurs peuvent aider les opérateurs de centrale à contrôler le cœur avec beaucoup plus de précision, en

⁶ Pour fabriquer du combustible à l'uranium enrichi, il faut reconvertir l' UF_6 en poudre d' UO_2 . C'est la première étape de la fabrication de combustible enrichi. Elle est appelée reconversion ou déconversion.

permettant une utilisation plus efficace du combustible, et peuvent aussi contrôler les défauts et les problèmes de sûreté dans les barres de combustible. Le prototype de ce dispositif sera testé en 2015, et la commercialisation devrait intervenir d'ici à 2019.

52. De nouvelles techniques de fabrication de composants du combustible nucléaire à partir de carbure de silicium ont été mises au point au Japon par Toshiba et IBIDEN en vue de développer un combustible résistant aux accidents, entre autres, pour remplacer les gaines en zircaloy dans les réacteurs à eau ordinaire. Un prototype de revêtement des assemblages combustibles a été mis au point, et les essais dans un réacteur de recherche débuteront en 2016.

53. Les opérations de recyclage d'uranium retraité et de combustible MOX offrent une source d'approvisionnement secondaire en combustible nucléaire. Actuellement, environ 100 t d'uranium retraité sont produites par an pour AREVA par Elektrostal (Fédération de Russie). Une chaîne de production de l'usine d'AREVA à Romans (France) convertit annuellement environ 80 tonnes de métal lourd (ML) d'uranium retraité en combustible destiné aux REO en France. La capacité mondiale de fabrication de combustible MOX est actuellement d'environ 250 t de ML, la principale installation étant située en France et quelques installations plus petites en Fédération de Russie, en Inde et au Japon.

54. L'Inde et la Fédération de Russie fabriquent du combustible MOX destiné aux réacteurs à neutrons rapides. Une installation de fabrication de combustible MOX destiné au réacteur à neutrons rapides BN-800 est en construction à Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26) en Fédération de Russie, où se trouvent aussi des installations pilotes à Dimitrovgrad, à l'Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires (NIIAR), et à Ozersk, à la centrale de Mayak. L'usine de fabrication de combustible MOX à NIIAR a été récemment modernisée et produit du combustible MOX obtenu par vibrocompactage. Le premier lot de 56 assemblages combustibles MOX a été produit pour le réacteur à neutrons rapides de Beloyarsk 4 BN-800, qui a divergé cette année. L'Institut de recherche et de conception scientifiques pour la technique d'assemblage Atomstroy (NIKIMT) a élaboré et fabriqué un système de soudage à distance pour la production d'assemblages combustibles MOX. Ce nouveau système sera utilisé dans l'installation de fabrication de combustible MOX à Zheleznogorsk.

55. La construction d'une usine pilote a démarré pour la production de combustible destiné au réacteur à neutrons rapides BREST-300, qui sera construit dans le SCC en Fédération de Russie. La mise à l'essai de l'assemblage combustible TVS-5 avec du combustible à mélange de nitrures uranium et plutonium a été aussi achevée (fig. A-7.). La construction du réacteur BREST-300 devrait démarrer en 2016 et être achevée en 2020. Le réacteur BREST-300 est un système de réacteur refroidi au plomb mis au point par l'Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (NIKIET).



FIG. A-7. Assemblage combustible TVS-5, le prototype de combustible pour le réacteur avancé BREST-300. (Photo : SCC)

56. Aux États-Unis, le permis de construire pour l'installation de fabrication de combustible MOX, en partie construite, sur le site de Savannah River en Caroline du Sud a été prolongé pour dix ans et le Congrès des États-Unis a approuvé le financement nécessaire à la poursuite des travaux.

Assurance de l'approvisionnement

57. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA au Kazakhstan. Depuis lors, le Secrétariat de l'Agence a travaillé à la mise au point des dispositions financières, juridiques et techniques en vue de la création de cette banque. Il a fallu notamment effectuer une évaluation technique globale de l'installation qui est proposée pour abriter la banque d'UFE de l'AIEA. En 2014, l'impact programmatique de la sûreté sismique sur le projet d'ensemble de la banque d'UFE de l'AIEA a été évalué pour déterminer si la faille géologique située tout près du site proposé pour la banque d'UFE de l'AIEA était susceptible de nuire à la sûreté de celle-ci. Cette « évaluation des risques programmatiques », qui a fait l'objet d'un examen indépendant par une société internationale de conseil en génie sismique, a permis d'établir que la sûreté sismique de la banque d'UFE de l'AIEA pouvait être assurée par des mesures d'ingénierie appropriées, même dans le cas du scénario d'évènement sismique d'une magnitude extrême envisagé lors de l'évaluation. Sur la base des résultats de cette évaluation des risques programmatiques, l'Agence et le Kazakhstan ont conclu avec confiance que la banque d'UFE de l'AIEA pouvait être créée sur le site de l'usine métallurgique d'Ulba. Une réserve d'UFE à Angarsk, établie à la suite de l'accord conclu en février 2011 entre le gouvernement de la Fédération de Russie et l'Agence, a continué d'être exploitée⁷.

A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible nucléaire

58. Deux stratégies différentes sont utilisées pour la gestion du combustible usé des réacteurs de puissance. Soit le combustible usé est entreposé et retraité ultérieurement pour extraire des matières utilisables (uranium et plutonium) destinées à la fabrication de nouveau combustible, soit il est entreposé en attendant son évacuation dans un dépôt géologique profond. Le recyclage par retraitement permet de réduire la quantité (le volume) de DHA devant être définitivement stockés à terme et d'optimiser l'utilisation des matières fissiles aux fins de la production énergétique. Actuellement, des pays comme la Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde et le Royaume-Uni retraitent le combustible usé, tandis que d'autres comme la Finlande et la Suède ont opté pour le stockage définitif du combustible usé dans une communauté qui a accepté d'accueillir une installation de stockage définitif. La plupart des pays n'ont pas encore décidé de la stratégie à adopter et entreposent actuellement le combustible usé et suivent l'évolution associée de ces deux stratégies.

59. En vertu de la directive 2011/70/Euratom du Conseil de l'Union européenne (UE), les États Membres de l'UE ont l'obligation juridique d'établir et de maintenir une politique de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. Cette directive indique les règles devant être suivies par tous les États Membres de l'UE en ce qui concerne notamment le cadre national, l'organisme de réglementation compétent, les titulaires d'autorisations, les compétences et qualifications, les ressources financières, la transparence et les rapports. Chaque État Membre est responsable, en dernier ressort, de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs qui ont été produits sur son territoire. En 2014, le European Academies' Science Advisory Council (EASAC) a publié un rapport intitulé *Management of spent nuclear fuel and its waste* destiné à faire connaître aux responsables politiques les questions importantes qui doivent être prises en considération lors de l'élaboration des programmes nationaux pertinents. Le rapport a permis d'établir que la politique du cycle du

⁷ Les autres mécanismes d'assurance de l'approvisionnement actuellement en place sont décrits dans le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012.

combustible devrait prendre en considération : i) les périodes longues (plus de cent ans) de tous les cycles du combustible, et le fait que par conséquent, il est avantageux de trouver des solutions techniques solides couvrant l'ensemble du processus, mais en gardant d'autres options disponibles pour tenir compte des changements dans les politiques et plans futurs ; ii) la flexibilité dans les choix futurs ; iii) les améliorations que pourrait apporter le recyclage dans les réacteurs à neutrons rapides ; iv) les solutions nationales ou régionales pour le stockage définitif en formations géologiques profondes ; et v) la formation théorique et pratique nécessaire pour appuyer la gestion sûre à long terme du combustible nucléaire usé.

60. Le Bureau de l'énergie nucléaire du DOE des États-Unis a rendu public en 2014 le rapport final d'une étude sur l'évaluation et les perspectives du cycle du combustible nucléaire. L'étude d'une durée de trois ans a défini un « cadre » (une structure logique et un processus comprenant des ensembles de données, méthodes et outils) à l'appui de la prise de décision dans la R-D du cycle du combustible nucléaire. Elle a identifié les quatre options les plus prometteuses — toutes étant des cycles du combustible à recyclage continu utilisant des réacteurs à neutrons rapides avec du combustible à base d'uranium — et la R-D nécessaire pour ces cycles du combustible, ainsi que 14 autres cycles du combustible potentiellement prometteurs susceptibles d'améliorer la performance.

61. Les États-Unis ont approuvé un nouveau règlement intitulé « Continued Storage of Spent Nuclear Fuel Rule », dans le cadre duquel le combustible usé peut être entreposé de façon sûre dans des piscines d'entreposage et des châteaux d'entreposage à sec au-delà de la durée de vie autorisée d'un réacteur, jusqu'à ce qu'il soit définitivement stocké dans un dépôt géologique profond. La nouvelle règle et le document intitulé « Generic Environmental Impact Statement for Continued Storage of Spent Nuclear Fuel » qui l'accompagne remplacent la « Waste Confidence Decision and Temporary Storage Rule » de 2010. La Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) recommencera à octroyer des permis pour de nouveaux réacteurs et à traiter les demandes de renouvellement d'autorisations pour les réacteurs anciens, après deux ans de suspension dans l'attente du nouveau règlement.

62. En République de Corée, un groupe d'experts indépendant a communiqué à la Public Engagement Commission on Spent Nuclear Fuel Management (PECOS) un rapport dans lequel il recommande de mener des recherches sur diverses méthodes de gestion du combustible nucléaire usé à moyen et long terme, notamment le stockage définitif, le recyclage, le retraitement et l'entreposage. Le groupe recommande aussi la construction de nouvelles installations d'entreposage provisoire du combustible usé en utilisant l'entreposage à sec en temps voulu. La PECOS est un organe de conseil provisoire créé en 2013 avec pour mission de recueillir l'avis de spécialistes au sujet de diverses idées pour la gestion du combustible usé. Il doit présenter au gouvernement en juin 2015 des recommandations sur la politique à suivre.

63. En 2014, quelque 10 000 t de ML ont été déchargées sous forme de combustible usé provenant de toutes les centrales nucléaires. Le volume total cumulé de combustible usé déchargé dans le monde est d'environ 380 500 t de ML, dont quelque 258 700 t de ML sont entreposées dans des installations situées sur des sites ou hors des sites de réacteurs. Moins d'un tiers du volume cumulé de combustible usé qui a été déchargé dans le monde a déjà été retraité. En 2014, la capacité nominale mondiale de retraitement commercial, répartie dans cinq pays (Fédération de Russie, France, Inde, Japon et Royaume-Uni), était d'environ 4 800 t de ML par an. Toutefois, cette capacité n'est pas totalement exploitée.

64. En 2014, l'usine de retraitement Magnox de Sellafield (Royaume-Uni) a célébré ses 50 ans d'exploitation. Jusqu'à présent, l'usine a retraité plus de 50 000 t d'U, soit autant que toutes les autres usines réunies. Les opérations devraient prendre fin en 2017 (fig. A-8.).



FIG. A-8. L'usine de retraitement Magnox de Sellafield (Royaume-Uni) est en exploitation depuis 50 ans. (Photo : Sellafield Ltd)

65. L'usine de retraitement de Rokkasho au Japon, dont la construction devait être achevée en 2014, ne sera pas terminée avant 2016 pour se conformer aux prescriptions réglementaires.

66. L'installation centralisée d'entreposage à sec du combustible usé à Zheleznogorsk (Fédération de Russie), dont les opérations ont débuté en 2012, est en cours d'agrandissement. Il y aura au total trois bâtiments et la capacité sera d'environ 30 000 t d'U de combustible usé pour les réacteurs de grande puissance à tubes de force (RBMK) et les réacteurs VVER. La seconde étape de l'entreposage du combustible usé pour les réacteurs VVER doit être mise en service en 2015. L'usine de retraitement RT-2 devrait entrer en service d'ici à 2021 pour le retraitement du combustible pour les réacteurs VVER-1000.

67. Un accord cadre de partenariat a été signé en 2014 entre le CCNC (Chine) et Candu Énergie (Canada) pour construire des réacteurs à cycle de combustible avancé Candu (AFCR). L'AFCR sera conçu pour utiliser de l'uranium ou du thorium comme combustible, ce qui permettra de réduire les stocks de combustible usé et de réduire de manière importante l'uranium neuf nécessaire. Le combustible usé provenant de quatre réacteurs classiques REP peut approvisionner entièrement une tranche AFCR (et fournir du plutonium recyclé pour le MOX).

68. L'Ukraine a démarré la construction d'une installation centralisée d'entreposage de combustible usé qui permettra d'entreposer hors du site du réacteur le combustible usé produit par les réacteurs VVER-1000 et VVER-440 situés dans le sud de l'Ukraine (sites de Rovno et Khmel'nitski). L'installation sera située entre les villages réinstallés de Stara Krasnytsya, Buryakivka, Chystohalivka and Stechanka, à l'intérieur de la zone d'exclusion de Tchernobyl, et facilitera la réhabilitation écologique de la zone d'exclusion et le renouveau des activités économiques sur certaines terres à l'intérieur de cette zone. Cette installation devrait entrer en service d'ici à 2017.

69. L'enlèvement de la totalité des 1 331 assemblages de combustible usé entreposés dans la piscine d'entreposage de la tranche 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a été achevé le 5 novembre 2014. Le combustible usé a été transféré dans la piscine commune d'entreposage du combustible usé située sur le site du réacteur et les anciens assemblages sont transférés de la piscine dans des châteaux de transport métalliques situés sur le site du réacteur en vue de leur entreposage à sec.

A.3.4. Déclassement, remédiation et gestion des déchets radioactifs

70. L'utilisation de technologies nucléaires de quelque sorte que ce soit (production d'énergie, activités de recherche, applications médicales et industrielles) est assortie d'une obligation de gérer de façon sûre les déchets radioactifs en résultant et de prévoir des activités futures de déclassement et de

remédiation environnementale connexes. Il importe au plus haut point de connaître la situation actuelle du stock des déchets radioactifs, à savoir les volumes, emplacements, conditions et propriétés, ainsi que les tendances futures de la production de déchets pour prévoir de façon adéquate les nécessaires installations et activités de gestion des déchets radioactifs. Pour gérer les déchets radioactifs de manière sûre, les flux de déchets doivent être pris en charge de manière adaptée, traités puis conditionnés, et des moyens adéquats pour l'entreposage, le transport entre installations et enfin, le stockage définitif doivent être mis à disposition.

71. Le forum scientifique, tenu pendant la 58^e session de la Conférence générale de l'Agence, a souligné qu'il était nécessaire d'adopter une approche « de bout en bout » intégrée et globale de la gestion des déchets radioactifs et qu'il existait des solutions pouvant être mises en œuvre (fig A-9).

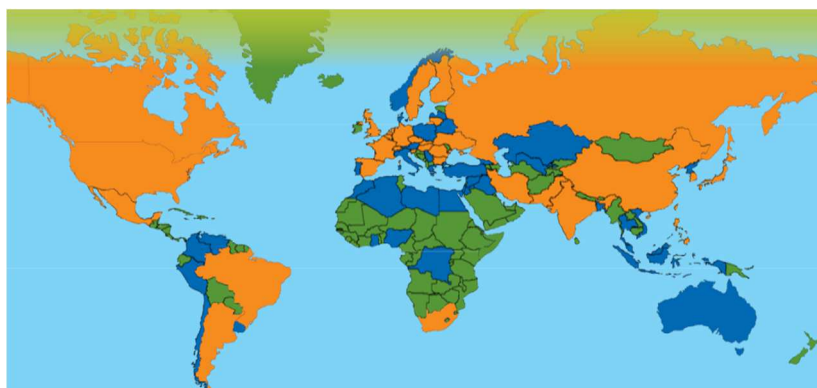


FIG. A-9. Pratiquement tous les États Membres doivent gérer des déchets radioactifs sous une forme ou sous une autre.

Orange: Les États Membres dont les stocks proviennent surtout de la production d'énergie d'origine nucléaire.

