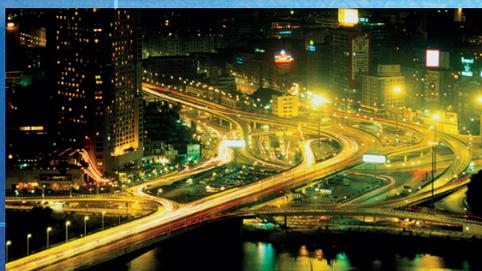


RAPPORT D'ENSEMBLE SUR LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE POUR 2017



60 ans

L'atome pour la paix et le développement

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire
pour 2017

GC(61)/INF/4

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Août 2017

IAEA/NTR/2017

Avant-propos

À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un *rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire*.

Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2017* rend compte des avancées notables observées dans le monde en 2016 dans les domaines suivants : applications électronucléaires, données atomiques et nucléaires, applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, techniques nucléaires dans la gestion de l'alimentation, des sols et du bétail, diagnostic du cancer et cancérothérapie, faits nouveaux dans l'étude des isotopes dans les précipitations, effets de l'acidification des océans et préservation du patrimoine culturel.

Un projet de rapport a été examiné par le Conseil des gouverneurs à sa réunion de mars 2017 (document GOV/2017/2). La présente version finale a été établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.

Table des matières

Synthèse	1
Rapport principal.....	5
A. Applications énergétiques	5
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	5
A.1.1. Pays primo-accédants	8
A.1.2. Pays qui développent leur parc électronucléaire	8
A.1.3. Pays qui exploitent des centrales nucléaires	9
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire	10
A.3. Cycle du combustible	12
A.3.1. Partie initiale.....	12
A.3.2. Assurance de l'approvisionnement.....	16
A.3.3. Partie terminale.....	17
A.3.4. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs.....	19
A.4. Sûreté.....	25
B. Données atomiques et nucléaires.....	27
C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche.....	28
C.1. Accélérateurs	28
C.1.1. Techniques pompe-sonde inédites destinées à étudier in situ les dommages d'irradiation	29
C.1.2. Nouveaux dosimètres biocompatibles faisant appel à des faisceaux d'ions focalisés	29
C.1.3. Diffusion neutronique à l'aide d'un accélérateur.....	30
C.2. Réacteurs de recherche	31
D. Alimentation et agriculture.....	35
D.1. Utilisation des techniques nucléaires et connexes pour déterminer l'authenticité des aliments	35
D.1.1. Techniques d'analyse	35
D.2. L'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques : une nouvelle méthode de surveillance de l'humidité des sols à l'échelle d'une zone.....	36
D.3. La cartographie par hybrides d'irradiation contribue à la mise au point d'outils génétiques utiles pour les programmes de sélection du bétail.....	38
D.3.1. Les techniques radio-isotopiques au service de la cartographie génétique des animaux d'élevage	39
D.3.2. Applications des cartes d'hybrides d'irradiation dans le domaine de la sélection animale	39
D.3.3. Quelles conséquences pour la sécurité alimentaire et les objectifs de développement durable ?	39
E. Santé humaine	40
E.1. Progrès dans la prise en charge du cancer de la prostate : diagnostic et thérapie	40
E.1.1. Contexte	40
E.1.2. Diagnostic	41
E.1.3. Évolutions et tendances récentes.....	41

F.	Ressources en eau.....	42
F.1.	Nouvelles avancées dans l'étude de la météo et du climat au moyen des isotopes contenus dans les précipitations	42
G.	Environnement	44
G.1.	Utilisation d'outils isotopiques pour l'étude de l'acidification des océans	44
G.1.1.	Acidification des océans : l'autre problème posé par le CO ₂	44
G.1.2.	Effets biologiques de l'acidification des océans.....	45
G.1.3.	Mieux comprendre les effets de l'acidification des océans avec les techniques nucléaires	46
H.	Technologies des rayonnements.....	47
H.1.	Patrimoine culturel : l'étudier et le préserver à l'aide des technologies des rayonnements	47
H.1.1.	Étude et examen	47
H.1.2.	Les techniques basées sur les rayonnements au service de la préservation et de la consolidation des objets historiques	48

Synthèse

1. Avec 448 réacteurs en service à la fin de 2016, la capacité mondiale de production d'énergie nucléaire était de 391 GWe, soit 8,3 GWe de plus qu'en 2015. En 2016, trois réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt, dix ont été raccordés au réseau, et trois 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 des 61 réacteurs en construction étaient dans cette région, de même que 47 des 55 réacteurs qui ont été couplés au réseau depuis 2005.
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. Plusieurs pays qui ont décidé d'introduire l'électronucléaire sont à des stades avancés de mise en place de l'infrastructure.
3. D'après les projections à l'horizon 2030 établies par l'Agence en 2016, la capacité électronucléaire dans le monde devrait croître de 1,9 % dans l'hypothèse basse et de 56 % dans l'hypothèse haute. L'électronucléaire, qui permet de produire de grandes quantités d'énergie facile à acheminer en générant de faibles émissions de carbone, peut contribuer de manière importante à la réalisation de l'objectif de l'Accord de Paris qui consiste à contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels ainsi que des objectifs de développement durable des Nations Unies. De nouvelles technologies électronucléaires pourraient permettre de réduire encore les émissions de gaz à effet de serre et de renforcer le rôle de l'électronucléaire dans les nouvelles applications.
4. On a continué d'améliorer la sûreté des centrales nucléaires à travers le monde, et la sûreté d'exploitation des centrales est restée à un niveau élevé, comme le montrent les indicateurs de sûreté couramment utilisés. L'Agence a révisé ses publications sur les prescriptions de sûreté pour prendre en compte les enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi. Deux autres prescriptions de sûreté relatives à la capacité de direction et de gestion pour la sûreté et à la sûreté des réacteurs de recherche ont également été révisées.
5. La faiblesse des prix de l'uranium a continué de limiter la capacité des entreprises à mobiliser des fonds pour la prospection, les études de faisabilité, le lancement de projets de construction et l'extension de ceux déjà en cours. La 26^e édition du « Livre rouge », un rapport sur l'uranium faisant référence dans le monde et publié tous les deux ans, montre que les ressources mondiales de cet élément sont largement suffisantes pour que l'hypothèse haute mentionnée ci-dessus se concrétise.
6. Les installations d'enrichissement et les autres installations du cycle du combustible ont maintenu leurs activités à un niveau relativement constant. La construction d'une nouvelle installation d'entreposage pour la banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA au Kazakhstan a commencé et progresse comme prévu.
7. Le combustible utilisé des réacteurs nucléaires entreposé représentait près de 273 000 tonnes de métaux lourds (tML) et s'accumule au rythme d'environ 7 000 tML/an. Cinq installations d'entreposage hors du site de réacteurs destinées à du combustible utilisé provenant de réacteurs de puissance ont été mises en service.
8. D'importants travaux de déclassement devraient être effectués à travers le monde dans les années à venir. En effet, 158 réacteurs nucléaires de puissance ont été définitivement mis à l'arrêt ou sont en cours de déclassement. Plus de 60 % de l'ensemble des réacteurs en service ont plus de 30 ans et environ 15 % d'entre eux ont plus de 40 ans. Si certains pourraient fonctionner plus longtemps,

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 du cycle du combustible ont été déclassés ou sont en cours de déclasserment.