Bleu : Les États Membres dont les stocks proviennent surtout de réacteurs de recherche.

Vert : Les États Membres dont les stocks sont pour la plupart des sources radioactives scellées retirées du service.

Estimations du stock mondial de déchets radioactifs

72. Les estimations du stock mondial de déchets radioactifs sont établies à partir des informations fournies à titre volontaire par les États Membres à la Base de données Internet sur la gestion des déchets (NEWMDB) (tableau A-2). L'Agence a lancé, en coopération avec la Commission européenne et l'OCDE/AEN, un projet « Situation et tendances » en vue de mettre au point au niveau national une procédure de déclaration, rationalisée et précise, qui peut être utilisée par les États Membres pour s'acquitter de leurs obligations en matière de déclaration. Conformément à cela, on est en train d'améliorer la NEWMDB pour permettre d'avoir une estimation plus précise des stocks mondiaux.

73. En décembre 2014, il y avait dans le monde 467 installations d'entreposage et 154 installations de stockage définitif pour la gestion de ces inventaires des déchets, qui étaient en exploitation, dont les opérations étaient suspendues ou qui étaient fermées⁸.

⁸ D'après les informations communiquées par les États Membres à la NEWMDB, accessible en ligne à l'adresse <http://newmdb.iaea.org/>.

Tableau A-2. Estimation du stock mondial de déchets radioactifs pour 2014⁹

Classe de déchets	Entreposage¹⁰ [mètres cubes]	Stockage définitif cumulé [mètres cubes]
<i>Déchets de très faible activité (DTFA)</i>	173 000	273 000
<i>Déchets de faible activité (DFA)</i>	56 703 000	65 192 000
<i>Déchets de moyenne activité (DMA)</i>	8 745 000	10 589 000
<i>Déchets de haute activité (DHA)</i>	2 745 000	72 000

Source : NEWMDB (2013), rapports officiels nationaux et données librement accessibles.

Déclassement

74. Au 31 octobre 2014, il y avait 438 centrales nucléaires en service à travers le monde, et 149 autres à l'arrêt ou en cours de déclassement, dont 17 entièrement déclassées. Il y a également un grand nombre d'installations du cycle du combustible : plus de 300 sont en service, environ 170 sont à l'arrêt ou en cours de déclassement et 125 sont entièrement déclassées. En ce qui concerne les réacteurs de recherche, 247 sont en service, plus de 180 sont à l'arrêt ou en cours de déclassement, et plus de 300 réacteurs de recherche et assemblages critiques ont été entièrement déclassés.

75. Une large expérience a été acquise depuis le début de ce siècle en matière de déclassement, les progrès les plus notables ayant été faits principalement dans des pays qui ont des programmes électronucléaires de longue date, particulièrement l'Allemagne, l'Espagne, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Royaume-Uni. Parmi les programmes où des progrès substantiels en matière de déclassement ont été enregistrés en 2014, on peut citer, par exemple : les progrès constants dans le démantèlement de la première génération de centrales nucléaires en France ; les progrès constants dans la segmentation et le conditionnement des déchets provenant d'un réacteur de la centrale nucléaire José Cabrera en Espagne ; la suppression des galeries de filtres de la cheminée des piles de Windscale 1 au Royaume-Uni, qui avait été contaminées au cours de l'incendie des piles en 1957 (fig. A-10.) ; et les trois programmes de déclassement des centrales nucléaires en activité aux États-Unis. Des projets similaires avancent également en Bulgarie, Lituanie et Slovaquie, où des centrales nucléaires ont été mises à l'arrêt avant la fin de leur durée de vie nominale.

76. Étant donné que de nombreuses installations nucléaires actuellement exploitées ont été mises en service au cours des années 70 et 80 et qu'elles arriveront à la fin de leur durée de vie nominale dans les vingt prochaines années, il devrait y avoir des activités de déclassement importantes au cours des décennies à venir.

⁹ Les chiffres du tableau A-2 sont des estimations et non un compte exact des quantités de déchets radioactifs actuellement gérées dans le monde. Les informations récentes sont fondées sur des données précédentes communiquées concernant les stocks et les quantités de déchets produits escomptées. Il existe également des différences intrinsèques entre les estimations des quantités entreposées d'une année sur l'autre à cause des facteurs suivants : a) variations de masse et de volume au cours du processus de gestion des déchets ; b) variations dans les données communiquées et modifications ou corrections apportées à leurs propres données par les États Membres ; et c) adjonction de nouveaux États Membres à la base de données.

¹⁰ Les déchets traités et conditionnés passent par diverses étapes de manipulation durant leur entreposage et avant d'être stockés définitivement. La masse et le volume des déchets radioactifs changent donc continuellement au cours de leur gestion avant stockage définitif. Ceci peut expliquer les écarts constatés dans les quantités estimées de déchets entreposés d'une année sur l'autre.

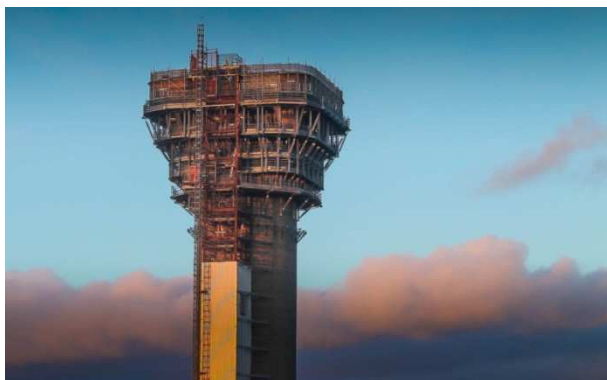


FIG. A-10. Déclassement des galeries de filtres de la cheminée des piles de Windscale 1 (Photo : Sellafield Ltd.)

77. Les activités de déclassement des centrales nucléaires qui ont été mises à l'arrêt après un accident nucléaire constituent une gageure pour plusieurs pays, dont le Japon (Fukushima Daiichi — voir l'encart) et l'Ukraine (Tchernobyl). Des progrès notables ont été faits à la centrale de Tchernobyl grâce à la construction et l'installation d'une nouvelle enveloppe de confinement sûr. Cette enveloppe, une fois entièrement installée, devrait en 2015 recouvrir la tranche 4 endommagée, l'objectif principal étant d'empêcher le rejet de matières radioactives dans l'environnement et de permettre dans le futur une démolition partielle des anciennes structures.

Remédiation

78. Certains pays progressent dans la remédiation des terres contaminées en raison des pratiques antérieures et des accidents survenus et ont en conséquence mis en place des ressources et compétences techniques appropriées. Toutefois, de nombreux programmes nationaux se heurtent encore à des difficultés importantes empêchant la mise en œuvre de programmes de remédiation. Le rapport de référence établi dans le cadre du Projet sur les contraintes à la mise en œuvre des programmes de déclassement et de remédiation de l'environnement (CIDER) lancé en 2013 pour aider à venir à bout de ces contraintes, a été finalisé. Il a relevé l'existence d'obstacles dans quatre grandes catégories : i) la politique nationale, le cadre juridique et réglementaire, ii) les contraintes financières, y compris la logistique, les ressources et la gestion des fonds disponibles, iii) les obstacles techniques et en matière d'infrastructure, iv) les questions impliquant les parties prenantes, dont il faut tenir compte et sur lesquelles il faut mettre l'accent tout au long de la durée de vie des projets de planification et de mise en œuvre du déclassement et de remédiation environnementale. Pour surmonter certains de ces obstacles, le rapport de référence a aussi dressé la liste des stratégies qui peuvent bénéficier d'une plus grande collaboration entre les programmes. Cependant, d'autres solutions novatrices sont aussi nécessaires.

79. La mise au point de l'Unité mobile de caractérisation des sites représente un progrès notable. Ce concept de laboratoire mobile permet de façon interactive de procéder à une caractérisation des sites rapide et efficace et d'identifier en temps réel les domaines présentant un grand intérêt. Cette unité peut être un atout pour les États Membres qui n'ont pas d'infrastructure de laboratoires d'analyses adéquate. Elle peut aussi aider ceux qui ont des capacités d'analyse en laboratoire, mais peuvent se trouver confrontés à des problèmes de caractérisation importants et imprévus. La mise à la disposition des États Membres de cette unité est un moyen efficace pour appuyer la caractérisation des sites contaminés, qui est une mesure essentielle dans la mise en œuvre d'un projet de remédiation.

Faire face aux conséquences de l'accident de Fukushima Daiichi : Gestion des déchets radioactifs, déclassé et remédiation

L'accident de Fukushima Daiichi a engendré des difficultés considérables en matière de déclassé, de remédiation et de gestion des déchets radioactifs, tant sur le site lui-même que sur une vaste zone aux alentours. Avec la coopération de la communauté internationale et les conseils des missions internationales d'examen menées sous les auspices de l'Agence, le Japon a bien progressé dans ces domaines.

La gestion du combustible neuf et usé qui reste représente une des activités les plus importantes à mener dans le cadre du déclassé de la centrale nucléaire. Le transfert du combustible neuf et usé de la piscine d'entreposage de la tranche 4 vers la piscine commune du site a été une tâche essentielle dans l'année.

Les travaux se poursuivent avec la mise en œuvre de technologies de traitement des déchets liquides devant permettre l'extraction de contaminants radioactifs des quelque 400 000 tonnes d'eau radioactive pompées de l'installation. On emploie actuellement deux systèmes d'échange d'ions différents pour l'extraction du césium et la TEPCO (Tokyo Electric Power Company) a récemment mis en service un système mobile et transportable d'extraction du strontium qui peut être directement installé aux endroits où les déchets sont produits ou entreposés. Les performances du système d'extraction de radionucléides multiples ont également été améliorées s'agissant du strontium et des autres radionucléides restant une fois le césium éliminé des déchets. En faisant passer la capacité actuelle de 750 m³/j à 2 000 m³/j, la TEPCO espère accélérer la décontamination de l'eau contaminée qui continue de s'accumuler. Pendant l'année, le Mitsubishi Research Institute a été chargé d'étudier de nouvelles technologies avancées qui pourraient être utilisées in situ pour décontaminer les eaux du port chargées en césium et en strontium.

Les travaux de remédiation ont progressé de manière satisfaisante. Ils ont bénéficié d'une bonne coordination avec les activités de reconstruction et de revitalisation. Les enseignements tirés des travaux de remédiation s'accumulent. Leur mise en commun avec la communauté internationale est d'une importance capitale. Ils concernent notamment les aspects suivants : promouvoir la radioprotection du public, ciblée en particulier sur les débits de dose individuelle ; améliorer la communication des risques par la diffusion de messages clairs et des nouveaux résultats des études sur les effets de la décontamination ; améliorer l'efficacité et l'efficience des activités de décontamination ; et améliorer les stratégies globales destinées à protéger les personnes contre les effets indésirables des rayonnements ionisants, tout en calmant les inquiétudes du public et en lui redonnant un sentiment de sûreté.

Les autorités de la Préfecture de Fukushima ont approuvé la construction d'une installation d'entreposage provisoire sur un site proche de celui de Fukushima Daiichi. Les déchets radioactifs et les sols contaminés stockés dans près de 1 000 emplacements d'entreposage temporaire y seront transférés et rassemblés en un seul.

Déchets radioactifs hérités du passé

80. Le Groupe de contact d'experts pour les initiatives internationales relatives à l'héritage nucléaire en Fédération de Russie (CEG) a contribué au succès de la mise en œuvre des programmes internationaux dans ce domaine. À ce jour, 197 sous-marins nucléaires déclassés ont été déchargés de leur combustible et démantelés par la Fédération de Russie et ses partenaires internationaux. On est en train de sceller les réacteurs des sous-marins déchargés de leur combustible et 76 d'entre eux se trouvent dans des installations d'entreposage à long terme situées dans le nord-ouest et l'extrême-est du pays. La construction, avec l'aide de l'Allemagne, d'un centre régional pour le conditionnement et l'entreposage des déchets radioactifs hérités du passé dans la région du nord-ouest s'est achevée en décembre 2014 (fig. A-11.). Des technologies ont été mises au point pour retirer en sûreté puis entreposer le combustible des cœurs des réacteurs refroidis par métal liquide. Une cellule chaude permettant le traitement des conteneurs défectueux de combustible usé a été mise en service à Mayak

avec l'aide de la France. En outre, les activités internationales conjointes visant à déclasser les puissants générateurs thermoélectriques à radio-isotopes qui étaient utilisés dans des phares le long des côtes de la Fédération de Russie touchent à leur fin. D'après un examen effectué en décembre 2014 conjointement par l'AIEA et le Président du CEG, les activités du groupe devraient être achevées à l'été 2015.



FIG. A-11. Le Centre régional de conditionnement et d'entreposage à long terme des déchets radioactifs du nord-ouest de la Russie (à gauche) et la plate-forme d'entreposage des réacteurs (à droite). (Photo : Energiewerke Nord GmbH)

Traitement et conditionnement des déchets radioactifs

81. Les déchets radioactifs produits doivent être réduits en volume et convertis dans une forme qui permet leur entreposage et leur stockage définitif dans des conditions de sûreté, ainsi que leur manutention et leur transport.

82. Les technologies de traitement des déchets solides, liquides et gazeux sont bien établies et déjà exploitées dans de nombreux États Membres. Une nouvelle technologie de reformage à la vapeur sur lit fluidisé est actuellement en cours de mise en service sur le site du Laboratoire national de l'Idaho du Ministère de l'énergie des États-Unis, pour le traitement de quelque 3 300 000 litres de déchets liquides hautement radioactifs issus du retraitement de combustible à l'UHE. Le traitement par le plasma des déchets solides, qui offre un important facteur de réduction du volume, est de plus en plus répandu. Une installation de traitement de ce type est d'ailleurs en construction à la centrale nucléaire de Kozloduy (Bulgarie).

83. Le conditionnement des déchets recouvre l'immobilisation des radionucléides, la mise en conteneur des déchets et la fourniture d'emballages supplémentaires. Les matrices géopolymères continuent de donner des résultats prometteurs pour ce qui est de l'immobilisation de flux de déchets difficiles tels que les résines organiques échangeuses d'ions usées de l'usine de traitement des déchets de Bohunice (Slovaquie). Les déchets de haute activité doivent être convertis dans des formes à longévité élevée et sont généralement vitrifiés. C'est cependant une autre technique qui a été recommandée pour le conditionnement des 4 400 m³ de calcinats de DHA actuellement entreposés sur le site du Laboratoire national de l'Idaho en vue de leur stockage définitif : la compression isostatique à chaud. En Australie, on planifie la construction d'une installation de traitement des déchets issus de la production passée, présente et future de molybdène 99 et d'autres isotopes pour des applications médicales. Cette installation permettra de calciner les liquides et d'immobiliser les déchets radioactifs en vue d'obtenir une forme durable et solide, semblable à de la roche (Synroc) et adaptée à l'entreposage et au stockage définitif.

84. Pour ce qui est des anciennes installations, des progrès notables ont été accomplis à Sellafield (Royaume-Uni) avec le début du projet : le remballage des fûts anciens de la piscine d'entreposage du

combustible des piles, la remise en suspension de la boue radioactive de la piscine d'entreposage de magnox de première génération, et l'ouverture de l'entrepôt 3 destiné à recevoir des colis de DMA.

Stockage définitif de déchets radioactifs

85. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs, sauf pour les DHA et/ou le combustible usé, sont en service dans le monde entier. Elles comprennent les installations de stockage définitif en tranchées pour les DTFA (en Espagne, aux États-Unis, en France et en Suède, par exemple) et pour les DFA dans les régions arides (comme en Afrique du Sud, en Argentine, aux États-Unis et en Inde) ; les installations construites en surface ou à faible profondeur pour les DFA (par exemple en Chine, en Espagne, en France, en Inde, au Japon, en Pologne, en République tchèque, au Royaume-Uni et en Slovaquie) ; les installations construites sous la surface pour les déchets de faible et moyenne activité (DFMA) (en Finlande et en Suède, par exemple) ; les puits de stockage définitif de DFA aux États-Unis ; et les installations de stockage géologique destinées à recevoir des DFMA (aux États-Unis et en Hongrie, par exemple). Les options de stockage définitif pour les déchets de matières radioactives naturelles varient suivant les réglementations nationales et vont des installations de stockage définitif en tranchées aux installations construites sous la surface (en Norvège, par exemple).

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

87. Le Canada poursuit le développement de deux projets de dépôts géologiques profonds (DGP). Ontario Power Generation, la principale compagnie d'électricité d'origine nucléaire du Canada, propose de construire un dépôt géologique profond pour ses DFA et DMA sur le site nucléaire de Bruce à Kincardine (Ontario). Ce projet fait actuellement l'objet d'un processus d'examen réglementaire au niveau fédéral. La Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) regroupant des compagnies d'électricité canadiennes créée en vertu de la loi de 2002 sur les déchets de combustible nucléaire, collabore avec 11 collectivités intéressées dans le cadre d'un processus de sélection visant à trouver un site sûr et adapté, dans une localité qui consentirait à accueillir sur son territoire un dépôt géologique profond pour la gestion à long terme des déchets de combustible nucléaire du pays.

88. La Chine anticipe des besoins en matière de stockage géologique liés au retraitement de 140 000 tonnes de combustible usé provenant d'un parc de 48 réacteurs. Le dépôt de stockage définitif devrait être situé soit dans une formation cristalline, soit dans une formation sédimentaire, et la construction de la première installation souterraine expérimentale est prévue dans la région de Beishan. Les résultats attendus de cette installation souterraine expérimentale entreront en jeu dans les décisions futures sur la mise en œuvre du stockage définitif en formations géologiques profondes.

89. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a évalué les résultats du processus formel public national d'engagement des parties prenantes conduit en 2013, ainsi que le retour d'information de son organisme de réglementation. Elle prévoit de présenter une demande d'autorisation en 2017 et entend impliquer davantage les parties prenantes dans le processus décisionnel, en particulier en ce qui concerne son plan directeur opérationnel.

90. Pour appliquer au stockage définitif des déchets radioactifs calogènes sa loi de juin 2013 sur la sélection d'un site de dépôt, l'Allemagne a mis en place une commission en 2014. Les recommandations de cette dernière, attendues pour 2016, devraient porter sur des critères de sélection des sites et des conditions de participation des parties prenantes.

91. En 2014, le gouvernement du Royaume-Uni a publié un livre blanc intitulé « *Implementing Geological Disposal* » (mise en œuvre du stockage géologique), qui définit un cadre pour la gestion à long terme des déchets de haute activité. Ce livre blanc trace les grandes lignes d'une approche fondée

sur une collaboration avec les communautés intéressées pour la sélection des sites potentiels d'une installation de stockage géologique. Il s'agit pour commencer de lancer un plan d'action sur deux ans visant à apporter des éléments de réponse aux questions jugées importantes par les parties prenantes.

92. Aux États-Unis, plusieurs évolutions essentielles ont eu lieu dans le domaine du stockage géologique en 2014. Dans son *Safety Evaluation*¹¹, la NRC a établi, comme on pouvait s'y attendre, que le Ministère de l'énergie s'était conformé à ses prescriptions réglementaires de sûreté après fermeture.

93. La Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis a reconnu l'importance que pouvait avoir le concept du stockage définitif en puits profond pour le stockage définitif sûr et efficace des matières nucléaires. Il est envisagé dans ce concept de forer un puits (ou une série de puits) d'une profondeur d'environ 5 000 m dans un socle de roches cristallines. Le Ministère de l'énergie des États-Unis propose de procéder à une démonstration.

94. Par ailleurs, les activités d'exploitation de l'installation pilote de confinement des déchets (WIPP) du Ministère de l'énergie des États-Unis ont été examinées de près par son organisme de réglementation, l'Agence de protection de l'environnement (EPA), suite à deux événements sans rapport (fig. A-12.). Le premier, un feu de camion, n'a pas eu de conséquences radiologiques. L'enquête a conclu à un défaut d'entretien périodique et à des mesures inappropriées de sécurité au travail en milieu souterrain, et préconisé la prise de mesures correctives en matière de sûreté d'exploitation. Le second événement serait dû à un mélange de déchets incompatibles qui aurait engendré une réaction exothermique à l'intérieur d'un conteneur de déchets stockés, donnant lieu à un rejet de matières radioactives. Les expositions occasionnées ont été d'un niveau bien inférieur à la limite réglementaire prévue par la Loi sur la pureté de l'air de l'EPA. Le Ministère de l'énergie des États-Unis a publié un plan de récupération après sinistre envisageant une reprise limitée des opérations de stockage dans cette installation au premier trimestre de 2016.

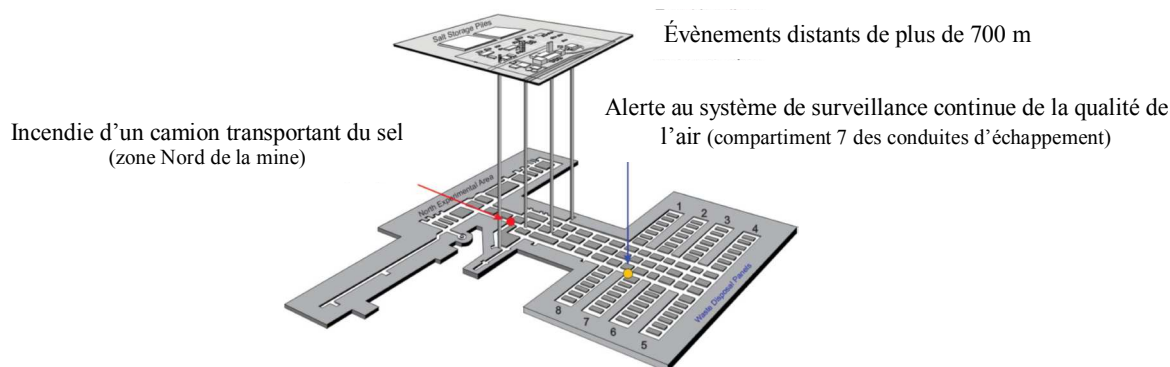


FIG. A-12. Emplacement des deux événements survenus à l'installation WIPP en 2014.
(Illustration : WIPP, Ministère de l'énergie des États-Unis)

Gestion des sources radioactives scellées retirées du service

95. Les options de stockage définitif des sources scellées retirées du service, comme leur stockage avec d'autres déchets dans des installations appropriées, le développement des options de recyclage et de rapatriement, ou le stockage dans des puits spéciaux sont des solutions qui sont sérieusement à l'étude dans plusieurs pays dont l'Afrique du Sud, le Ghana, la Malaisie et les Philippines. Un

¹¹ Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada: Repository Safety after Permanent Closure (NUREG-1949, Volume 3).

argumentaire de sûreté générique a été élaboré concernant le stockage en puits de source de catégories 3 à 5, et un autre est en cours d'élaboration pour les sources des catégories 1 et 2.

96. Un certain nombre d'opérations ont été menées avec succès en 2014 pour enlever des sources scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et les placer sous contrôle en les transférant dans une installation nationale d'entreposage de déchets radioactifs ou dans un autre établissement où ils pouvaient être entreposés dans des conditions adéquates. La cellule chaude mobile a été expédiée au Costa Rica aux fins du conditionnement et de l'extraction de cinq sources de haute activité scellées retirées du service devant être recyclées. Au Maroc, cinq sources de haute activité scellées retirées du service des catégories 1 et 2 ont été compactées avant d'être rapatriées en France. Le rapatriement de sources de fabrication française des catégories 1 et 2 a commencé dans plusieurs États Membres, dont le Cameroun et le Liban, et devrait être achevé d'ici la fin du premier semestre de 2015.

97. Des progrès importants ont été réalisés dans l'association de la cellule chaude mobile à un modèle de stockage en puits, l'objectif étant de limiter le plus possible la manipulation de sources et d'éviter des transports inutiles.

98. Des opérations de conditionnement de telles sources ont été achevées aux Fidji, en Malaisie et au Monténégro, et une formation a été dispensée au personnel local et régional.

99. L'Agence a donné accès au Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes à nombre des personnes désignées dans chaque pays à cette fin, facilitant ainsi la reconnaissance des sources scellées retirées du service trouvées sur le terrain. Des initiatives visant à fournir davantage de détails sur les sources et les dispositifs ont été entreprises en 2014 afin d'améliorer le catalogue.

A.4. Sûreté

100. On a continué d'améliorer la sûreté dans les centrales nucléaires à travers le monde, notamment en déterminant et en appliquant les enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi, en améliorant l'efficacité de la défense en profondeur, en renforçant les capacités de préparation et de conduite des interventions d'urgence, en maintenant et en améliorant la création de capacités, et en protégeant les personnes et l'environnement contre les rayonnements ionisants. Les activités menées par les États Membres à la lumière de l'accident ont également été examinées lors de la sixième Réunion d'examen des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire, tenue à Vienne du 24 mars au 4 avril 2014.

101. Le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire est resté au cœur des mesures prises par les États Membres, le Secrétariat et d'autres parties prenantes pour renforcer le cadre de sûreté nucléaire. L'Agence a continué de partager et de diffuser les enseignements tirés de l'accident par l'analyse d'aspects techniques pertinents. Elle a organisé des réunions d'experts internationaux sur la protection radiologique après l'accident de Fukushima Daiichi (du 17 au 21 février) et sur la gestion des accidents graves (du 17 au 20 mars). Qui plus est, l'Agence a tenu la Conférence internationale sur les défis à relever par les organismes d'appui technique et scientifique pour renforcer la sûreté et la sécurité nucléaires (du 27 au 31 octobre). En 2014, les rapports intitulés *IAEA Report on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*¹² et *IAEA Report on Radiation Protection After the Fukushima Daiichi Accident: Accident: Promoting Confidence and Understanding*¹³ ont été publiés.

¹² <http://www.iaea.org/sites/default/files/humanfactors0914.pdf>

¹³ <http://www.iaea.org/sites/default/files/radprotection0914.pdf>

102. Sur le plan opérationnel, le niveau de sûreté des centrales nucléaires reste élevé, comme le montrent les indicateurs de performance en la matière recueillis par l'Agence et l'Association mondiale des exploitants nucléaires. La figure A-13 indique le nombre d'arrêts d'urgence ou de mises à l'arrêt non programmés manuels ou automatiques pour 7 000 heures de fonctionnement (environ un an). Bien que les arrêts d'urgence ne soient qu'un indicateur de la performance en matière de sûreté parmi d'autres, cet indicateur est couramment utilisé pour donner une idée de l'amélioration de la sûreté des centrales, notamment par la réduction du nombre de transitoires thermohydrauliques et de réactivité indésirables et non programmés nécessitant un arrêt du réacteur. Comme le graphique le montre, l'amélioration est constante, avec une légère tendance à la hausse en 2013.

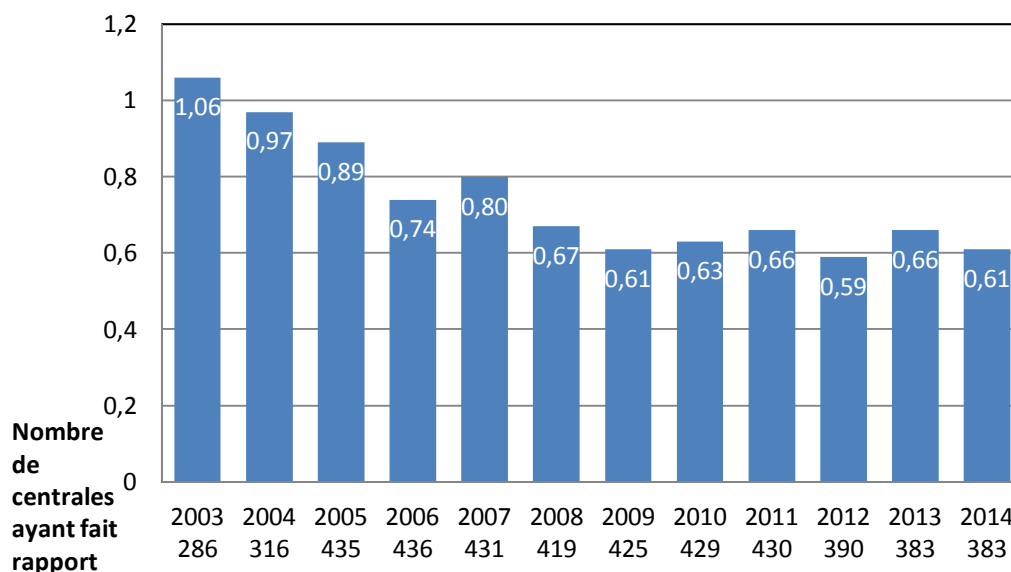


FIG. A-13. Taux moyen d'arrêts non programmés : nombre moyen annuel d'arrêts d'urgence automatiques et manuels.
(Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'Agence <http://www.iaea.org/pris>)

103. On peut trouver d'autres informations sur la sûreté nucléaire dans le Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour 2015.

B. Données atomiques et nucléaires

104. Les fichiers continuellement actualisés dans les quatre centres de référence mondiaux servent de base à toutes les activités en matière de science et de technologie nucléaires pour les applications aussi bien énergétiques que non énergétiques. Ces centres sont la Section des données nucléaires de l'AIEA, le Centre national de données nucléaires des États-Unis, situé au Laboratoire national de Brookhaven, la Banque de données de l'AEN/OCDE et le Centre russe de données nucléaires à Obninsk. La Section des données nucléaires de l'AIEA coordonne deux réseaux qui lient ces centres et d'autres centres spécialisés : le Réseau international de centres de données sur les réactions nucléaires, qui s'occupe principalement de la base de données expérimentales sur les réactions nucléaires, et le Réseau international des évaluateurs de données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux, qui supervise le Fichier de données évaluées sur la structure nucléaire.

105. Le caractère collaboratif du travail sur les données nucléaires est illustré par le groupe de travail pour la coopération internationale en matière d'évaluation des données nucléaires (WPEC), établi par l'AEN/OCDE. Pendant 25 ans, le WPEC a utilisé des sous-groupes pour étudier des questions spécifiques, tels que l'Organisation internationale de collaboration pour une bibliothèque de données évaluées. Ce projet, qui rassemble des membres de l'ensemble de la communauté internationale des spécialistes des données relatives aux réactions nucléaires pour déterminer et documenter les écarts entre les bibliothèques de données évaluées existantes, les données mesurées et les interprétations des calculs modèles, vise à améliorer la réconciliation de ces écarts afin de permettre des évaluations plus exactes pour toutes les applications. L'accent est initialement mis sur un petit nombre de noyaux les plus hautement prioritaires, à savoir l'hydrogène, l'oxygène, le fer et les actinides majeurs. Un autre sous-groupe du WPEC planche sur une proposition concernant un nouveau format moderne structuré de données en langage XML.

106. Les installations expérimentales sont un autre domaine de collaboration internationale. La source de neutrons pulsés de l'installation sur les neutrons à temps de vol de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) a mesuré de nombreuses sections efficaces sur une gamme étendue d'énergies nécessaires pour la nucléosynthèse stellaire, les effets de la rupture de symétrie dans les noyaux composés, l'étude des densités au niveau nucléaire, et les applications de la technologie nucléaire, telles que la transmutation des déchets nucléaires, les systèmes hybrides et les études du cycle du combustible nucléaire (fig. B-1.). Un consortium de pays européens a lancé la construction de l'un des plus grands projets d'infrastructure actifs d'Europe, la source de spallation européenne (ESS). La première pierre de l'ESS a été posée en octobre 2014 à Lund (Suède), et les premiers neutrons devraient être produits en 2019.