9. Plusieurs pays ont poursuivi leurs travaux sur le stockage définitif des déchets radioactifs en formations géologiques profondes. Des installations de stockage définitif pour toutes les autres catégories de déchets radioactifs sont en service dans le monde entier. Les possibilités de recyclage et de rapatriement des sources radioactives scellées retirées du service sont de plus en plus nombreuses. Plusieurs pays disposent de projets de stockage en puits qui en sont à divers stades d'avancement. Les opérations d'enlèvement menées à bien ont permis de mettre de nombreuses sources scellées retirées du service dans des conditions d'entreposage correctes.

10. L'Organisation internationale de collaboration pour une bibliothèque de données évaluées a encouragé la réalisation de progrès dans les calculs des sections efficaces de capture neutronique des nucléides des isotopes de l'oxygène, du fer, de l'uranium et du plutonium qui jouent un rôle particulièrement important dans les technologies nucléaires. La base de données du Réseau international des évaluateurs de données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux s'est développée grâce au site web du Graphique interactif des nucléides de l'Agence et à l'application pour smartphone « Isotope Browser » qui donne des informations dans le domaine nucléaire.

11. S'agissant de la technologie des accélérateurs, on recense notamment des progrès et innovations en ce qui concerne les nouvelles techniques de spectroscopie pompe-sonde pour étudier in situ les lésions par irradiation, la mise au point de nouveaux dosimètres de rayonnement biocompatibles et la diffusion neutronique par accélérateur.

12. Environ la moitié des 249 réacteurs de recherche et installations critiques en exploitation dans 56 pays ont plus de 40 ans. La gestion du vieillissement, la durabilité de l'approvisionnement en combustible, les options liées à la gestion du combustible usé et l'amélioration de l'utilisation des réacteurs de recherche sont les principaux défis à relever par les spécialistes des réacteurs de recherche. Sept pays construisent 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 dans le domaine de l'électronucléaire, tandis que plusieurs autres pays prévoient ou envisagent de faire de même. Des initiatives telles que le projet Internet Reactor Laboratory de l'Agence et le programme du Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR), ainsi que des réseaux et associations régionaux, favorisent la coopération internationale dans le domaine de l'utilisation des réacteurs de recherche en vue du renforcement des capacités nucléaires.

13. Les activités visant à réduire le plus possible l'utilisation de l'uranium hautement enrichi (UHE), y compris le rapatriement du combustible à l'UHE des réacteurs de recherche dans son pays d'origine, se sont poursuivies. Au fil des ans, les programmes de reprise de combustible à l'UHE provenant des États-Unis ou de Russie ont donné des résultats dignes d'éloges.

14. Malgré des difficultés liées à l'exploitation et des arrêts dans certaines installations, il n'y a pas eu, en 2016, de pénuries importantes d'approvisionnement en molybdène 99 (isotope médical le plus utilisé) au niveau mondial. Les principaux producteurs poursuivent leurs efforts afin de passer à une production basée non plus sur l'UHE mais sur l'UFE.

15. Face à la mondialisation du commerce des denrées alimentaires, il est de plus en plus nécessaire de disposer de systèmes efficaces de contrôle des aliments pour éviter que des informations fausses soient volontairement communiquées aux consommateurs. La fraude alimentaire peut présenter un risque pour la sûreté, car un produit contrefait n'est pas soumis aux mêmes contrôles qu'un produit original et il arrive que l'on ne connaisse pas les éléments qui le composent. La nécessité de disposer de méthodes d'analyse pour étayer les mécanismes d'authentification et de traçabilité des denrées

alimentaires s'impose de plus en plus. Diverses techniques d'analyse nucléaires et connexes présentant un bon rapport coût-efficacité, comme celle consistant à mesurer la quantité d'isotopes stables naturels présents dans les bioéléments des aliments, permettent de fournir des informations sur l'origine géographique et la technique de production des aliments. L'évolution récente des instruments d'analyse portatifs, abordables, facilite l'authentification des aliments à différentes étapes de la chaîne alimentaire et améliore sensiblement l'efficacité des systèmes de contrôle.

16. La technique consistant à mesurer la quantité d'isotopes stables naturels présents dans les bioéléments des aliments révèle souvent des informations sur leur origine géographique ou leur technique de production. L'analyse élémentaire des aliments fournit quant à elle d'importantes informations sur leur sécurité sanitaire et leur toxicité et peut également contribuer à retracer leur origine géographique. Ces techniques, associées à d'autres telles que la spectroscopie de vibration, l'analyse ADN et l'empreinte microbienne, se révèlent très précieuses pour authentifier les denrées alimentaires.

17. L'agriculture compte pour environ deux tiers de la consommation mondiale d'eau douce. Pour atteindre les rendements nécessaires en raison de la croissance démographique, les systèmes agricoles doivent gagner en efficacité. L'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques est un nouveau dispositif permettant de détecter et de quantifier la teneur en eau des sols sur de vastes zones de façon plus rapide et moins invasive que les systèmes d'évaluation traditionnels. Les informations sur l'humidité des sols fournies par ce dispositif permettent de mieux gérer des ressources en eau qui se font de plus en plus rares.

18. Des outils génomiques tels que les puces à ADN permettent d'estimer les paramètres génétiques des animaux à la naissance. Les cartes génétiques indiquent l'emplacement de certains éléments caractéristiques sur les chromosomes et sont des outils essentiels pour identifier les gènes et marqueurs codant des caractéristiques de production et associés à la résistance aux maladies. Les techniques radio-isotopiques peuvent remplacer le long processus traditionnel de cartographie génétique du bétail en reproduisant des phénomènes de recombinaison génétique et en accélérant le processus in vitro.

19. L'élaboration et l'utilisation de cartes d'hybrides d'irradiation et d'outils génomiques permettront d'établir des programmes de sélection visant à améliorer la productivité du bétail et à renforcer la sécurité alimentaire. Des cartes génétiques de haute résolution ont été établies pour les moutons, les buffles, les chèvres et les porcs et on pourrait en faire de même pour toute une série d'autres espèces animales importantes. Ces cartes ont permis la mise au point de puces à ADN qui sont largement utilisées pour élever du bétail dans une optique de productivité laitière accrue.

20. Le cancer de la prostate compte parmi les trois cancers les plus fréquents chez l'homme à travers le monde, et, avec les cancers du poumon, du foie, de l'estomac et de l'intestin, c'est l'un de ceux qui cause le plus de décès parmi cette population. Plus de la moitié des patients présentent une récurrence biochimique après une prostatectomie ou une radiothérapie externe. Récemment, une nouvelle molécule ciblant l'antigène membranaire prostatique spécifique (PSMA), une enzyme associée aux cellules du cancer de la prostate, a été mise au point. Le PSMA pourrait constituer une excellente cible moléculaire pour le développement de radiotraceurs pour l'imagerie PET-CT, car il permet de détecter une récurrence précoce de la maladie. Des essais cliniques sont en cours.

21. Le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations (GNIP) de l'Agence enregistre des rapports isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des précipitations depuis 1960. Les données du GNIP révèlent que les rapports isotopiques varient considérablement selon les saisons. Il ressort de travaux récemment menés par l'Agence qu'il existe un lien étroit entre les rapports isotopiques et les processus de formation des précipitations dans les nuages. Cette découverte permettra d'accroître considérablement l'utilité des données du GNIP pour comprendre les processus météorologiques à

court et à long terme et contribuer au suivi des changements climatiques et à l'adaptation à ces derniers.