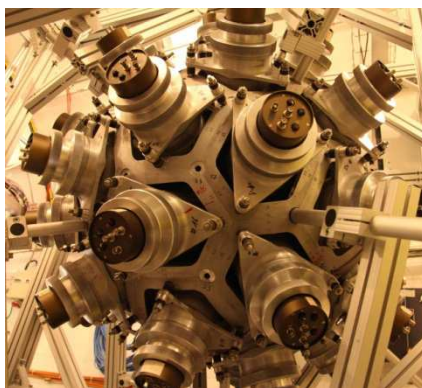


FIG. B-1. Détecteurs à l'installation de neutrons à temps de vol du CERN. (Photo : CERN)

107. Les installations de faisceaux d'ions radioactifs permettent de mesurer de nombreux nucléides qui ne peuvent être étudiés dans les installations traditionnelles. Plusieurs domaines de recherche en physique nucléaire aux frontières de la stabilité peuvent être étudiés à l'aide de ces faisceaux, y compris les noyaux issus des processus r et rp , la fermeture de la carapace au voisinage des nombres magiques et les éléments très lourds. L'installation Spiral2, en construction au centre de recherche du Grand accélérateur national d'ions lourds en France, permettra à de nombreux chercheurs internationaux d'avoir accès aux faisceaux d'ions radioactifs. Les premières expériences devraient avoir lieu en 2015.

108. Le compte rendu de la Conférence internationale sur les données nucléaires pour la science et la technologie, tenue à New York (États-Unis d'Amérique) en 2013 a été publié dans une revue à comité de lecture (*Nuclear Data Sheets* 118-120) en 2014. Cette conférence triennale a permis de présenter les travaux de centaines de scientifiques et d'ingénieurs intervenant dans la production ou l'utilisation de données nucléaires pour de nombreuses applications.

109. Les applications qui reposent largement sur les données nucléaires sont les réacteurs à fission, qui sont au centre du projet de l'Organisation internationale de collaboration pour une bibliothèque de données évaluées ; la recherche sur la fusion, en particulier dans le cadre du Réacteur expérimental thermonucléaire international ; celles liées à des besoins en médecine, notamment la production d'isotopes ; et la dosimétrie, dans laquelle les propriétés du spectre neutronique peuvent être déterminées à l'aide d'une gamme de sections efficaces de réactions très bien caractérisées.

110. Les données atomiques sont habituellement considérées comme un domaine de travail distinct, mais elles ont de nombreuses interactions avec les données nucléaires en ce qui concerne les moments nucléaires. La spectroscopie atomique expérimentale des structures fines, en association avec les calculs précis de la structure atomique, fournit une clé pour étudier les paramètres de la structure nucléaire, y compris le rayon de charge, le moment dipolaire magnétique et le moment quadripolaire électrostatique. Les calculs électrodynamiques quantiques détaillés, généralement pour les ions lourds de type hélium, permettent aujourd'hui de séparer les effets théoriques du champ de ceux de Bohr-Weisskopf sur les structures hyperfines. Plusieurs applications de ce genre ont été décrites à la neuvième conférence internationale sur les données atomiques et moléculaires et leurs applications, tenue à Iéna (Allemagne), du 21 au 25 septembre 2014.

111. La science de la quantification des incertitudes s'est développée rapidement dans les applications de la simulation des systèmes complexes tels que la météo et le climat. Plusieurs réunions ont été tenues en 2013 et 2014 sur la nouvelle application en développement de cette science aux données atomiques et moléculaires calculées, comme ce fut le cas pour les expériences. Cette application concerne les systèmes physiques simples pour lesquels les calculs précis sont extrêmement difficiles, et constitue dans une certaine mesure une nouvelle branche de la science de la quantification des incertitudes.



*FIG. B-2. L'installation européenne XFEL à Hambourg (Allemagne)
(Photo : Installation européenne XFEL)*

112. De nouvelles installations laser à électrons libres (XFEL) à rayon X durs et mous entrent en service pour les utilisateurs dans le monde entier. Deux installations XFEL à rayons X durs sont en exploitation : l'accélérateur linéaire source de lumière cohérente à Stanford (États-Unis d'Amérique) inauguré en 2009, et l'installation laser à électrons libres SPring-8 à Harima (Japon), inaugurée en 2011. Les installations PAL-XFEL à rayons X durs du laboratoire de l'accélérateur de Pohang (République de Corée), l'installation européenne XFEL à Hambourg (Allemagne) (fig. B-2.) et l'installation laser à électrons libres SwissFEL à Villigen (Suisse) sont en construction. On s'attend à ce que les deux premières produisent leurs premières lumières laser en 2016. L'état de ces installations et d'autres installations laser à électrons libres dans le monde a été examiné à la 36^e conférence internationale sur les lasers à électrons libres, tenue à Bâle (Suisse) en août 2014. Ces installations XFEL sont utilisées pour étudier les propriétés électroniques des atomes, des molécules et

des matières, et notamment les processus rapides dans les molécules biologiques complexes comme l'ADN.

C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

113. Deux projets ambitieux et à grande échelle d'accélérateurs ont été lancés en 2014 et devraient entrer en service d'ici 2020-2022. L'installation du synchrotron européen de Grenoble (France) a commencé à moderniser sa source actuelle de photons d'accélérateurs. La nouvelle source, considérée comme étant de la quatrième génération de ce type, sera plus brillante (performance multipliée par un million) que la source actuelle, et sa consommation d'énergie sera plus faible de 20 %. Elle vise à offrir diverses capacités aux chercheurs dans un large éventail de disciplines comme la physique, la chimie, la science des matériaux et la biologie. La construction de l'accélérateur de particules ESS aussi a commencé, et celui-ci permettra de fournir les faisceaux de neutrons pulsés ayant la plus grande intensité au monde pour la recherche scientifique. L'ESS sera une installation d'accélérateur pour la recherche en science des matériaux utilisant la diffusion neutronique. Il fournira des faisceaux neutroniques 30 fois plus brillants que ceux de n'importe quelle source neutronique actuelle. Il est installé à Lund (Suède), non loin du laboratoire MAX IV, lequel le complètera dans la recherche en science des matériaux.

114. Les installations de synchrotron sont des outils importants de recherche qui facilitent considérablement le développement technologique. Le temps de faisceau dans ces installations est généralement multiplié par un facteur de 2 à 3, c'est-à-dire que seul un tiers à la moitié de toutes les propositions de recherche peuvent être approuvés et réalisées. Dans les lignes de faisceaux particulièrement modernes, par exemple les lasers à électrons libres, ce facteur est même plus élevé et est d'environ 5. Cela signifie qu'il est difficile, sinon impossible, pour les nouvelles équipes de recherche dans le domaine et celles provenant d'États Membres en développement d'avoir accès à du temps de faisceau dans un synchrotron.

115. Pour remédier à ce problème et donner accès à une installation de synchrotron ultramoderne aux équipes de recherche de n'importe quel État Membre, l'Agence a mis en place une installation expérimentale faisant appel à diverses techniques comme poste final de la ligne de faisceaux à fluorescence X (XRF) d'Elettra à Trieste (Italie) (fig. C-1.). Ce projet a été exécuté en coopération avec l'Institut fédéral allemand de physique et de technologie de l'université technique de Berlin.

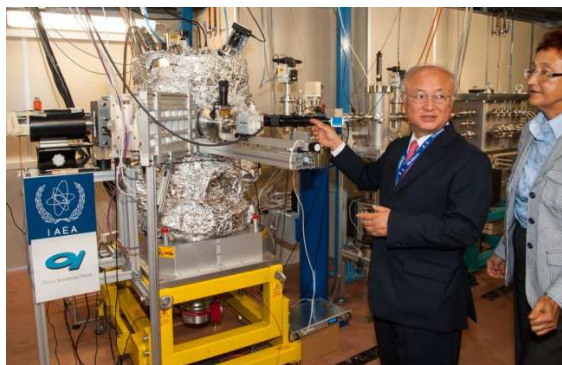


FIG. C-1. Yukiya Amano, Directeur général de l'AIEA, et Maya Kiskinova, coordonnatrice de la recherche d'Elettra, avec l'enceinte sous ultra-vide lors de l'inauguration de la nouvelle ligne de faisceaux de fluorescence X, le 6 octobre 2014. (Photo : Elettra)

116. Le poste final de la ligne de faisceaux de l'enceinte sous ultra-vide de l'Agence permet une application synergique de différentes méthodologies de fluorescence X et de spectrométrie, offrant une caractérisation élémentaire, chimique et structurale complète. L'enceinte sous ultra-vide est dotée d'un manipulateur d'échantillons motorisé à sept axes pour déplacer/faire tourner les échantillons à étudier et les détecteurs de rayons X dans diverses directions par rapport au faisceau synchrotron. Les caractéristiques optimales d'une ligne de faisceaux de fluorescence X comprennent une plus grande accordabilité énergétique (2-14 keV), le flux (5 109 photons par seconde à 5,5 keV, 2,4 GeV en mode machine), un pouvoir de résolution de $1,5 \times 10^{-4}$, une faible divergence de faisceaux (0,15 mrad) et une taille de faisceau aux fentes de sortie égale à $220 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$.

117. En 2014, l'Agence a aussi lancé le Portail des connaissances sur les accélérateurs¹⁴, un nouveau site web conçu pour rassembler la communauté des spécialistes des accélérateurs et fournir des références aux parties prenantes telles que les décideurs, les conseils de recherche scientifique et les organismes gouvernementaux chargés des infrastructures de recherche humaine et scientifique. Ce portail comprend une base de données de 196 installations d'accélérateurs de particules de faible et moyenne énergie en service dans le monde. Conçu pour être une plateforme attractive de collaboration scientifique et de travail en réseau, il regroupe des liens pour des logiciels et des bases de données, des documents scientifiques et didactiques, les faits marquants les plus récents concernant la recherche faisant appel aux accélérateurs, et des annonces de conférences, d'ateliers et d'écoles, et permet aux utilisateurs inscrits de télécharger leurs contributions.

118. La gestion d'une installation d'accélérateurs comporte un certain nombre de problèmes différents de ceux d'autres installations de recherche. Les accélérateurs sont souvent à la fois des outils et des objets de recherche, mais ces aspects peuvent être facilement ignorés. Pour aider les États Membres à faire face efficacement aux défis économiques et techniques actuels, l'Agence a organisé, conjointement avec le synchrotron SOLEIL, une réunion technique sur les stratégies de gestion des installations d'accélérateurs, qui a eu lieu du 15 au 19 septembre à Saint-Aubin (France).

119. Les sources d'ions uniques capables d'implanter des ions avec une précision nanométrique sont récemment devenues l'élément moteur dans plusieurs domaines de recherche et dans les développements possibles de nouvelles technologies. Dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée de l'Agence sur les défauts radio-induits dans les semi-conducteurs et les isolateurs, l'irradiation par des ions uniques a été utilisée pour évaluer les propriétés de transport des défauts induits par la charge dans les dispositifs électroniques endommagés par les rayonnements. Les

¹⁴ L'adresse de ce portail est <http://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>.

transitoires de courant induits par des ions uniques reflètent les propriétés de la matière, ainsi que la structure du dispositif, et dépendent aussi du type d'ion. Les ions uniques peuvent aussi modifier les propriétés électriques, optiques et structurelles d'une matière à leur point d'entrée dans celle-ci et le long de leur trajectoire. L'irradiation/l'implantation déterministe d'ions uniques est une technologie difficile mais importante qui peut ouvrir la voie à des modifications précises de la matière dont la position est contrôlée.

120. Les deux images de la figure C.2 montrent des exemples de matières ainsi modifiées. L'image de gauche montre un processus que l'on peut utiliser pour micro-usiner le silicium, avec des tailles d'éléments aussi petites que quelques dizaines de nanomètres, ce qui permettra de fabriquer une série de nouvelles structures nanométriques dans des domaines comme celui des microfluides/nanofluides et la nanolithographie¹⁵. L'image de droite montre comment l'implantation d'ions uniques peut servir à l'ingénierie des imperfections des diamants pour créer des centres azote-lacune, ce qui devrait avoir une application prometteuse pour le calcul quantique, les senseurs magnétiques à très haute résolution ou la photonique à l'échelle nanométrique¹⁶. Étant donné que les propriétés de la matière peuvent être modifiées le long de la trajectoire des ions, la technique d'irradiation d'ions uniques avec contrôle de position au niveau nanométrique est une technologie clé pour modifier les propriétés électriques, optiques et structurelles des matières.

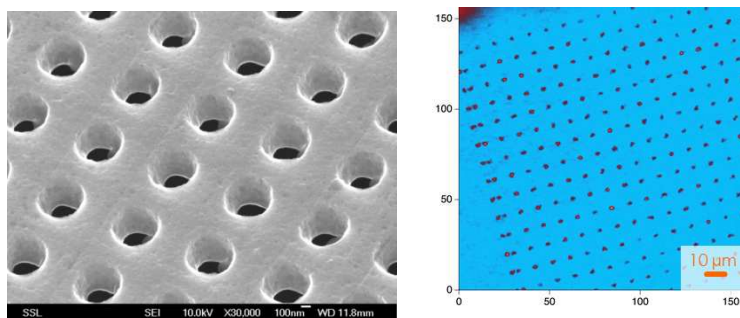


FIG. C-2. À gauche : Image au microscope électronique à balayage d'une série uniforme de trous de quelques centaines de nanomètres de diamètre dans le silicium (Photo : M.B.H. Breese/Université nationale de Singapour). À droite : Image au microscope confocal d'un réseau de centres azote-lacune créé par implantation ionique dans le diamant. Quelques ions d'azote 15 ont été irradiés dans chaque point d'irradiation (Photo : T. Ohshima/Commission de l'énergie atomique du Japon).

121. Au-delà de la recherche fondamentale et appliquée, les accélérateurs de particules sont de très importants outils pour les applications industrielles. L'élaboration de technologies d'accélérateurs capables de fournir des courants de faisceaux d'ions hautement stables et collimatés, allant de quelques μA à 100 mA, et des énergies d'ions incidents allant de 100 eV à ~ 10 MeV, a permis de disposer d'une technique de portée générale, appropriée pour la fabrication de circuits intégrés en vue d'opérations logiques, analogues et de mémoire ainsi que d'une série de plus en plus variée de senseurs optiques et de dispositifs d'imagerie. L'implantation ionique est aujourd'hui généralement utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs pour créer et modifier des matériaux électroniques et

¹⁵ AZIMI, S., et al., Nanoscale lithography of LaAlO₃/SrTiO₃ wires using silicon stencil masks, Nanotechnology 25 (2014) 445301

¹⁶ Takashi Yamamoto et al., Strongly coupled diamond spin qubits by molecular nitrogen implantation, PHYSICAL REVIEW B 88, 201201(R) (2013).

photoniques¹⁷. Les scientifiques estiment actuellement qu'il y a plus de 17 000 accélérateurs en service dans le monde dans des établissements de recherche, des hôpitaux et le secteur industriel¹⁸.

C.2. Réacteurs de recherche

122. Les réacteurs de recherche sont principalement utilisés comme sources de neutrons pour des applications dans la recherche et divers domaines. Les applications les plus fréquentes sont présentées au tableau C-1. Leur puissance peut aller de zéro (assemblages critiques ou sous-critiques, par exemple) environ 200 MWth, ce qui est encore faible comparé aux 3 000 MWth d'une centrale nucléaire typique. La diversité de conception est beaucoup plus grande pour les réacteurs de recherche que pour les réacteurs de puissance et ils ont aussi différents modes d'exploitation, lesquels peuvent être continus ou pulsés.

Tableau C-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde¹⁹.

Type d'application ^a	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	États Membres dotés d'installations en service
Formation théorique/pratique	178	55
Analyse par activation neutronique	129	53
Production de radio-isotopes	100	44
Irradiation de matériaux/du combustible	85	30
Neutronographie	74	41
Diffusion neutronique	53	35
Transmutation (dopage de silicium)	31	20
Géochronologie	26	22
Transmutation (pierres précieuses)	22	13
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	19	13
Autres ^c	141	38

^a La publication récente de l'Agence intitulée *Applications of Research Reactors* (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, 2014) décrit ces applications de manière plus détaillée.

^b Sur les 284 réacteurs de recherche considérés (247 en service, 19 en arrêt provisoire, six en construction et 12 prévus ; 31 décembre 2014).

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

123. Il ressort de la base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche que 747 réacteurs de recherche ont été construits jusqu'ici et que 247 d'entre eux étaient en service au 31 décembre 2014. La Fédération de Russie possède le plus grand nombre de réacteurs de recherche en service avec 49,

¹⁷ FELCH, S.B et al.: Ion Implantation for Semiconductor devices: the largest use of industrial accelerators, Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA USA, Page 740, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/papers/weyb2.pdf>

¹⁸ Industrial Accelerators and their applications, Eds: Robert W Hamm and Marianne E. Hamm; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2012

¹⁹ Source : Base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>).

suivie des États-Unis d'Amérique (41), de la Chine (15) et de la France (12). De nombreux pays en développement possèdent aussi des réacteurs de recherche (par exemple, il y en a huit en service en Afrique). Il y a dans le monde 57 réacteurs de recherche fonctionnant à des niveaux de puissance supérieurs à 5 MW et qui offrent donc des flux de neutrons élevés supportant des applications à haute capacité.

124. La majorité des réacteurs de recherche en service restent largement sous-utilisés et ont, en moyenne, plus de 45 ans. Un grand nombre d'entre eux nécessitent donc des efforts continus de gestion du vieillissement, de modernisation et de rénovation. Leur utilisation stratégique et la planification de leurs activités suscitent un intérêt croissant en vue d'améliorer leur exploitation et d'augmenter les revenus. Au cours des deux dernières années, 37 installations de réacteurs de recherche ont élaboré et présenté des plans stratégiques à l'Agence pour examen. Celle-ci a organisé un atelier de suivi en octobre 2014 pour partager les enseignements et les bonnes pratiques tirés de ce processus d'examen avec ses États Membres. La collaboration internationale se poursuit en vue de promouvoir et d'améliorer l'utilisation des réacteurs de recherche pour la formation théorique et pratique. C'est ainsi que le projet « Internet Reactor Laboratory » en Amérique latine et en Europe vise à regrouper des universités ayant des réacteurs de recherche en service à des fins de formation théorique et pratique.



FIG. C-3. L'Autorité de réglementation nucléaire de l'Argentine a accordé une licence de construction pour le réacteur de recherche RA-10, qui servira à augmenter la production de radio-isotopes du pays pour les essais de matériaux/combustibles, le dopage du silicium, ainsi que pour la recherche-développement. (Image : Commission nationale de l'énergie atomique)

125. Plusieurs pays se trouvent à différents stades de construction de nouveaux réacteurs de recherche comme installations nationales clés pour le développement de l'infrastructure et des programmes de science et de technologie nucléaires, y compris de puissance nucléaire. De nouveaux réacteurs de recherche sont en construction en Argentine, (fig. C-3.), en Arabie saoudite, en Fédération de Russie, en France, en Jordanie et en République de Corée. Plusieurs États Membres ont des plans officiels de construction de réacteurs de recherche, y compris la Belgique, le Brésil, les États-Unis d'Amérique, l'Inde, les Pays-Bas et le Viet Nam. D'autres, comme l'Afrique du Sud, l'Azerbaïdjan, le Bangladesh, le Bélarus, la Bolivie, le Koweït, la Mongolie, le Nigeria, la République-Unie de Tanzanie, le Soudan, la Thaïlande et la Tunisie envisagent la construction de nouveaux réacteurs de recherche²⁰.

126. On s'attend à ce que le nombre de réacteurs de recherche en service dans les pays continue de diminuer à mesure que les réacteurs anciens sont déclassés et remplacés par des réacteurs de recherche partagés par plusieurs pays. Il faudra une coopération internationale accrue pour permettre l'accès à ces installations et leur utilisation efficiente. Dans ce contexte, les réseaux et les groupements

²⁰ La publication récente de l'Agence intitulée *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (n° NP-T-5.1 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA) vise à aider les États Membres dans ce domaine.

régionaux de réacteurs de recherche facilités par l'Agence²¹ aident à renforcer cette coopération et à permettre aux réacteurs de recherche d'élargir leurs communautés de parties prenantes et d'utilisateurs. En outre, l'AIEA a lancé en 2014 un nouveau mécanisme de collaboration, à savoir le centre international s'appuyant sur un réacteur de recherche, désigné par l'Agence.

127. En 2014, l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale, des États-Unis, a poursuivi sa mission visant à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur nucléaire civil. Jusqu'à la fin de 2014, 92 réacteurs de recherche sur 200 en place dans le champ de mise en œuvre de cette initiative avaient été convertis à l'utilisation d'UFE ou confirmés comme à l'arrêt, y compris une installation de production de molybdène 99 qui utilisait de l'UHE. Les grands succès enregistrés comprennent la préparation et le chargement du cœur à l'UFE du réacteur ARGUS, qui a divergé pour la première fois en juillet, et le déchargement du combustible liquide à l'UHE du réacteur FOTON mis à l'arrêt en Ouzbékistan. En 2014, la Chine, le Ghana et l'Agence ont signé un accord pour appuyer la conversion du réacteur de recherche GHARR-1 par le transfert d'UFE. Les conditions techniques ont été clarifiées et un plan d'action a été adopté pour cette conversion et le rapatriement de l'UHE.

128. Les activités de réduction de l'UHE comprennent son rapatriement des réacteurs de recherche dans le pays d'origine où il a été enrichi. À la fin de 2014, le programme de reprise de l'UHE provenant des États-Unis d'Amérique avait atteint 76 % de ses objectifs avec l'enlèvement de presque 1 300 kg de combustible neuf ou usé à l'UHE de réacteurs de recherche. Le programme de reprise de la Russie est achevé à 86 %, avec l'enlèvement de 2 140 kg de combustible neuf ou usé à l'UHE de réacteurs de recherche. À la suite de la conversion du réacteur de recherche Maria de la Pologne à l'UHE, 53 kg de combustible usé à l'UHE ont été réexpédiés en Fédération de Russie en septembre. Au Kazakhstan, 10,2 kg d'UHE neuf et 37,3 kg d'UHE usé de l'installation WWR-K à Alatau (en cours de conversion de l'UHE à l'UFE) ont été rapatriés en Fédération de Russie (fig. C-4.).



FIG. C-4. Scellés de contrôle de l'Agence sur un conteneur de transport TK-S16 (à gauche). Conteneurs de transports préparés pour le vol d'Almary (Kazakhstan) en Fédération de Russie (à droite).

129. La conversion à l'utilisation de l'UFE et le rapatriement de l'UHE sont souvent suivis d'importantes mises à niveau de l'infrastructure. Par exemple, l'Initiative sur les utilisations pacifiques de l'Agence est en train de financer un vaste programme de modernisation au réacteur de recherche TRIGA Mark III au Mexique.

²¹ L'Agence a constitué plusieurs regroupements de réacteurs de recherche dans les régions suivantes : Baltique, Caraïbes, Afrique centrale, Asie centrale, Europe orientale, et Méditerranée, ainsi que dans la Communauté d'États indépendants.

130. Des combustibles avancés de très haute densité à l'uranium et au molybdène actuellement en cours d'élaboration sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et à haute performance. Bien que des progrès sensibles aient été accomplis dans ce domaine, des efforts et des essais supplémentaires, notamment dans le cadre de programmes d'irradiation et d'examen après irradiation et en ce qui concerne les techniques de fabrication, s'avèrent nécessaires pour assurer l'approvisionnement commercial en combustibles à l'UFE qualifiés. En novembre, la société de combustible TVEL de la Fédération de Russie a signé un contrat pour commencer à fournir du combustible à l'UFE au réacteur à haut flux des Pays-Bas.

131. Certes, il n'y a pas eu de sérieuses pénuries de molybdène 99 en 2014, mais les problèmes d'exploitation ont continué dans les installations de traitement et les réacteurs de recherche plus anciens. En raison de changements de la demande, de gains d'efficacité, et d'une certaine diversification de l'offre, les faibles pénuries observées n'ont pas entraîné de crise de l'ampleur observée entre 2007 et 2010. La conversion des processus de production d'isotopes médicaux de l'UHE à l'UFE se poursuit, et l'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (ANSTO) et la société sud-africaine NTR Radioisotopes restent les principaux fournisseurs de molybdène 99 sans UHE. En 2014, l'ANSTO a préparé le terrain pour sa nouvelle installation de production de molybdène 99, laquelle devrait augmenter de 1 000 à 3 000 curies à six jours de molybdène 99 à base d'UFE par semaine. La société NTP Radioisotopes poursuit la conversion de ses processus en vue de l'utilisation exclusive d'UFE. Deux autres grands producteurs d'isotopes médicaux, l'Institut des radioéléments en Belgique et Mallinckrodt aux Pays-Bas, ont commencé des efforts pour appuyer la conversion de leur production d'échelle commerciale de l'utilisation de l'UHE à celle de l'UFE.

D. Recours aux techniques nucléaires pour améliorer la santé animale

132. Les technologies nucléaires et connexes jouent un rôle important dans la santé animale, notamment en ce qui concerne le diagnostic des maladies et la caractérisation des organismes pathogènes. Le présent document examine ici comment et dans quels domaines les technologies nucléaires, aussi bien non isotopiques qu'isotopiques, ont eu un impact dans le passé et devraient en avoir à l'avenir.

D.1. Recours aux vaccins irradiés pour protéger le bétail contre les maladies animales transfrontière

133. La vaccination est un outil essentiel de protection des populations animales et humaines contre les maladies potentiellement mortelles. La plupart des vaccins sont basés sur une certaine forme d'atténuation ou d'inactivation des pathogènes, avec des méthodes chimiques ou physiques, et le maintien, dans un cas comme dans l'autre, de l'immunogénicité en vue d'induire des réponses immunitaires de protection. En règle générale, les vaccins vivants atténués induisent une protection améliorée et d'un niveau plus élevé que les vaccins inactivés, car le processus d'inactivation détruit certaines des protéines importantes pour l'induction d'une bonne immunité.

134. L'irradiation peut remplacer le traitement chimique ou physique dans l'élaboration des vaccins. Elle peut être utilisée de manière à détruire ou à affaiblir progressivement l'acide nucléique du génome du pathogène tout en conservant ses propriétés d'antigène et ainsi déclencher une meilleure réponse immunitaire chez l'hôte. Les progrès récents enregistrés dans l'élaboration des vaccins

irradiés ont montré que l'on peut obtenir des micro-organismes métaboliquement actifs mais non répliquants et capables de stimuler une réponse immunitaire similaire à celle de l'exposition au pathogène vivant. Une culture purifiée de pathogènes vivants, refroidis ou congelés, est placée dans un irradiateur et exposée conformément à un programme stipulant un intervalle de temps et un niveau d'énergie spécifiques. Par exemple, pour un organisme de trypanosomose, on utilise un niveau d'énergie de ~100 Gy. La solution de pathogènes irradiés est ensuite mélangée à des cryoprotecteurs pour la stabiliser au cours du processus de lyophilisation avant son utilisation comme candidat vaccin²².



FIG. D-1. Irradiation de cultures *in vitro* de trypanosomes (*T. evansi*) avec une source de rayons X.

135. Les pathogènes sont généralement irradiés avec des sources au cobalt 60, mais on peut aussi utiliser des rayons X et des faisceaux d'électrons. La dose varie en fonction du pathogène. Les études ont montré que le troisième stade larvaire des parasites *Haemonchus contortus* et *Strongylus colubriformis* atténué par l'exposition à 600 et 700 Gy respectivement protégeait les ovins contre les infections de ces parasites²³. Il faut une dose plus faible (400 Gy) pour le strongle pulmonaire *Dictyocaulus viviparus*, sinon le trématode ne peut migrer dans les poumons pour commencer à induire une immunité de protection²⁴. Les bactéries *Brucella* peuvent être atténuées avec 3 000 Gy²⁵,

²² Duxbury RE, Anderson JS, Welde BT, Sadun EH, Muriithi IE (1972a). *Trypanosoma congolense*: Immunization of mice, dogs, and cattle with gamma-irradiated parasites. *Experimental Parasitology*, 32:527-533.

²³ Sivanathan S, Duncan JL, Urquhart GM (1984). Some factors influencing the immunisation of sheep with irradiated *Haemonchus contortus* larvae. *Veterinary Parasitology*, 16:313-23.

²⁴ Winter MD, Wright C, Lee DL (2000). Vaccination of young lambs against infection with *Nematodirus battus* using gamma irradiated larvae, *International Journal of Parasitology*, 30: 1173-1176.

²⁵ Dabral N, Martha-Moreno-Lafont, Sriranganathan N, Vemulapalli R (2014) Oral Immunization of Mice with Gamma-Irradiated *Brucella neotomae* Induces protection against Intraperitoneal and Intranasal Challenge with Virulent *B. abortus* 2308. *PLoS One* 9(9): e107180. doi:10.1371/journal.pone.0107180.

celles du genre *Pasteurella* avec 6 000 Gy²⁶ et *Bacillus anthracis* avec 20 000 Gy²⁷. En ce qui concerne les virus, il faut des doses plus élevées pour modifier leurs protéines et leur structure. Le virus de la fièvre aphteuse est inactivé avec 40 000 Gy²⁸ et celui de la fièvre catarrhale du mouton avec 60 000 à 100 000 Gy²⁹.

D.2. Recours aux techniques nucléaires pour le diagnostic précoce et rapide des maladies animales transfrontière et des zoonoses

136. Le diagnostic précoce et rapide est crucial pour la lutte contre les maladies transfrontière. Les tests diagnostiques sont effectués sur des échantillons de l'hôte (sang, sérum, tissus et sécrétions) pour détecter les pathogènes ou les anticorps. Le radiomarquage a joué un rôle important dans l'amélioration des tests diagnostiques des maladies pratiqués pour déterminer les pathogènes ou leurs antigènes ou anticorps (protéines provenant de l'exposition aux antigènes d'un pathogène).

137. Auparavant, on avait recours, pour détecter une maladie à partir d'un échantillon, à des immunodosages utilisant l'ADN radiomarké ou des protéines d'un pathogène particulier comme antigène pour déclencher une réponse immunitaire. Ces dosages étaient effectués principalement dans des laboratoires qualifiés, mais au fur et à mesure que les enzymes et les colorants fluorescents ont remplacé le marquage isotopique, ces tests ont été largement étendus sur le terrain. L'utilisation d'enzymes et de colorants fluorescents est certes pratique, mais elle n'a jamais permis d'atteindre le niveau élevé de spécificité et de sensibilité observé avec les radio-isotopes. Lorsque les niveaux de sensibilité et de spécificité doivent être élevés (par exemple, pour diagnostiquer la grippe aviaire H5N1, la fièvre aphteuse, la fièvre de la vallée du Rift ou la fièvre porcine africaine), le marquage isotopique est une technique de diagnostic précoce et rapide toujours fiable. L'Agence a joué un rôle de pionnier dans l'élaboration de dosages de qualité assurée et bon marché pour le diagnostic d'un certain nombre de maladies infectieuses et parasitaires comme la fièvre aphteuse, la brucellose, la peste bovine, et la trypanosomose.

²⁶ Dauphin LA, Newton BR, Rasmussen MV, Meyer RF, Bowen MD (2008). Gamma Irradiation Can Be Used To Inactivate *Bacillus anthracis* Spores without Compromising the Sensitivity of Diagnostic Assays. *Applied and Environmental Microbiology* 74, 4427-4433.

²⁷ Aloni-Grinstein R, Gat O, Altboum Z, Velan B, Cohen S, Shaffer A (2005) Oral Spore Vaccine Based on Live Attenuated Nontoxinogenic *Bacillus anthracis* Expressing Recombinant Mutant Protective Antigen. *Infection and Immunity* 4043-4053.