22. À l'heure actuelle, l'acidification des océans a des effets néfastes mesurables sur de nombreux organismes marins, notamment les poissons, les mollusques, le plancton et les coraux, qui jouent, chacun à leur manière, un rôle essentiel pour la santé et le bien-être des océans et de ceux qui en dépendent. Des expériences mettant en jeu une série de radio-isotopes évaluent la façon dont les diminutions prévues du pH des océans affecteront ces organismes marins et permettent de mieux comprendre les effets très divers de l'acidification des océans. Ces informations sont nécessaires pour mieux anticiper les effets probables de ce changement sur nos ressources côtières et marines.

23. Certaines techniques faisant appel aux rayonnements peuvent être utilisées pour préserver une grande variété de biens culturels inestimables. Si les techniques de radiographie et de tomographie permettent d'examiner en détails les artefacts, le traitement par rayonnement permet quant à lui d'éliminer les insectes nuisibles ou les infestations fongiques. Des objets et des documents précieux peuvent être restaurés et consolidés grâce à une technologie de traitement par rayonnement, qui joue un rôle unique dans la préservation du patrimoine culturel mondial.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire

pour 2017

Rapport principal

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2016, il y avait 448 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité totale de 391 GWe¹ (voir tableau A-1). Cela représente une augmentation de quelque 8,3 GWe de la capacité totale par rapport à 2015. Parmi les réacteurs en service, 82 % sont modérés et refroidis par eau ordinaire, 10,9 % modérés et refroidis par eau lourde, 3,3 % refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite, et 3,1 % refroidis par gaz. Trois d'entre eux sont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide.
2. En 2016, dix nouveaux réacteurs, qui sont tous des réacteurs à eau sous pression (REP), ont été couplés au réseau, soit le même nombre qu'en 2015. Cinq de ces réacteurs sont en Chine (Changjiang-2, Fangchenggang-2, Fuqing-3, Hongyanhe-4 et Ningde-4) et les autres sont en Inde (Kudankulam-2), en République de Corée (Shin-Kori-3), au Pakistan (CHASNUPP-3), en Fédération de Russie (Novovoronezh 2-1) et aux États-Unis d'Amérique (Watts Bar-2).
3. Après le redémarrage de Sendai-1 et -2 en 2015, qui étaient les premiers réacteurs nucléaires de puissance à redevenir pleinement opérationnels au Japon après l'accident de Fukushima Daiichi, Takahama-3 et -4 ont été remis en service en janvier et février 2016, respectivement, mais ont été mis à nouveau à l'arrêt peu après. En août 2016, Ikata-3 a été redémarré. En octobre 2016, la tranche 1 de la centrale nucléaire de Fort Calhoun, aux États-Unis d'Amérique, a été définitivement mise à l'arrêt après 43 ans de fonctionnement.

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

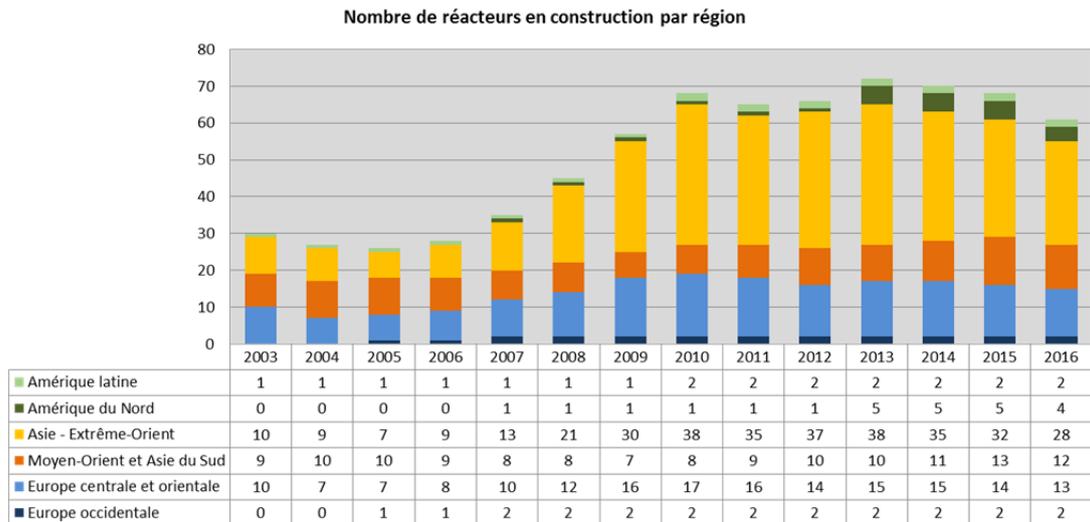


FIG. A-1. Nombre de réacteurs en construction par région.

(Source : Système d'information de l'AIEA sur les réacteurs de puissance, <http://www.iaea.org/pris>)

4. Au 31 décembre 2016, 61 réacteurs étaient en construction. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (fig. A-1.), en Chine en particulier. Sur le nombre total de réacteurs en construction, 40 se trouvent en Asie, de même que 47 des 55 nouveaux réacteurs couplés au réseau depuis 2005.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2016)^a

COUNTRY	Reactors in Operation		Reactors under Construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2016		Expérience d'exploitation totale en 2016	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			15,2	6,6	64	3
ALLEMAGNE	8	10 799			80,1	13,1	824	7
ARGENTINE	3	1 632	1	25	7,7	5,6	79	2
ARMÉNIE	1	375			2,2	31,4	42	8
BÉLARUS			2	2 218				
BELGIQUE	7	5 913			41,4	51,7	282	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 245	15,0	2,9	51	3
BULGARIE	2	1 926			15,1	35,0	161	3
CANADA	19	13 554			95,7	15,6	712	6
CHINE	36	31 384	21	21 622	197,8	3,6	243	2
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	25	23 077	3	4 020	154,3	30,3	498	11
ÉMIRATS ARABES UNIS			4	5 380				
ESPAGNE	7	7 121			56,1	21,4	322	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	99	99 869	4	4 468	804,9	19,7	4 210	9
FÉDÉRATION DE RUSSIE	35	26 111	7	5 520	184,1	17,1	1 300	9
FINLANDE	4	2 764	1	1 600	22,3	33,7	151	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	386,5	72,3	2 106	4
HONGRIE	4	1 889			15,2	51,3	126	2
INDE	22	6 240	5	2 990	35,0	3,4	460	11
IRAN, RÉPUBLIQUE	1	915			5,9	2,1	5	4
JAPON	42	39 752	2	2 653	17,5	2,2	1 781	5
MEXIQUE	2	1 552			10,3	6,2	49	11
PAKISTAN	4	1 005	3	2 343	5,4	4,4	67	11
PAYS-BAS	1	482			3,7	3,4	72	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 930			22,7	29,4	152	10
ROUMANIE	2	1 300			10,4	17,1	29	11
ROYAUME-UNI	15	8 918			65,1	20,4	1 574	7
SLOVAQUIE	4	1 814	2	880	13,7	54,1	160	7
SLOVÉNIE	1	688			5,4	35,2	35	3
SUÈDE	10	9 740			60,6	40,0	442	6
SUISSE	5	3 333			20,3	34,4	209	11
UKRAINE	15	13 107	2	2 070	76,1	52,3	473	6
Total ^{b,c}	448	391 116	61	61 264	2 476,2		16 982	5

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 (5 052 MWe) et deux en construction (2 600 MWe) ;

30,5 TW h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 13,7 % de la production électrique totale.

c) L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et huit mois), au Kazakhstan (25 ans et dix mois), en Lituanie (43 ans et six mois) et à Taïwan (Chine) (212 ans et un mois).