²⁸ Motamedi Sedeh F, Khorasani A, Shafae K, Fatolahi H, Arbabi K (2008). Preparation of FMD type A87/IRN inactivated vaccine by gamma irradiation and the immune response on guinea pig. *Indian J. Microbiol.*, 48:326-330.

²⁹ Campbell CH (1985). Immunogenicity of bluetongue virus inactivated by gamma irradiation. *Vaccine*, 3: p401.



FIG. D-2. Le personnel formé de nombreux laboratoires nationaux de diagnostic de maladies utilise des techniques nucléaires et moléculaires dans ces laboratoires dans la lutte contre les maladies animales et les zoonoses.

138. Le diagnostic des maladies infectieuses a connu une amélioration spectaculaire avec l'apparition des technologies de plateforme d'amplification de l'acide nucléique (réaction de polymérisation en chaîne, par exemple). Cela a rendu possibles les diagnostics précoces, rapides et de confirmation des pathogènes hautement infectieux ou de ceux qui étaient difficiles à isoler et à cultiver *in vitro*. La détection de l'acide nucléique a démarré avec le marquage de l'ADN/ARN avec des traceurs comme le soufre 35, la méthionine marquée au soufre 35, le phosphore 35 et le phosphore 32. Son principal avantage est qu'elle permet de détecter des niveaux d'infection extrêmement faibles chez l'animal (par exemple, des sondes préparées à partir de *Haemonchus placei*, *Ostertagia ostertagi*, *Cooperia oncophora*, et *Oesophagostomum radiatum* ont permis de détecter des niveaux aussi bas que 25 œufs dans les échantillons de fèces de caprins, d'ovins et de bovins infectés)³⁰. Cela permet de détecter un pathogène avant l'apparition de la maladie.

139. Des méthodes issues des techniques nucléaires sont utilisées dans la lutte contre les épidémies actuelles de fièvre Ebola en Afrique occidentale. L'Agence a lancé un projet comportant trois composantes pour appuyer la création de capacités, la prévention et la détection précoce, et améliorer les outils diagnostiques existants. La première composante est la fourniture d'un appui technique et sous forme de matériel et de réactifs/consommables aux équipes de diagnostic déjà établies sur le terrain. La deuxième composante ciblera la nature de la zoonose due à la fièvre Ebola et l'interface entre les populations animale (sauvages) et humaine, afin de prévenir le passage du virus d'animaux porteurs naturels à la population humaine, et de permettre la détection précoce de ce virus. La troisième composante portera sur les réseaux de laboratoires officiels de diagnostic travaillant sous les autorités vétérinaires et/ou de santé publique. Cela nécessitera l'utilisation adaptative ou l'amélioration des outils diagnostiques existants pour assurer la qualité de la détection précoce, rapide, sensible et spécifique et le traçage de la fièvre Ebola. Cet ensemble de mesures exhaustives aidera les pays exposés à gérer les épidémies actuelles et à intervenir rapidement en cas de menace future de la fièvre Ebola.

³⁰ Höglund J, Engström A, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Tydén E (2013). Real-time PCR detection for quantification of infection levels with *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora* in cattle faeces. *Veterinary Parasitology*, 197: 251-257

D.3. Recours aux techniques nucléaires pour le traçage et la surveillance des maladies animales transfrontière et des zoonoses

140. Dans un monde où les mouvements d'animaux ou de leurs produits sont fréquents et où les changements environnementaux dus au changement climatique peuvent potentiellement influencer la propagation des maladies infectieuses et de leurs vecteurs, il est essentiel d'avoir des technologies permettant de déterminer l'origine géographique de ces maladies et, si nécessaire, de fournir des informations sur les habitudes alimentaires et les mouvements associés de leurs vecteurs. La technique d'analyse des isotopes stables peut être utilisée pour fournir les moyens de comprendre l'épidémiologie des maladies. Ces isotopes sont les formes naturelles d'éléments qui ne subissent pas de décroissance radioactive. Il en existe plus de 250, mais seuls quelques-uns d'entre eux interviennent dans les processus biologiques et environnementaux importants. Les isotopes sont mesurés par spectrométrie de masse sur la base des différences par rapport aux normes internationales et exprimés sous forme de rapports en unités delta (δ) en parties pour mille. La valeur de la technique d'analyse des isotopes stables repose sur la forte corrélation entre les niveaux de certains isotopes dans l'environnement et la concentration de ceux-ci dans les tissus animaux.

141. Les rapports entre l'hydrogène ($\delta^2\text{H}$) et l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) dans les tissus animaux servent à étudier les mouvements des animaux car ils reflètent précisément ces mouvements entre différents habitats trophiques tels que les lacs, les fleuves, les océans et les eaux souterraines. On utilise les isotopes stables pour caractériser une population en examinant les signatures isotopiques de quelques individus représentatifs de l'ensemble de la population. Des études en cours depuis plusieurs années utilisent des isotopes stables pour caractériser et différencier les populations animales (en particulier les oiseaux) à l'aide des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ déterminées dans les tissus métaboliquement actifs (sang et muscles), mais les traceurs les plus efficaces semblent aujourd'hui être les isotopes de l'hydrogène présents dans les tissus métaboliquement inertes qui se renouvellent de manière saisonnière comme les plumes, le bec et les griffes. Les plumes conservent cette information jusqu'à leur remplacement ou jusqu'à la mue, survenant généralement une fois par an. Au contraire, les griffes poussent continuellement et peuvent en théorie fournir un profil temporel intégré en fonction de leur rythme de croissance. Une fois que le profil isotopique d'une population particulière d'oiseaux est connu, tout individu de cette population peut fournir des informations sur les migrations mondiales de cette espèce.



FIG. D-3. L'analyse des isotopes stables aide à déterminer le rôle des oiseaux migrateurs dans la propagation du virus de la grippe aviaire entre les continents.



FIG. D-4. Administration d'un vaccin sous forme de gouttes ophtalmiques à un poulet.

E. Progrès en dosimétrie des rayonnements en milieu médical

142. L'utilisation des rayonnements ionisants à des fins médicales est bien établie. En radiothérapie, les rayonnements servent à détruire les cellules malignes, ce qui fait de la dose de rayonnements délivrée au volume cible l'outil de traitement des patients. En imagerie médicale, les rayonnements sont utilisés pour produire des images diagnostiques, et toute dose fournie au patient est juste un effet secondaire inévitable. Les principes et les objectifs fondamentaux de la radiothérapie et du diagnostic sont certes sensiblement différents, mais la connaissance de la dose de rayonnements revêt dans tous les cas une importance primordiale, soit pour vérifier que le traitement est administré comme prescrit, soit pour estimer le risque lié à l'exposition d'un patient aux rayonnements au cours d'une procédure d'imagerie médicale.

E.1. Imagerie médicale

E.1.1. Dosimétrie des patients en radiologie diagnostique

143. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a souligné que l'exposition médicale, notamment la radiologie diagnostique, est de loin la plus grande source artificielle d'exposition aux rayonnements ionisants, et continue d'augmenter rapidement³¹. Cela s'explique principalement par le nombre élevé d'examens radiographiques effectués, et l'utilisation parfois inappropriée de techniques complexes faisant appel à de fortes doses, comme la tomodensitométrie (CT).

144. Il importe donc non seulement de surveiller et de contrôler les doses aux patients, mais aussi d'optimiser la conception et la performance des systèmes d'imagerie par rayons X. La dosimétrie des patients, qui relève d'abord et avant tout de la responsabilité du physicien médical spécialisé en radiologie diagnostique, a été introduite dans la législation et les réglementations nationales de nombreux pays. Les mesures dosimétriques sont nécessaires en radiologie diagnostique pour l'établissement et l'utilisation de niveaux indicatifs en vue de l'évaluation de la performance du matériel, et de l'évaluation comparative des risques.

145. L'imagerie diagnostique aux rayons X est utilisée dans de nombreux types d'examens, de la radiographie à projection simple à l'imagerie dynamique transversale avancée. Cela s'est traduit par

³¹ Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) pour 2008 sur les sources et les effets des rayonnements ionisants, ONU, New York, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html.

l'élaboration d'un large éventail de grandeurs dosimétriques, d'instruments et de techniques de mesure, qui présentent tous des difficultés pour ceux qui travaillent dans l'environnement clinique.

146. D'une manière générale, on peut diviser les grandeurs utilisées en radiologie diagnostique en deux grandes catégories :

i) les grandeurs spécifiques d'applications, qui sont des grandeurs dosimétriques pratiques qui peuvent être mesurées directement et pourraient être adaptées à des situations ou des modalités spécifiques. Elles comprennent le kerma de l'air incident, le produit du kerma de l'air par la surface (utilisé principalement pour l'imagerie de projection) et les indices du kerma de l'air en CT, pour l'imagerie transversale (fig. E-1.).

ii) les grandeurs liées au risque, qui peuvent être utilisées pour estimer le détriment ou le risque radiologique et sont donc des mesures de la dose absorbée. Elles ne peuvent pas être mesurées directement et ne sont déduites que par calcul des grandeurs spécifiques d'applications ou par le biais de modèles appropriés.



FIG. E-1. Mesure de doses en CT dans un fantôme classique en polyméthacrylate de méthyle simulant le corps humain et dans l'air.

147. En fonction de la modalité diagnostique et du type de mesure de dose nécessaires, on peut utiliser plusieurs types de dosimètres, pourvu qu'ils aient la sensibilité et la réponse en énergie appropriées, mais en règle générale, on utilise des chambres d'ionisation de quelques centimètres cubes de volume, ou des détecteurs d'état solide spécialement conçus pour ces mesures. D'autres types de détecteurs fréquemment utilisés en radiologie diagnostique sont les films (radiographiques ou radiochromiques), les dosimètres thermoluminescents et les dosimètres à luminescence stimulée optiquement.

148. Le travail de l'Agence dans ce domaine est centré sur l'harmonisation et la standardisation des normes relatives aux patients pour application en milieu hospitalier.

E.1.2. Dosimétrie interne en médecine nucléaire

149. Les applications cliniques de la médecine nucléaire comprennent l'imagerie diagnostique et les traitements thérapeutiques. En médecine nucléaire diagnostique, la dosimétrie interne vise à mesurer les doses reçues par des organes sains, alors qu'en radiothérapie moléculaire, elle sert d'outil pour l'établissement des doses absorbées par les tumeurs et les organes exposés.

150. Les procédures diagnostiques de médecine nucléaire permettent de réaliser l'imagerie fonctionnelle des tissus normaux et malades, les applications les plus fréquentes étant la localisation des tissus malins et l'évaluation de la perfusion myocardique. La quantité de radioactivité administrée aux patients est généralement faible et les avantages diagnostiques de la procédure d'imagerie dépassent largement ses risques. Toutefois, les doses aux tissus et les risques stochastiques devraient être mesurés pour chaque patient et mis dans le contexte des valeurs cumulatives reçues par celui-ci

pendant plusieurs sessions d'imagerie ou dans le cadre d'autres procédures d'imagerie diagnostique (par exemple CT, fluoroscopie). La quantité d'activité administrée doit donc être optimisée afin de maximiser la qualité diagnostique de l'image tout en réduisant au minimum le risque pour le patient. Cela est particulièrement important pour les patients pédiatriques en raison des radiosensibilités accrues de leurs organes et du fait que les effets stochastiques pourraient se manifester après un nombre plus élevé d'années.

151. En médecine nucléaire thérapeutique, les agents radioactifs sont utilisés pour traiter diverses formes de cancer et d'autres maladies. Alors qu'en radiothérapie externe la dose de rayonnements fournie à l'organe ou au tissu cible est prescrite et qu'un système de planification de traitement est utilisé pour planifier précisément la dose prescrite pour chaque patient, en médecine nucléaire thérapeutique, aucun processus personnalisé de ce genre n'est appliqué. Ici, l'activité administrée au patient est déterminée par le type de tumeur traité (par exemple, 150 millicuries d'iode 131 pour le cancer de la thyroïde). En général, il n'y a pas d'évaluation avant le traitement et les doses reçues par les tissus cibles et les organes exposés ne sont pas optimisées, ce qui conduit dans la majorité des cas au sous-traitement des patients. Cela s'explique entre autres par le manque d'une part de formation, de ressources et de méthodes normalisées basées sur une prescription de doses pour la tumeur, d'autre part de données sur les relations entre la dose administrée et la réponse tumorale. Cette situation est en train de changer lentement et la communauté scientifique est de plus en plus consciente de l'importance cruciale d'une dosimétrie spécifique au patient pour une efficacité optimale et la sûreté du patient.

152. En dosimétrie interne, les doses absorbées par les tissus (quantité d'énergie provenant des rayonnements ionisants absorbée par unité de masse de tissus) sont généralement évaluées en fonction de la méthode médicale de dose de rayonnements interne. Cette méthode nécessite le calcul de l'activité cumulée (nombre total de désintégrations au cours du temps) pour chaque organe source où le radiopharmaceutique est absorbé. Elle nécessite aussi l'attribution de « valeurs S » (dose absorbée aux tissus cibles par désintégration dans chaque tissu source), basées sur des fantômes anatomiques de référence acceptés sur le plan international (fig. E-2.).

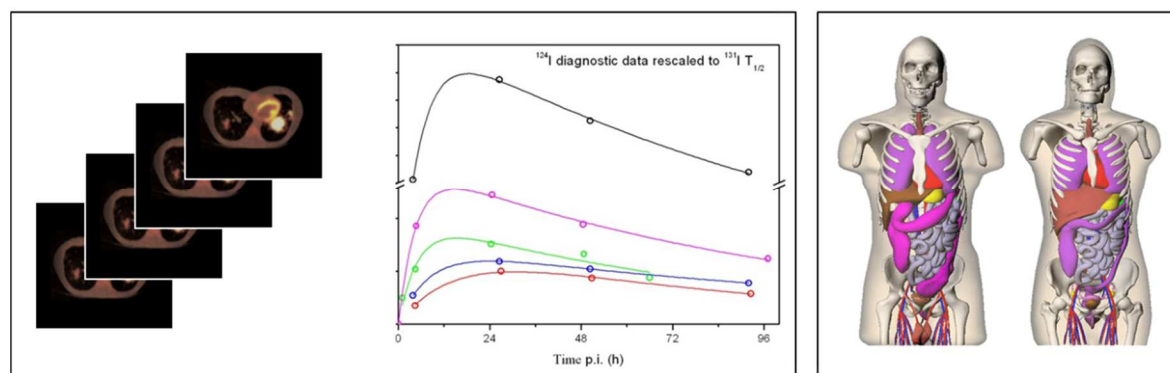


FIG. E-2. À gauche : Série d'images et de courbes temps-activité correspondantes pour différents organes sources. À droite : exemple de fantômes mathématiques utilisés pour le calcul des valeurs S.

E.2. Radiothérapie

153. Des normes et des procédures dosimétriques de référence homogènes sont absolument essentielles dans le processus de radiothérapie. En ce qui concerne la dosimétrie externe, les normes relatives à la dose absorbée dans l'eau ont été presque universellement adoptées, à travers des codes de pratique comme le rapport intitulé *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water* (collection Rapports techniques, n° 398, AIEA, 2000), en dosimétrie par les rayons X de haute énergie pour les accélérateurs linéaires médicaux et les appareils au cobalt 60. Toutefois, on a enregistré

récemment une hausse de l'utilisation des techniques de radiothérapie basées sur les petits champs, comme diverses formes de radiothérapie stéréotaxique, de radiothérapie stéréotaxique corps entier, de radiochirurgie stéréotaxique et de radiothérapie avec modulation d'intensité. Cette évolution a augmenté l'incertitude de la dosimétrie clinique et amène à se demander s'il est approprié d'appliquer dans ce domaine les protocoles de référence en dosimétrie existants pour la radiothérapie classique tels que ceux de la publication n° 398 de la collection Rapports techniques. Il y a eu dans certains cas des accidents regrettables dus à l'utilisation de méthodes et de procédures adéquates pour les grands champs mais inadéquates pour les petits champs. Un code de bonnes pratiques relatif à la dosimétrie des petits champs de photons statiques, qui permettra de normaliser celle-ci, est en cours d'élaboration.