A.1.1. Pays primo-accédants

5. Aux Émirats arabes unis, la construction des quatre réacteurs de la première centrale nucléaire du pays, située à Barakah, s'est poursuivie. Il est prévu que l'exploitation commerciale de la tranche 1 débute en 2017, et celle de chacune des trois autres chaque année suivante respectivement. Une mission du Service consultatif international sur la protection physique de l'AIEA a été achevée en novembre 2016. La Société de l'énergie nucléaire des Émirats arabes unis (ENEC) et la Compagnie d'électricité de Corée ont signé un accord de coentreprise pour un partenariat de coopération à long terme. Les Émirats arabes unis ont demandé à l'Agence des orientations pour faire en sorte que la recherche-développement aide à assurer la durabilité de leur programme électronucléaire et de leurs institutions pertinentes.

6. La construction des deux tranches de la première centrale nucléaire du Bélarus, située à Ostrovets, s'est poursuivie, et leur mise en service est prévue en 2019 et en 2020. La cuve sous pression de réacteur destinée à la tranche 1 a été livrée sur le site fin 2016. Une mission du Service intégré d'examen de la réglementation (IRRS) de l'AIEA a été effectuée en 2016.

7. Le Bangladesh a signé un contrat d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction avec Atomstroyexport, de la Fédération de Russie, en décembre 2015. En juillet 2016, une autorisation a été délivrée et un accord de crédit intergouvernemental a été conclu avec ce pays. La tranche 1 de la centrale nucléaire de Rooppur devrait être mise en service en 2023, et la tranche 2 en 2024.

8. En février 2015, l'Égypte a signé un accord relatif à l'élaboration d'un projet avec la Société nationale d'énergie atomique « Rosatom » de la Fédération de Russie en vue de la construction d'une nouvelle centrale nucléaire à El Dabaa, et a ensuite signé un autre accord financier intergouvernemental avec ce pays. La première tranche du site d'El Dabaa devrait être achevée en 2025, et les trois autres tranches d'ici 2027. La Jordanie a créé un Groupe consultatif international en vue d'examiner l'avancement de la mise en œuvre de son programme nucléaire et a employé des consultants devant jouer un rôle de premier plan dans l'élaboration de la décision relative à l'investissement, qui doit être prise en 2018. En novembre 2016, l'Assemblée nationale du Viet Nam a approuvé la décision du gouvernement d'annuler les projets du pays en matière électronucléaire. En 2009, elle avait initialement approuvé des projets relatifs à la construction de deux centrales nucléaires, ayant une capacité cumulée de 4 000 mégawatts.

9. Les pays « primo-accédants » qui envisagent ou prévoient d'inclure l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique, ou y travaillent activement, ont collaboré avec l'Agence pour mettre au point l'infrastructure nucléaire nécessaire. Si la décision d'opter pour l'électronucléaire est prise souverainement par ces pays, ils collaborent avec les pays fournisseurs dans le cadre de la construction de leurs futures centrales nucléaires. Grâce à une méthodologie spécifique s'inscrivant dans le cadre de son approche par étapes, l'Agence joue un rôle important dans la mise au point de programmes sûrs, sécurisés et durables. Elle aide les États Membres concernés grâce à des examens par des pairs, à des missions d'experts, à des cours et à des outils de modélisation qui couvrent systématiquement les 19 questions relatives à l'infrastructure nucléaire de l'approche par étapes. Avec deux missions d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) et deux missions de suivi effectuées en 2016, ce sont au total 21 missions INIR qui ont été menées dans 15 États Membres depuis leur lancement en 2009.

A.1.2. Pays qui développent leur parc électronucléaire

10. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a délivré à la Tennessee Valley Authority une licence d'exploitation d'une durée de 40 ans pour la tranche 2 de la centrale nucléaire de Watts Bar, qui a été couplée au réseau en juin et dont l'exploitation commerciale a débuté en octobre 2016. Cette centrale est la première à se conformer aux instructions de la NRC relatives à

Fukushima sur les stratégies d'atténuation des accidents. La construction de la tranche 2 de la centrale nucléaire de Watts Bar était achevée à 80 % lorsqu'elle a été interrompue dans les années 1980 – développer l'installation existante a permis de gagner du temps et de dépenser moins qu'en mettant en place une nouvelle capacité de charge de base.

11. Le projet Hinkley Point C, concernant la construction d'une centrale de 3 200 MWe comportant deux réacteurs EPR à Somerset (Angleterre), a été approuvé par le Conseil d'administration d'Électricité de France (EDF) en juillet 2016, ainsi que par le gouvernement du Royaume-Uni en septembre 2016, de nouvelles conditions ayant été ajoutées en matière d'investissement. La durée de vie utile prévue de la centrale est de 60 ans. EDF prévoit que le premier réacteur sera opérationnel au début de 2026, c'est-à-dire environ dix ans après la décision d'investissement et l'approbation par le gouvernement.

12. Il y a eu trois mises en chantier en 2016 : KANUPP-3 au Pakistan, et Tianwan-6 et Fangchenggang-4 en Chine.

A.1.3. Pays qui exploitent des centrales nucléaires

13. Sur les 450 réacteurs nucléaires de puissance en service, 293 sont exploités depuis 30 ans ou plus. Lorsqu'un réacteur arrive à la fin de sa durée de vie nominale, il est soumis à un examen de sûreté et à une évaluation du vieillissement de ses structures, systèmes et composants essentiels en vue de valider ou de renouveler sa licence d'exploitation au-delà de sa durée de vie opérationnelle initiale. Au cours des dernières années, un certain nombre de réacteurs nucléaires de puissance ayant une licence d'exploitation valide, ou de réacteurs dont la licence d'exploitation aurait pu être prolongée, ont été sélectionnés pour être mis à l'arrêt prématurément par leur propriétaire/exploitant, des facteurs économiques ayant été invoqués comme principale raison dans nombre de cas.

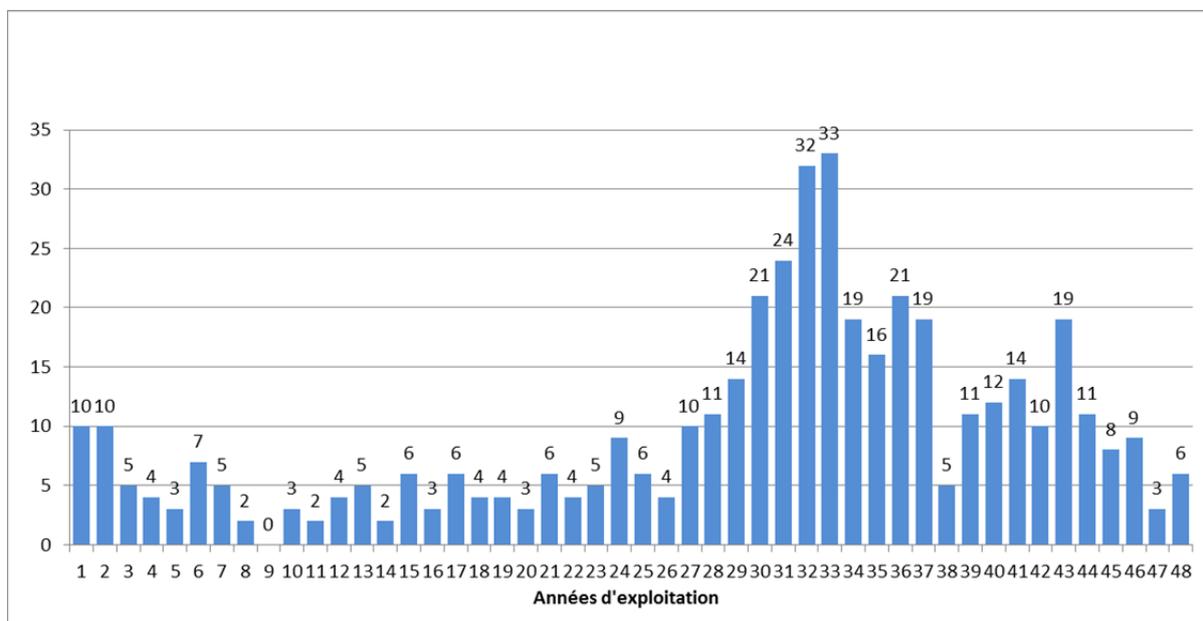


FIG. A-2. Répartition des réacteurs de puissance en exploitation par ancienneté au 31 décembre 2016.