154. Depuis la publication du rapport n° 398 de la collection Rapports techniques, de nombreux systèmes de fourniture de faisceaux de particules ont été mis au point pour la radiothérapie, tels que ceux ayant trait aux faisceaux de protons et d'ions lourds. Ces systèmes permettent d'améliorer le traitement de la tumeur sans augmenter les dommages aux tissus normaux. Des codes de pratique sont en train d'être élaborés pour promouvoir la précision de ces faisceaux.

155. Les enceintes à puits étalonnées sont les dosimètres préférés pour l'étalonnage des sources radioactives utilisées en curiethérapie. Cependant, il n'y a pas de lignes directrices harmonisées au niveau international en vue de l'assurance/du contrôle de la qualité pour toutes les sources utilisées en curiethérapie ainsi que pour les instruments de dosimétrie connexes recommandés. Bon nombre de cliniques n'ont pas de matériel étalonné ou de procédures internes concernant les redondances, ni un accès pratique aux comparaisons interlaboratoires indépendantes. En conséquence, une série de méthodologies sont utilisées pour déterminer la force de la source. Des efforts sont en cours pour établir des normes de dose absorbée dans l'eau en vue de l'harmonisation avec les codes de pratique de dosimétrie en radiothérapie externe, notamment ceux du rapport n° 398 de la collection Rapports techniques.

F. Faits nouveaux dans le domaine des radiopharmaceutiques

156. Les progrès en médecine nucléaire reposent sur des méthodes de production efficaces de nouveaux radionucléides. Des progrès impressionnants ont été accomplis dans la mise au point de technologies de production de radio-isotopes, comme l'a montré l'introduction récente de cyclotrons à haute énergie et à courant élevé. Cela a permis d'augmenter l'accès à un certain nombre de nouveaux radionucléides, y compris le gallium 68, le cuivre 64, le zirconium 89 et le zinc 63, et aussi facilité la mise au point de technologies faisant appel aux accélérateurs pour la production à des fins commerciales de technétium 99m, qui reste encore le radionucléide le plus largement utilisé pour les diagnostics. La disponibilité des nouveaux radio-isotopes pour les applications médicales pourrait résoudre des problèmes cliniques imprévus jusqu'ici. Ces avancées sont en train de changer radicalement le visage de la médecine nucléaire.

F.1. Progrès des technologies de production

157. Les améliorations récentes de la technologie des cyclotrons sont en train d'accroître les rendements de la production des principaux radionucléides médicaux, permettant ainsi d'étendre leur utilisation clinique. Un problème majeur en ce qui concerne les applications médicales des radiopharmaceutiques est d'assurer un approvisionnement constant de radio-isotopes clés, lesquels constituent des éléments essentiels de ces agents diagnostiques et thérapeutiques. Comme expliqué ci-dessous, de nouveaux radiopharmaceutiques obtenus à partir de divers radionucléides sont en train

de démontrer des propriétés extrêmement prometteuses pour le diagnostic et le traitement du cancer. Toutefois, la disponibilité de ces importants radio-isotopes est actuellement limitée par les faibles rendements de leur production lorsqu'ils sont obtenus à l'aide de cyclotrons médicaux à basse énergie et à faible courant. Un autre problème est la mise à l'arrêt attendue de réacteurs nucléaires qui assurent l'approvisionnement en technétium 99m – un radio-isotope qui joue encore un rôle fondamental dans le diagnostic en imagerie nucléaire – dans le monde.

158. La technologie des cyclotrons telle qu'elle est utilisée dans la production de radionucléides médicaux est aujourd'hui parvenue à maturité. Les énergies de protons disponibles des cyclotrons commerciaux vont actuellement de 6 MeV à 70 MeV. D'importants progrès ont été accomplis avec l'augmentation constante du courant des protons dont le niveau peut atteindre 750–800 μ A. Les flux de courant à haute intensité permettent de surmonter les limites de rendement de la production de radionucléides dues aux faibles valeurs des sections transversales pour les interactions des protons. Ils ont stimulé d'importantes avancées dans la technologie d'assemblage de cibles solides capables de dissiper efficacement l'importante chaleur produite par ces courants à haute intensité. Ces nouvelles réalisations technologiques permettront d'augmenter la production de certains radionucléides essentiels comme le gallium 68, le strontium 82, le technétium 99m, etc., et d'en étendre l'offre.

159. Les interruptions, partout dans le monde, de l'approvisionnement en molybdène 99 (Mo-99), le radionucléide précurseur du technétium 99m (Tc-99m), le radionucléide diagnostique le plus largement utilisé, ont accéléré la recherche d'autres sources de technétium 99m. En remplacement, des solutions faisant appel à des accélérateurs linéaires et à des cyclotrons ont été envisagées. À la différence de la production ordinaire par fission de Mo-99 dans un réacteur à l'aide de cibles à l'uranium, ces technologies utilisent des cibles au molybdène 100 (Mo-100). Un accélérateur linéaire peut être utilisé pour produire du Mo-99 par transmutation de Mo-100 enrichi tandis que les cyclotrons peuvent être utilisés pour produire directement du Tc-99m en irradiant du Mo-100. Ces technologies présentent un avantage environnemental et économique important car elles produisent peu de déchets et des projets ont démontré une efficacité de l'ordre de 90 % en ce qui concerne le recyclage de Mo-100.

F.2. Nouveaux radionucléides et radiopharmaceutiques

160. La présente section décrit les applications prometteuses de radiopharmaceutiques nouvellement découverts, tant pour le diagnostic que pour la thérapie du cancer.

F.2.1. Gallium 68

161. L'importance du gallium 68 ne cesse de croître en tomographie à émission de positons (PET), notamment parce que ce radionucléide peut être aisément produit à partir de générateurs de germanium 68/gallium 68. Le gallium 68 est un émetteur de positons purs avec une demi-vie de 73 minutes. Ces dernières années, quelques radiopharmaceutiques au gallium 68 à base de stomatostatine ont été décrits dans diverses monographies et ont acquis une reconnaissance comme agents diagnostiques établis pour les tumeurs neuro-endocriniennes. Cette catégorie de traceurs destinés à ces tumeurs reste encore le seul exemple de radiopharmaceutiques au gallium 68 acceptés sur le plan clinique, mais il y a de nombreuses études sur l'élaboration de nouveaux agents pour le diagnostic d'autres types de cancer. Par exemple, un traceur a été décrit récemment pour l'imagerie des tumeurs de la prostate. La structure de ce radiopharmaceutique est particulièrement simple. Il est composé d'un ion de gallium 68 lié à un ligand portant un inhibiteur d'antigène membranaire prostatique spécifique (PSMA). Ce nouveau ligand de ciblage du PSMA a été étudié pour la première fois en association avec le technétium 99m puis modifié encore pour préparer le dérivé du gallium 68 correspondant. Des résultats extrêmement prometteurs ont été obtenus dans un certain nombre d'essais

cliniques en cours sur des patients souffrant du cancer de la prostate pour démontrer pleinement l'efficacité diagnostique et la sensibilité de ce nouveau radiopharmaceutique. Les données disponibles indiquent clairement que ce nouvel agent peut permettre de détecter les rechutes et les métastases du cancer de la prostate avec un contraste sensiblement plus élevé qu'avec la choline marquée au fluor 18, qui est le traceur traditionnellement utilisé pour l'imagerie de ces tumeurs.

F.2.2. Cuivre 64

162. Il est difficile de trouver de nouveaux radiopharmaceutiques diagnostiques et thérapeutiques efficaces en raison de la complexité du système biologique humain. Toutefois, il arrive parfois qu'on fasse des découvertes inattendues, comme lorsqu'on s'est aperçu que le cuivre 64, dans sa forme chimique la plus simple d'ions de cuivre(II), s'accumule quantitativement dans des tumeurs diverses, y compris celle de la prostate, les mélanomes, et les cancers du sein et du cerveau. Les ions de cuivre 64 simples peuvent cibler de façon sélective les cellules cancéreuses sans avoir besoin d'être liés à un vecteur biologique.

163. Le cuivre est un élément en trace essentiel nécessaire pour l'activité d'un certain nombre de métalloenzymes. Certaines anomalies tissulaires et certaines conditions morbides ont été associées chez les êtres humains à des taux soit réduits, soit élevés de cuivre. Les niveaux de cuivre du sérum sont élevés chez les patients cancéreux et sont corrélés avec la sévérité de la maladie et la réponse aux thérapies. Des preuves expérimentales démontrent que les niveaux de cuivre biodisponible modulent la croissance des tumeurs, mais les mécanismes moléculaires et cellulaires par lesquels les ions de cuivre modulent la tumorigénèse dans différents types de cancer restent flous³². En conséquence de ce rôle essentiel qu'ils jouent dans la multiplication des cellules cancéreuses, les ions de cuivre s'accumulent dans le noyau cellulaire au contact immédiat du matériel génétique alors que dans les cellules normales, ils restent stockés dans le cytoplasme. Etant donné que le cuivre 64 décroît par l'émission simultanée de particules positives β^+ et négatives β^- avec une demi-vie de 12,7 heures, on pourrait l'utiliser comme radionucléide à la fois diagnostique et thérapeutique en exploitant sa forte absorption par les tumeurs. Ce double usage d'un même radionucléide est un parfait exemple du concept de « théragnostique »³³ en vertu duquel des vertus thérapeutiques et diagnostiques sont combinées dans un seul agent. Le cuivre 64 peut être facilement produit dans un cyclotron médical classique de faible énergie par irradiation protonique d'une cible solide de nickel 64. Des solutions aqueuses stériles de sel de chlorure de cuivre 64 ont été récemment approuvées comme précurseurs

³² Ishida S., Andreux P., Poitry-Yamate C., Auwerx J., Hanahana D. (2013) Bioavailable copper modulates oxidative phosphorylation and growth of tumors, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. vol 110 no. 48. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318431110

³³ Une approche théragnostique met en jeu un test diagnostique pour déterminer si un patient pourrait bénéficier d'un médicament thérapeutique spécifique. L'intérêt suscité actuellement par la théragnostique vient de son approche révolutionnaire qui pourrait permettre d'améliorer le choix de thérapies sur la base de caractéristiques moléculaires spécifiques de la maladie, ce qui ouvrirait de nouvelles voies à une surveillance objective des réponses thérapeutiques. Les producteurs d'images utilisent des méthodes permettant la visualisation non invasive de la physiologie grâce à des modalités de caractérisation des pathologies anatomiques, biochimiques et fonctionnelles. La médecine nucléaire a pratiqué cette forme de procédures diagnostiques et thérapeutiques pendant des décennies, en exploitant l'utilisation initiale de l'iode radioactif, qui est peut-être le tout premier agent de théragnostique moléculaire basée sur l'imagerie. L'imagerie à l'aide d'iode 123 émetteur γ et une thérapie associée avec de l'iode 131 émetteur β ont été la pierre angulaire d'une thérapie d'adjuvant pour les cancers de la thyroïde différenciés. Il existe de nombreux exemples de techniques associant l'imagerie moléculaire et la thérapie avec des radiopharmaceutiques qui sont sélectifs pour des processus biologiques, comme la prolifération cellulaire, la synthèse de stéroïdes, l'expression du récepteur du facteur de croissance, la production de catécholamine, l'expression génique induite par l'hypoxie ou l'apoptose. En résumé, on peut dire que l'approche théragnostique pourrait fournir un paradigme attractif pour l'élaboration future d'applications médicales de radionucléides en raison de sa capacité intrinsèque d'exploiter l'imagerie in vivo qui pourrait produire d'utiles informations pharmacocinétiques et de biodistribution sur la présence de cibles moléculaires appropriées en vue d'une thérapie plus fondamentale et plus efficace.

pharmaceutiques pour la préparation de radiopharmaceutiques au cuivre 64. Après la découverte du ciblage sélectif inattendu des cellules cancéreuses par les ions de cuivre 64, ces solutions sont actuellement utilisées dans divers essais cliniques visant à évaluer l'efficacité à la fois diagnostique et thérapeutique du chlorure de cuivre 64 pour le traitement de divers types de tumeurs et, en particulier, des mélanomes, du cancer du sein et des carcinomes de la prostate.

F.2.3. Zirconium 89

164. L'utilisation d'anticorps radiomarqués comme sondes en imagerie pour visualiser les tumeurs a toujours été un domaine de recherche prometteur en imagerie moléculaire. En particulier, la mise en œuvre de la PET avec des anticorps monoclonaux radiomarqués est une méthode non invasive attractive de détection des tumeurs et de planification du traitement. Seuls quelques-uns des radionucléides utilisés en PET sont appropriés pour le marquage des anticorps dans la mesure où il faut, pour l'imagerie avec ces anticorps, que le radio-isotope soit lié à l'anticorps monoclonal radiomarqué avec une bonne stabilité *in vivo* et que sa demi-vie de désintégration concorde avec la pharmacocinétique de cet anticorps. Le zirconium 89 suscite actuellement beaucoup d'intérêt pour le marquage des anticorps parce que sa demi-vie physique, qui est de 3,3 jours, est compatible avec le temps nécessaire pour avoir des rapports tumeur-fond optimaux pour des anticorps monoclonaux radiomarqués intacts (généralement quelques jours).

165. Il décroît en émettant des positons et en captant des électrons, et l'énergie maximum de son émission de positons donne des images par PET ayant une bonne résolution spatiale. On peut produire le zirconium 89 dans un cyclotron médical en bombardant une feuille d'yttrium naturel bon marché fixée sur un disque en aluminium/cuivre avec un faisceau de protons de 14 à 14,5 MeV d'énergie.

166. À ce jour, divers anticorps monoclonaux radiomarqués ont été marqués avec du zirconium 89 et plusieurs d'entre eux sont entrés en phase d'études cliniques avec des résultats prometteurs. Ce sont notamment le trastuzumab (herceptine) pour l'imagerie du récepteur de type 2 du facteur de croissance de l'épiderme humain, le cétuximab pour l'imagerie des récepteurs du facteur de croissance de l'épiderme, le bévacizumab pour cibler les récepteurs du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire et le MAb J591 pour suivre les récepteurs de l'antigène prostatique spécifique de la membrane³⁴.

F.2.4. Émetteurs alpha

167. Une solution de dichlorure de radium de qualité radiopharmaceutique (le médicament Xofigo produit par Bayer) a été récemment le premier radiopharmaceutique émetteur alpha à être approuvé pour utilisation clinique dans le traitement des métastases osseuses. D'autres radionucléides émetteurs alpha médicalement pertinents et disponibles actuellement pour des applications thérapeutiques potentielles sont l'astatine 211, le bismuth 212, le bismuth 213, l'actinium 225, le radium 223, le plomb 212, le thorium 227 et le terbium 149. Les technologies de production de ces radionucléides vont des réacteurs nucléaires aux cyclotrons en passant par les systèmes de générateurs. Des efforts sont continuellement déployés pour élaborer des méthodes plus simples et plus efficaces de production de radionucléides émetteurs alpha afin de les rendre largement disponibles à des fins d'études. Un autre aspect clé de la recherche sur la thérapie alpha est la nécessité d'établir des procédures chimiques efficaces pour lier le radionucléide alpha à une molécule vecteur choisie. En fait, contrairement aux particules bêta plus légères, la plus grande masse des particules alpha pourrait avoir un impact plus

³⁴Zhang Y1, Hong H, Cai W. (2011) PET tracers based on Zirconium-89. *Current Radiopharmaceuticals* Apr 4(2):131-9.

important sur la stabilité du radioconjugué résultant en solution, ce qui indique qu'il faudrait appliquer des méthodes chimiques robustes pour obtenir un niveau satisfaisant de stabilisation.

G. Les isotopes dans les études climatiques et hydrologiques : évolution et tendances récentes

168. L'eau est une ressource essentielle pour le développement durable dans la mesure où sa disponibilité influe sur presque tous les secteurs d'activité sociale et économique. Dans de nombreux pays, il reste difficile de garantir l'accès à une eau potable sûre ainsi qu'un approvisionnement adéquat en eau douce pour l'assainissement et la production alimentaire et énergétique, ce qui influe sur la vie de milliards de personnes. Toutefois, on ne comprend pas bien les variations de la disponibilité de l'eau douce, et les estimations de la quantité totale d'eau disponible dans les fleuves, les lacs et les aquifères, et celles de sa rétention et de son écoulement varient. On s'attend à ce que le changement climatique influence les cycles locaux et régionaux de l'eau, ce qui rendra nécessaire une meilleure évaluation des ressources disponibles à différentes échelles temporelles et spatiales. Il faut des informations hydrologiques fiables pour l'adoption de politiques judicieuses permettant de gérer avec succès les disponibilités en eau à la lumière du changement climatique et de la baisse de la quantité d'eau disponible par personne.

169. L'évaluation et la gestion des ressources en eau nécessitent des méthodes multidisciplinaires fondées scientifiquement, basées sur les sciences physiques et sociales qui doivent être fermement appuyées par des données scientifiques sur l'existence, la répartition et les mouvements des eaux de surface et des eaux souterraines. Les isotopes naturels stables et les radio-isotopes de l'eau et leurs constituants dissous sont de puissants outils de suivi des processus du cycle de l'eau, y compris l'origine et les trajectoires de l'eau de pluie et de la fonte des neiges qui coulent dans les aquifères, les lacs et les fleuves ainsi que les interactions hydrauliques entre ces corps d'eau. Les « empreintes » isotopiques présentes dans l'eau aident à évaluer et à gérer rapidement, économiquement et efficacement les ressources en eau et à démontrer comment l'eau joue un rôle dans le changement climatique et est influencée par celui-ci.

G.1. Le cycle de l'eau et le changement climatique

170. Une compréhension et une caractérisation judicieuses des processus atmosphériques à l'origine du changement climatique, et une meilleure quantification des flux d'eau du cycle de l'eau, sont essentielles pour l'évaluation de la disponibilité de l'eau. Les isotopes stables des précipitations et des eaux de surface ont été utilisés pendant des décennies pour déchiffrer et quantifier les processus hydrologiques, étudier la circulation atmosphérique, valider les modèles climatiques et simuler les conditions climatiques actuelles et passées. Au départ, la nécessité de comprendre la migration des retombées atmosphériques des essais nucléaires des années 1950 et 1960 a permis de recueillir des informations sans précédent pour les processus hydrologiques de l'atmosphère. Créé en 1961, le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations (GNIP), qui est administré par l'Agence en coopération avec l'Organisation météorologique mondiale, fournit des données isotopiques clés pour des études en sciences de l'atmosphère, en hydrologie et dans d'autres domaines.

171. Pour permettre de comprendre l'impact du changement climatique sur les précipitations futures, il faut comprendre son impact passé en géologie. Les relations isotopiques dans les précipitations modernes, déduites des données du GNIP, sont le plus important moyen de caractérisation des changements du cycle de l'eau dans les paléoclimats à l'aide d'archives environnementales telles que

la glace polaire et continentale, les cercles des arbres, les sédiments lacustres et marins, et les eaux souterraines. Les développements récents en matière d'analyse permettent d'accéder plus facilement aux données d'isotopes stables des précipitations et des cours d'eau, ce qui a permis de mettre en place de nombreux nouveaux sites de surveillance, et facilité le développement de la surveillance des isotopes à des échelles temporelles et spatiales plus petites. Des instruments laser plus simples, moins chers et à plus faibles coûts de maintenance contribuent largement au développement des applications basées sur les isotopes stables, et de bon nombre d'hydrologues sont devenus autonomes en ce qui concerne la collecte de leurs propres mesures isotopiques.

172. De nombreuses disciplines scientifiques s'occupant des questions environnementales utilisent des isotopes stables comme traceurs de sources, de processus et d'interactions dans la nature. Pour améliorer encore la capacité de détection et de surveillance des effets du climat sur le cycle de l'eau, l'Agence est en train de mettre sur pied un réseau de surveillance des isotopes dans les cours d'eau. Les données isotopiques des précipitations actuelles et passées offrent ensemble un moyen d'améliorer les modèles climatiques mondiaux utilisés pour prédire les effets des changements climatiques futurs.

G.2. Évaluation et gestion des ressources en eau

173. Des estimations plus précises des ressources en eau disponibles dans les fleuves et les lacs, ainsi que l'ampleur de leurs interconnexions avec les eaux souterraines à l'échelle des bassins sont nécessaires pour une gestion intégrée des ressources en eau. Bien que les eaux souterraines fournissent actuellement plus de la moitié de toutes les ressources en eau douce utilisées dans le monde, il y a peu d'informations fiables sur les eaux souterraines disponibles dans les aquifères peu profonds et profonds dans le monde. L'utilisation des isotopes pour estimer la source et l'âge des eaux souterraines est essentielle, et dans certains cas unique, pour l'évaluation de ces ressources et de leur capacité de renouvellement. Le tritium des eaux souterraines a été utilisé pendant de nombreuses années comme principal traceur hydrologique dans le cas des eaux souterraines rechargées récemment, mais leurs niveaux actuels dans ces eaux sont souvent très faibles, ce qui rend l'interprétation quantitative difficile. Toutefois, lorsque les mesures de tritium sont combinées à celles du produit de sa décroissance radioactive, le gaz rare hélium 3, cette série d'isotopes aide à quantifier la recharge actuelle. Ces informations sont aussi essentielles pour protéger les ressources en eaux souterraines contre la pollution.

174. Compte tenu de la rareté de l'eau, qui n'est pas un problème limité aux régions arides et semi-arides, il faut explorer de nouvelles sources d'eau douce dans des aquifères plus profonds. Dans de nombreux cas, des eaux souterraines rechargées dans le passé dans différentes conditions climatiques sont extraites, mais on sait peu de choses sur la quantité et l'écoulement de ces eaux profondes, probablement fossiles, dont l'âge varie de plusieurs dizaines de milliers d'années à plus d'un million d'années. Dans ces aquifères, la datation isotopique à l'aide de plusieurs indicateurs de l'âge, principalement des radionucléides à longue période et des isotopes de gaz rares tels que le carbone 14, l'hélium 4 et le krypton 81 est le seul moyen d'évaluer ces ressources en eaux souterraines. Alors que le carbone 14 a servi pendant de nombreuses décennies d'indicateur de l'âge de ces eaux, son utilisation est limitée par sa demi-vie (environ 5 700 années) et la géochimie complexe du carbone dans de nombreux aquifères. Les gaz rares tels que le krypton 81, compte tenu de leur nature chimiquement inerte, offrent des avantages comme indicateurs de l'âge, étant donné qu'il n'y a pas d'interaction entre ces isotopes et la matrice géologique de l'aquifère. Les progrès récents dans le domaine des analyses permettent de déterminer précisément quelques atomes de ces isotopes de gaz rares dans les eaux souterraines anciennes, et ainsi d'estimer l'âge de ces eaux jusqu'à un million d'années.

G.3. Orientations futures

175. De nouveaux outils et de nouvelles méthodes isotopiques, associés aux progrès innovants en matière d'analyse, ont contribué ces dernières années au développement considérable de l'utilisation des isotopes de l'environnement dans de nombreuses sciences naturelles, allant des sciences hydrologiques et de l'atmosphère à l'écologie, en passant par la paléoclimatologie. Ces nouveaux développements sont essentiels pour comprendre, suivre et évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et les autres ressources naturelles. En outre, des évaluations exhaustives des ressources en eau reposant sur une base scientifique sont essentielles pour un développement durable. Des instruments laser plus simples, moins chers et à plus faibles coûts de maintenance contribuent largement au développement des applications basées sur les isotopes stables, et bon nombre d'hydrologues sont devenus autonomes en ce qui concerne la collecte de leurs propres mesures isotopiques. En outre, la demande de nouveaux outils isotopiques de datation des eaux souterraines faisant appel à des méthodes analytiques plus sophistiquées pour mesurer les isotopes de gaz rares et les radionucléides à longue période devrait se maintenir dans l'avenir immédiat.

H. Comprendre les changements de l'environnement marin à l'aide des techniques nucléaires

H.1. Recours aux techniques nucléaires pour l'étude des changements de portée mondiale

176. Les techniques nucléaires sont utilisées pour étudier le carbone CO₂ dans l'environnement marin. Les augmentations de CO₂ dans l'atmosphère influent progressivement sur l'environnement marin, en particulier sur l'acidité de l'eau de mer. Les radionucléides offrent de puissants outils pour comprendre les changements du cycle du carbone et leurs effets sur les organismes. Ils peuvent aussi servir à reconstituer les changements de la chimie de l'eau de mer au cours des temps géologiques afin de comprendre les changements actuels et leurs possibles effets futurs sur les océans.

177. Ceux-ci absorbent environ 25 % de toutes les émissions de CO₂ anthropique et jouent donc un rôle important en limitant les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. L'activité biologique incorpore ensuite une fraction de ce CO₂ dans les particules de carbone organique et de carbonate de calcium, qui plus tard coulent dans le cadre d'un processus connu sous le nom de « pompe biologique ». Le radionucléide naturel thorium 234 peut servir à mesurer la vitesse de ce processus d'élimination biologique du CO₂ de la couche supérieure de l'eau des océans. La connaissance de l'ampleur et de la vitesse de ce processus est essentielle pour compléter notre idée du cycle du carbone, et nous aidera à trouver les moyens de réduire l'acidité des océans.

178. Lorsque l'eau de mer absorbe le CO₂, elle s'acidifie, ce qui a un impact sur les organismes marins. Les radio-isotopes servent à étudier les changements des processus des organismes marins, comme la calcification (calcium 45), la biominéralisation (strontium 85), le métabolisme (zinc 65) ou la bioaccumulation des éléments en trace (cobalt 57, cobalt 60, manganèse 54 ou sélénium 75, par exemple) en réponse à cette augmentation de l'acidité. La reconstitution du pH de l'eau de mer au cours des temps géologiques est aussi étudiée à l'aide de la composition isotopique en bore 10 et en bore 11 des massifs coralliens longévifs et cette composition peut, à son tour, servir dans des modèles climatiques prospectifs à estimer les impacts futurs sur les coraux.



FIG. H-1. Expérience sur le recours aux radiotraceurs (calcium 45) pour comprendre l'impact de l'acidification des océans sur les organismes marins.

179. Le dioxyde de carbone et le méthane (CH_4) sont de puissants gaz à effet de serre qui sont recyclés dans l'atmosphère à travers des sources et des puits divers. Ces sources et ces puits peuvent être suivis à l'aide de marqueurs d'isotopes stables, ou « empreintes », présents dans les signatures des isotopes stables du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) des molécules de CO_2 et de CH_4 . On a assisté ces dernières années au développement des analyseurs optiques d'isotopes, qui permettent d'effectuer les mesures précises et exactes nécessaires pour étudier les changements faibles mais dynamiques du CO_2 et du CH_4 dans l'atmosphère. Cela n'est possible que grâce à des mélanges de référence de CO_2 ou de CH_4 de l'air adaptés à leur objet et étalonnés à l'aide de matières de référence internationales pour la mesure d'isotopes stables fournies par l'Agence.

H.2. Recours aux techniques nucléaires pour l'étude des changements environnementaux locaux

180. Un large éventail de techniques nucléaires ou faisant appel aux isotopes stables sont disponibles pour l'étude des changements environnementaux et des processus de pollution. Ce sont des outils clés de reconstitution des événements de pollution passés, et de surveillance des tendances de la pollution et de l'efficacité des mesures de lutte. Ces techniques sont également utilisées pour étudier les sources terrestres de pollution des nutriments responsables de l'eutrophisation côtière, différencier les concentrations des polluants anthropogènes et naturelles, déterminer les sources de pollution dans le cadre d'études criminalistiques de la pollution et identifier les biotoxines liées aux proliférations d'algues toxiques qui sont présentes dans les produits de la mer en vue de la protection de la santé humaine.

181. Les polluants persistants (métaux lourds et contaminants organiques, par exemple) se déposent souvent dans les sédiments marins dans les estuaires, les régions côtières et les lagunes, qui sont généralement proches des zones urbaines, des pêches et des lieux de récréation. Le plomb 210 peut servir à mesurer la vitesse de sédimentation et partant, les vitesses d'accumulation des polluants. Avec sa demi-vie de 22,3 ans, on peut effectuer une datation géochronologique remontant à environ 100-150 ans et la lier à des événements de contamination tels que les accidents ou les essais nucléaires, ou encore des événements ayant trait à l'environnement tels que l'eutrophisation ou les proliférations d'algues nuisibles.

182. Dans les régions côtières, l'eutrophisation d'origine humaine, qui est principalement due au ruissellement provenant des effluents urbains et des terres agricoles, est un problème répandu dans de très nombreux estuaires et régions côtières. Les signes de la dégradation comprennent les concentrations élevées de phytoplancton, la transparence réduite de l'eau, l'appauvrissement en

oxygène dissous et, dans certain cas, l'apparition de proliférations d'algues nuisibles. Les rapports de l'isotope stable de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) servent d'indicateurs de l'eutrophisation anthropique dans les écosystèmes aquatiques, étant donné que des valeurs élevées de $\delta^{15}\text{N}$ dans les sédiments de matière organique et le biote sont un indice de rejets d'azote dans les eaux côtières. En outre, étant donné que l'eutrophisation entraîne une augmentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ due à l'accroissement de la production de phytoplancton marin, l'analyse isotopique de composés spécifiques du carbone des biomarqueurs des lipides reflète la force des événements d'eutrophisation dans ces eaux.



FIG. H-2. Spectromètre de masse à rapport isotopique servant à mesurer les rapports des isotopes stables de l'azote et du carbone pour l'étude des processus d'eutrophisation des régions côtières.

183. La détermination des sources de contaminants dans les environnements marins côtiers est importante, non seulement pour comprendre les processus de changements environnementaux, mais aussi pour planifier les mesures de lutte contre la pollution. Les techniques nucléaires de surveillance des sources de pollution sont donc des outils précieux pour protéger l'environnement et promouvoir la viabilité des prestations de services écosystémiques.

184. La pollution pétrolière des eaux côtières est un problème environnemental mondial dû aux rejets d'exploitation ou aux rejets accidentels ou illégaux d'hydrocarbures pétroliers. On a de plus en plus besoin de méthodes sensibles et fiables pour surveiller la pollution pétrolière et son impact et élaborer des approches permettant de déterminer l'origine de cette pollution à des fins réglementaires. La méthodologie la plus élaborée de caractérisation des déversements de pétrole est basée sur l'approche des empreintes chimiques permettant d'établir le profil d'une série de constituants du pétrole par chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse. L'analyse des rapports des isotopes stables du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) dans les hydrocarbures pétroliers peut aussi être utilisée comme outil supplémentaire de criminalistique pour affiner les empreintes des nappes de pétrole afin de déterminer l'origine du pétrole présent dans l'environnement marin.

185. Le plomb est un élément toxique non essentiel qu'on peut aussi surveiller à l'aide des rapports isotopiques pour déterminer les diverses sources de contamination de l'environnement marin. Les compositions isotopiques des gisements de plomb sont généralement variées et dépendent de l'âge, de la source et des processus de formation. Les variations des rapports des isotopes stables et radiogéniques du plomb, et en particulier des rapports mettant en jeu le seul isotope naturel du plomb (le plomb 204), peuvent servir à déterminer les sources et les voies de pollution au plomb.



FIG. H-3. Spectromètre de masse haute résolution à plasma à couplage inductif servant à analyser les isotopes stables du plomb dans des échantillons de l'environnement.