(Source : Système d'information de l'AIEA sur les réacteurs de puissance, www.iaea.org/pris)

14. D'ici 2040, la durée d'exploitation de la moitié des centrales nucléaires des États-Unis d'Amérique devrait avoir atteint 60 ans, si leur licence d'exploitation est prolongée par la NRC au-delà des 40 ans de durée de vie nominale initiale. Plusieurs compagnies d'électricité envisagent de prolonger la durée de vie utile de leurs centrales nucléaires de 20 années de plus, ce qui requerra un

deuxième renouvellement de licence pour les années d'exploitation supplémentaires. La centrale nucléaire de Peach Bottom, exploitée par Exelon en Pennsylvanie, et la centrale nucléaire de Surry, exploitée par Dominion en Virginie, sont les premières centrales nucléaires des États-Unis pour lesquelles un deuxième renouvellement de licence sera demandé en vue d'une exploitation pendant un total de 80 ans.

15. La politique d'abandon progressif de l'électronucléaire de la Suisse, qui prévoit de limiter à 45 ans par voie constitutionnelle la durée de vie utile des centrales nucléaires, a été rejetée par référendum le 20 novembre 2016. En 2015, environ 33 % de l'électricité de ce pays était produite par l'électronucléaire.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

16. Dans les prochaines années, l'électronucléaire devrait continuer à se développer dans le monde, bien qu'à un rythme moindre à court terme, en raison de la concurrence des combustibles fossiles, dont le prix est faible, et des sources d'énergie renouvelables. D'après les projections faites par l'Agence en 2016 (fig. A-3), en prenant comme base la capacité nucléaire installée à la fin de 2015, soit 382,9 GWe, la capacité électronucléaire mondiale devrait atteindre 598 GWe d'ici 2030, ce qui représente une augmentation de 56 % dans l'hypothèse haute. Dans l'hypothèse basse, cependant, la capacité nucléaire installée dans le monde augmentera de 1,9 % en 2030, atteignant 390 GWe. L'augmentation réelle de la capacité au cours des 14 prochaines années sera bien supérieure à l'augmentation nette de la capacité nucléaire installée dans le monde, compte tenu du remplacement de nombre de réacteurs nucléaires de puissance retirés du service. Dans l'hypothèse basse, la capacité augmentera de quelque 150 GWe, et dans l'hypothèse haute, de 300 GWe. Si l'on étend ces projections à l'horizon 2050, la capacité nucléaire atteindra 898 GWe dans l'hypothèse haute, et se maintiendra sensiblement au niveau actuel dans l'hypothèse basse.

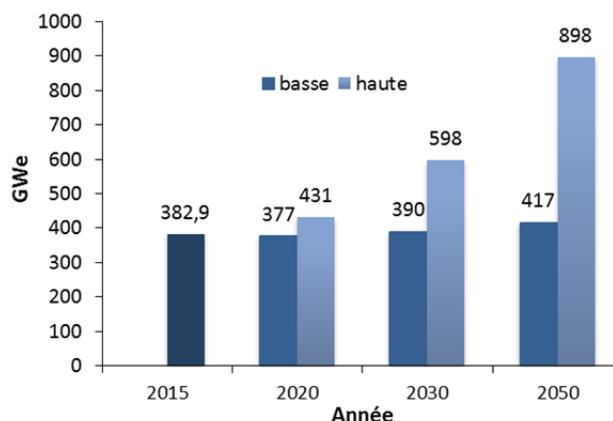


FIG. A-3. Projections concernant la capacité nucléaire installée dans le monde.
(Source : *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*,
n° 1 de la collection Données de référence de l'AIEA, 2016)

17. Ces projections sont établies par un groupe d'experts constitué chaque année par l'Agence et sont fondées sur un ensemble d'évaluations pays par pays. Les experts passent en revue l'ensemble des réacteurs en service, les éventuelles prolongations de licences, les mises à l'arrêt prévues et les projets de construction plausibles prévus au cours des prochaines décennies. Les projections faites 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. Malgré la grande incertitude des projections, les hypothèses hautes de l'AIEA, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et de l'Association nucléaire mondiale (WNA) indiquent toutes une augmentation possible de la capacité électronucléaire installée dans le monde de 600 à 700 GWe d'ici 2030 (fig. A-4).

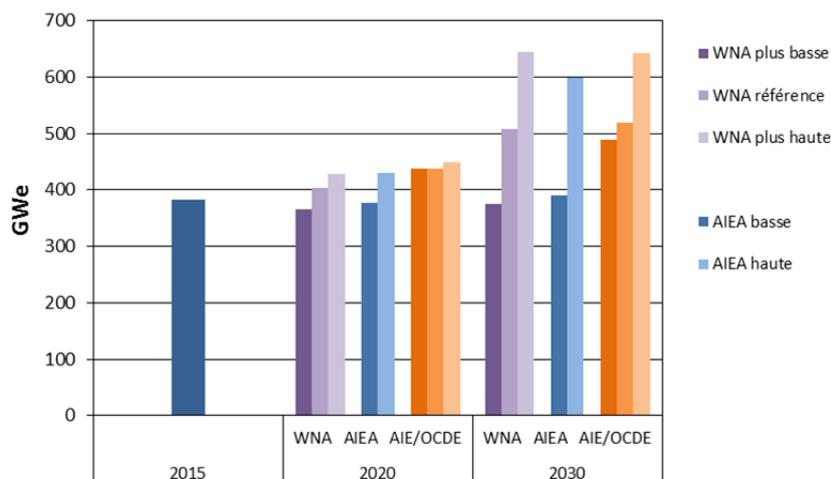


FIG. A-4. Comparaison des projections les plus récentes de l'AIEA en matière de capacité électronucléaire aux scénarios 2016 de l'AIE/OCDE et aux projections de la WNA (les chiffres de l'AIE/OCDE sont fondés sur la capacité brute).

18. Avec l'entrée en vigueur de l'Accord de Paris le 4 novembre 2016, les Parties sont maintenant tenues d'établir, de communiquer et d'actualiser les contributions déterminées au niveau national successives qu'elles prévoient de réaliser afin de contenir l'élévation de la température de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels². L'Accord de Paris sert de cadre en vue de l'intensification progressive des mesures d'atténuation des changements climatiques jusqu'à ce que l'objectif d'une limitation à 2 °C soit atteint. Cela est nécessaire, car les plans d'atténuation nationaux actuels sont très insuffisants pour permettre d'atteindre l'objectif d'une limitation de l'élévation de la température à 2 °C³.

19. L'électronucléaire peut contribuer dans une large mesure à atteindre l'objectif de limitation de l'élévation de la température à 2 °C et à réaliser les objectifs de développement durable des Nations Unies⁴, car il génère de faibles émissions de carbone et permet de produire une grande quantité d'énergie facile à acheminer⁵. Cependant, pour que son potentiel puisse être pleinement exploité, l'électronucléaire doit être développé de manière importante, afin que les hypothèses hautes susmentionnées soient réalisées (898 GWe atteints d'ici 2050). Il est difficile d'atteindre de telles capacités, car les centrales existantes ont besoin d'être modernisées et leur durée de vie doit être prolongée pour que l'exploitation puisse se poursuivre, la capacité nucléaire retirée du service doit être remplacée, et un ensemble de nouvelles constructions sont nécessaires pour répondre aux demandes énergétiques croissantes des pays en développement. Des investissements de cette ampleur ne sont pas sans précédents, mais requerront probablement un appui du gouvernement, de nouveaux arrangements

² Le texte de l'Accord de Paris est disponible à l'adresse suivante : http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

³ La publication de l'Agence intitulée *Climate Change and Nuclear Power 2016* est disponible à l'adresse suivante : <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11090/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2016>

⁴ De plus amples renseignements sur les *objectifs de développement durable des Nations Unies* sont disponibles à l'adresse suivante : <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>

⁵ La publication de l'Agence intitulée *Nuclear Power and Sustainable Development* (2016) est disponible à l'adresse suivante : <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11084/Nuclear-Power-and-Sustainable-Development>

contractuels pour réduire les risques pour les investisseurs, et une taxe sur les émissions de carbone qui sera favorable aux options énergétiques sobres en carbone, comme l'électronucléaire.

20. Il est indiqué dans l'Accord de Paris que l'innovation est essentielle pour atteindre l'objectif de limitation à 2 °C. Les technologies électronucléaires innovantes, notamment les modèles évolutifs, les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP) et les cycles du combustible avancés, pourraient contribuer plus efficacement à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à étendre le rôle de l'électronucléaire dans de nouvelles applications. Par exemple, l'électronucléaire peut contribuer à réduire encore les émissions de carbone en fournissant la chaleur industrielle nécessaire à des processus industriels, et peut aussi être utilisé pour produire de l'eau dessalée destinée à des villes sous des climats secs. Cependant, des investissements supplémentaires dans la recherche, le développement et la démonstration sont nécessaires.

A.3. Cycle du combustible

A.3.1. Partie initiale

Ressources et production d'uranium

21. La 26^e édition de la publication biennale conjointe de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE et de l'AIEA, intitulée *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*, aussi appelée « Livre rouge », est parue en novembre 2016⁶. Ce rapport indique notamment que les ressources actuellement répertoriées pouvant être récupérées pour un coût inférieur à 130 \$/kg U sont tout à fait suffisantes pour réaliser les hypothèses de demande hautes mentionnées précédemment. Les principales difficultés concernent les investissements et les compétences qui seront nécessaires pour utiliser ces ressources à des fins de production. Elles sont accentuées par le fait que le marché de l'uranium est actuellement déprimé. La capacité de production prévue, qui est supérieure aux capacités de production existantes et engagées, est appropriée pour que l'hypothèse haute de la demande se réalise. Les capacités de production existantes et engagées sont suffisantes pour que l'hypothèse basse de la demande se réalise.

22. Les prix de l'uranium au comptant n'ont jamais été aussi bas depuis 2004. En 2016, ils sont restés entre 42 et 75 \$/kg U. Cette faiblesse des prix a considérablement limité la capacité des entreprises à mobiliser des fonds pour la prospection, les études de faisabilité et l'élaboration de nouveaux projets d'extension.

23. De nombreux projets concernant l'uranium sont restés en attente ou ont eu des faibles incidences financières pendant la réalisation d'essais et d'études supplémentaires, et certains projets qui avaient été lancés, ou pour lesquels la construction était à un stade avancé, ont fait l'objet d'un plan d'entretien et de maintenance. En 2015, 60 496 tonnes d'uranium métal (t U) ont été produites, soit la plus grande quantité au cours des dix dernières années (celle-ci était de 56 041 t U en 2014 et de 59 331 t U en 2013).

24. Le Kazakhstan reste le premier producteur d'uranium au monde. La production, presque exclusivement effectuée dans les mines à lixiviation in situ du pays, a augmenté rapidement entre les années 2000 et 2012, puis de manière beaucoup plus lente au cours des dernières années, une production de 24 455 t U étant attendue pour 2016 et un chiffre similaire étant prévu pour 2017.

25. La capacité de production annuelle de la mine de Cigar Lake (dont la teneur en uranium est la plus élevée au monde et dont la production commerciale a commencé en mai 2015), au Canada, est actuellement de 5 000 t U par an et devrait atteindre 6 900 t U par an d'ici 2018. Les résultats en

⁶ La publication intitulée *Uranium 2016: Resources, Production and Demand* est disponible à l'adresse suivante : <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>

matière de prospection d'uranium dans le bassin d'Athabasca continuent d'être encourageants et le Canada conserve son rang de deuxième producteur au monde.

26. La mise en service de la mine d'uranium de Husab, nouvellement construite en Namibie, s'est poursuivie en 2016. Le stade de production initiale a été atteint et le rythme de production devrait augmenter pendant 24 mois, jusqu'en 2018. À pleine capacité, le rendement de cette mine pourrait atteindre 5 770 t U par an, et sa durée de vie sera probablement supérieure à 20 ans. L'exploitation des mines d'uranium namibiennes de Rössing et de Langer Heinrich s'est poursuivie en 2016. Des travaux de faisabilité d'une portée limitée se sont poursuivis à certains des autres gisements d'uranium namibiens.

27. En Australie, la mine d'uranium à lixiviation in situ de Four Mile a continué d'être exploitée et sa capacité de production annuelle a été d'environ 1 000 t U à pleine capacité. Dans le cadre du projet Ranger, l'exploitant, Energy Resources of Australia, a continué de traiter ses stocks de minerai pour satisfaire aux obligations en matière de vente, et la réhabilitation des parties du site qui ne sont plus exploitées avance. La production de l'année 2016 a été inférieure à 2 500 t U, contre 4 000 à 6 000 t U produites par an entre 1997 et 2009. Conformément à des accords en vigueur, l'extraction et le traitement doivent prendre fin d'ici janvier 2020 et la réhabilitation doit être achevée dans les cinq prochaines années. Les exploitants de la mine de cuivre, d'uranium, d'or et d'argent Olympic Dam ont poursuivi l'exploitation classique, tandis que de nouveaux tests en vue d'une éventuelle lixiviation en tas d'une partie de ses minerais ont été effectués. Des progrès ont été réalisés dans les études relatives à plusieurs gisements d'uranium en Australie occidentale ainsi qu'en ce qui concerne les processus d'approbation, mais aucune date n'a été fixée en ce qui concerne la construction et l'ouverture.

28. D'autres progrès ont été accomplis dans les études de faisabilité et en ce qui concerne les approbations relatives aux terres rares, aux métaux de base et au projet portant sur l'uranium au gisement de Kvanefjeld, au Groenland (Royaume du Danemark). Le huitième atelier d'évaluation des ressources minérales destiné à évaluer les ressources d'uranium potentielles du pays a été organisé à Copenhague en novembre 2016.

29. La Chine a poursuivi ses activités de prospection d'uranium et augmenté ses dépenses de mise en valeur dans le pays et à l'étranger. Une augmentation importante (de plus de 100 %) des ressources présumées a récemment été signalée et est le résultat de l'intensification des activités de prospection dans plusieurs bassins sédimentaires du pays. Les dépenses de mise en valeur à l'étranger sont restées importantes (plus de 1,5 milliard de dollars en 2014 et en 2015), principalement en raison de la mise en valeur de la mine de Husab, en Namibie.

30. L'expérience montre qu'une proportion importante des ressources d'uranium répertoriées ne sont jamais exploitées pour des raisons d'ordre technique, social ou politique. Dans le cadre des efforts déployés pour améliorer la sécurité de l'approvisionnement international et national, l'Argentine et les États-Unis d'Amérique ont un certain nombre de projets en cours visant à évaluer les ressources d'uranium non découvertes. L'Agence a continué de collaborer avec d'importants acteurs en vue de faire connaître les techniques d'évaluation utilisées à d'autres États Membres grâce à des ateliers de formation et à des publications, notamment l'atelier susmentionné organisé à Copenhague.

Conversion et enrichissement

31. Le Canada, la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France et le Royaume-Uni exploitent des usines de conversion à l'échelle commerciale. Des services d'enrichissement commercial sont fournis par cinq sociétés : la Compagnie nucléaire nationale chinoise (Chine), AREVA (France), la Société nationale d'énergie atomique « Rosatom » (Fédération de Russie), l'USEC (États-Unis d'Amérique) et URENCO (Europe et États-Unis). De petites installations de conversion et d'enrichissement sont en service en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran.

32. Atkins, entreprise de conseil en matière de conception, d'ingénierie et de gestion de projets basée au Royaume-Uni, a été sélectionnée par le Ministère de l'énergie (DOE) des États-Unis, de même que les coentrepreneurs Westinghouse et Fluor Corporation, pour exploiter les installations de conversion d'hexafluorure d'uranium appauvri (DUF_6) situées à l'usine de diffusion gazeuse de Paducah, dans le Kentucky, et à celle de Portsmouth, à Piketon, dans l'Ohio, qui appartiennent à ce ministère. La coentreprise, enregistrée sous le nom de Mid-America Conversion Services, exploitera les deux installations afin de convertir le stock du DOE, d'environ 765 000 t de DUF_6 (coproduit résultant du processus d'enrichissement de l'uranium) en oxyde d'uranium appauvri en vue d'une éventuelle réutilisation ou d'un stockage ou stockage définitif.

33. Centrus Energy Corporation, basée aux États-Unis, a signé un contrat avec UT-Battelle, exploitant du Laboratoire national d'Oak Ridge du DOE, en vue de poursuivre les travaux visant à permettre l'enrichissement de l'uranium à des fins commerciales au moyen de la technologie « American Centrifuge » de la société. Début 2016, Centrus a achevé la démonstration, d'une durée de trois ans, d'une cascade complète de 120 centrifugeuses avancées à son installation de Piketon, dans l'Ohio, laquelle a permis de confirmer la performance et la fiabilité à long terme de ces machines dans des conditions de fonctionnement réelles. Centrus continue d'étudier des moyens d'affiner la technologie et d'autres manières de mettre en place la capacité d'enrichissement commercial la plus rentable, en profitant du fait que le marché actuel ne requiert pas que cette capacité soit étendue.

Fabrication de combustible

34. En janvier 2016, Lightbridge, société américaine qui développe du combustible nucléaire, a reçu l'approbation finale des organismes de réglementation pour effectuer au réacteur de recherche de Halden, en Norvège, les essais du combustible métallique qu'elle a récemment mis au point (l'irradiation devrait commencer en 2017). Le combustible métallique avancé de Lightbridge est constitué d'un alliage de zirconium et d'uranium et, d'après la société, la composition et la géométrie sans pareilles de ses barres de combustible permettent une exploitation à une densité de puissance supérieure à celle que permettent les combustibles à base d'oxyde d'uranium actuellement utilisés. En juillet 2016, Lightbridge a reçu de l'Office européen des brevets l'approbation relative à un brevet important concernant la conception de ses barres de combustible nucléaire métallique.

35. En janvier 2016, Westinghouse Electric Company a annoncé que son installation de fabrication de combustible nucléaire de Springfields, au Royaume-Uni, avait satisfait aux exigences concernant la fabrication d'assemblages combustibles appropriés pour le petit réacteur modulaire de Westinghouse. En février 2016, la compagnie d'électricité nationale tchèque ČEZ a attribué à Westinghouse un contrat pour la fourniture de six assemblages d'essai destinés à sa centrale nucléaire de Temelín, qui comprend deux tranches VVER-1000 de conception russe.

36. En mars 2016, China North Nuclear Fuel Company (CNNFC), filiale de la Compagnie nucléaire nationale chinoise, a lancé à sa centrale de Baotou une ligne pilote devant produire des éléments combustibles destinés au réacteur modulaire à lit de boulets à haute température de la Chine, réacteur à haute température refroidi par gaz d'une centrale de démonstration située à Shidaowan. La centrale de Baotou produit aussi un prototype d'assemblage combustible pour le modèle de réacteur à eau sous pression CAP1400 de la Chine, dont on vérifie actuellement la performance. En mai 2016, CNNFC a achevé sa première ligne de production de combustible AP1000, deux mois après que l'Administration nationale de la sûreté nucléaire chinoise a donné son approbation pour le chargement d'uranium dans la ligne de production de 400 t U par an. CNNFC fabriquera deux ensembles de faux assemblages avant de commencer la production à pleine capacité.

37. En avril 2016, Westinghouse Electric Company a annoncé l'agrandissement de son usine de combustible nucléaire à Västerås (Suède). Cette société, basée aux États-Unis et majoritairement détenue par la compagnie japonaise Toshiba, a expliqué que l'agrandissement répondait à la demande

croissante d'une diversification de l'approvisionnement en combustible nucléaire pour les réacteurs VVER-1000 situés en Europe.

38. En mai 2016, Global Nuclear Fuel – Americas (GNF-A) a convenu avec la société de combustible nucléaire russe TVEL (filiale de la société nationale d'énergie atomique « Rosatom ») de produire du combustible TVS-Kvadrat aux États-Unis d'Amérique pour les réacteurs à eau sous pression (REP) de Westinghouse. Dans le cadre d'un consortium, GNF-A gèrera le projet aux États-Unis, en se concentrant sur l'octroi d'autorisations et l'assurance de la qualité, ainsi que sur la fourniture de services d'ingénierie, tandis que TVEL apportera des compétences en matière de conception, fournira un appui technique et entreprendra la fabrication des premiers lots d'assemblages pour des programmes de production pilotes. En décembre 2016, TVEL a par ailleurs signé avec la compagnie d'électricité suédoise Vattenfall un contrat en vertu duquel elle est devenue la troisième société après AREVA et Westinghouse à fournir du combustible pour les tranches 3 et 4 de la centrale nucléaire de Ringhals.

39. En juin 2016, Indústrias Nucleares do Brasil a signé un contrat avec la société nationale argentine CONUAR pour l'exportation d'uranium enrichi. Cet accord prévoit l'exportation de quatre tonnes de poudre de dioxyde d'uranium destinée à être utilisée dans le premier chargement de combustible du réacteur modulaire CAREM de l'Argentine.

40. En juin 2016, l'Usine de construction de machines, filiale de TVEL basée à Elektrostal (Fédération de Russie), a achevé les tests d'acceptation de pastilles de combustible destinées à la centrale nucléaire de Sizewell B, au Royaume-Uni, centrale à une seule tranche comportant un réacteur à eau sous pression qui permet de répondre à 3 % de la demande d'électricité totale du Royaume-Uni. L'Usine de construction de machines a aussi achevé les tests d'acceptation de composants pour ses assemblages combustibles expérimentaux ETVS-14 et ETVS-15, ayant recours à du combustible dense composé de nitrate mixte d'uranium et de plutonium (qui seront assemblés au Complexe chimique de Sibérie) en vue d'une utilisation à titre expérimental dans la tranche à réacteur à neutrons rapides BN-600 de la centrale nucléaire de Beloyarsk et dans le futur réacteur BREST-OD-300 refroidi au plomb.

41. En juin 2016 également, trois assemblages combustibles expérimentaux contenant du combustible REMIX (« mélange régénéré ») ont été chargés dans la tranche 3 de la centrale nucléaire russe de Balakovo lors d'un arrêt de maintenance planifié. Le combustible REMIX est produit à partir d'un mélange non séparé d'uranium et de plutonium (produit par retraitement de combustible usé), dopé avec une petite quantité d'uranium enrichi. Chaque assemblage combustible expérimental est composé de six barres de combustible contenant du REMIX et de barres de combustible à l'uranium standard. Le combustible REMIX restera à Balakovo-3 pendant au moins deux cycles du combustible (environ trois ans) et les assemblages irradiés seront ensuite soumis à un examen après irradiation. La technologie du combustible REMIX aidera la Fédération de Russie à avoir un cycle fermé du combustible nucléaire et à réduire au minimum le volume de déchets radioactifs produits.

42. En juin 2016, le tribunal de grande instance de Fukuoka, au Japon, a confirmé une décision rendue en mars 2015 par le tribunal de Saga, selon laquelle le combustible à mélange d'oxydes (MOX) pourrait être utilisé dans la tranche 3 (à l'arrêt depuis 2010) de la centrale nucléaire de Genkai appartenant à la Compagnie d'électricité de Kyushu, dont le redémarrage fait l'objet d'un examen par l'Autorité de réglementation nucléaire. En septembre 2016, Shikoku Electric Power a repris l'exploitation commerciale de la tranche 3 de la centrale nucléaire d'Ikata, en utilisant en partie le combustible MOX.

43. En octobre 2016, Lightbridge et AREVA NP ont signé un accord relatif à une coentreprise 50-50 basée aux États-Unis devant permettre de mettre au point, de fabriquer et de commercialiser des

assemblages combustibles pour la plupart des types de réacteurs à eau ordinaire, notamment les REP, les réacteurs à eau bouillante, les RFMP et les réacteurs de recherche.

44. En juillet 2016, l'Entreprise de concentrés chimiques de Novosibirsk, qui fait partie de la Société de combustible TVEL, a commencé à produire la nouvelle génération de combustible nucléaire TVS-2M pour la tranche 3 de la centrale nucléaire de Tianwan, en Chine, qui est en chantier et devrait être mise en service en 2018. Ce combustible, dont le taux de combustion est élevé, permet des périodes de fonctionnement plus longues entre deux arrêts pour rechargement.

45. En août 2016, la compagnie nationale ukrainienne d'électricité nucléaire Energoatom a signé un contrat avec la société européenne d'enrichissement d'uranium URENCO. Au titre de ce contrat, URENCO fournira à l'installation de fabrication de Westinghouse située à Västerås (Suède) de l'uranium enrichi en vue de la production de combustible nucléaire pour Energoatom.

46. Le 30 août 2016, la Compagnie d'électricité de Kansai (Japon) a annoncé qu'AREVA avait commencé à fabriquer à son installation Melox, en France, 16 assemblages combustibles MOX pour la tranche 4 de la centrale nucléaire de Takahama.

47. En septembre 2016, l'usine métallurgique d'Ulba, filiale de la compagnie nationale de production d'uranium du Kazakhstan, Kazatomprom, et la société des ressources d'uranium de China General Nuclear Power Corporation (CGNPC), dont elle est une filiale, ont signé un accord relatif à la création d'une usine de production d'assemblages combustibles d'une capacité de 200 tonnes par an, se basant sur l'installation existante de l'usine métallurgique d'Ulba, pour approvisionner les réacteurs nucléaires de puissance chinois en pastilles de combustible.

48. La Commission nationale de l'énergie atomique de l'Argentine a récemment mené à bien un test d'endurance concluant de 1 500 heures dans une boucle à haute pression, dans le cadre de la vérification d'une nouvelle conception de combustible destiné à la centrale nucléaire Atucha-2, ayant des grilles d'espacement différentes, ce qui constitue une avancée remarquable dans le domaine de la technologie du combustible pour réacteur à eau lourde sous pression. La nouvelle conception a pour principaux objectifs de simplifier le processus de fabrication de combustible et de réduire son coût.

A.3.2. Assurance de l'approvisionnement

49. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs de l'Agence a adopté la résolution GOV/2010/70, par laquelle il approuvait la création de la banque d'uranium faiblement enrichi de l'AIEA (banque d'UFE) telle que prévue dans le document GOV/2010/67. En juin 2015, il a approuvé un accord avec l'État hôte entre l'Agence et le Kazakhstan concernant la banque d'UFE de l'AIEA, et en décembre 2015, l'Agence et le Kazakhstan ont achevé le cadre juridique de base relatif à la création de cette banque d'UFE sur le site de l'usine métallurgique d'Ulba, à Ust-Kamenogorsk. Depuis lors, l'Agence et le Kazakhstan ont avancé dans la mise en œuvre de ce projet.

50. En janvier 2016, le Kazakhstan a promulgué la loi sur l'utilisation de l'énergie atomique, après quoi le cadre réglementaire a été renforcé, un certain nombre de règlements ont déjà été adoptés et d'autres sont au stade final de l'examen. Une étude de faisabilité a permis de conclure qu'il était plus rentable de construire une nouvelle installation d'entreposage pour la banque d'UFE de l'AIEA que de moderniser une installation existante, et que cela permettrait de prendre des dispositions plus simples et solides en matière de sécurité, ainsi que d'intégrer de meilleures caractéristiques de sûreté dans la conception. L'équipe d'une mission de l'Agence s'est rendue à l'usine métallurgique d'Ulba en mars 2016 pour évaluer l'avancement des travaux relatifs à la conception de la nouvelle installation d'entreposage et a conclu que des mesures adéquates pour assurer la sûreté et la sécurité nucléaires y étaient intégrées. La construction de la nouvelle installation d'entreposage a débuté à l'été 2016 et le Kazakhstan prévoit qu'elle sera mise en service et prête à recevoir de l'UFE au deuxième semestre de 2017. L'Agence a commencé les activités de préparation à l'acquisition de l'UFE qui sera

entreposé dans sa banque d'UFE. Un programme de gestion des cylindres, qui assurera la sûreté et la sécurité à long terme des cylindres en place, ainsi que pendant leur transport ultérieur, sans qu'il soit nécessaire de faire décanter périodiquement l'UFE qu'ils contiennent, est en cours d'achèvement.

51. Les autres mécanismes d'assurance de l'approvisionnement en place sont décrits dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012* (document GC(56)/INF/3).

A.3.3. Partie terminale

Gestion du combustible usé

52. La durée d'entreposage est souvent prolongée au-delà de la durée de vie initialement autorisée des installations d'entreposage, voire au-delà de leur durée de vie nominale. La gestion du vieillissement est devenue une priorité au cours des dernières années, en raison du temps que requiert la mise au point de solutions de recyclage avancées ou la création d'installations de stockage définitif. C'est notamment le cas dans les États où des systèmes d'entreposage à sec ont été mis en place pour une utilisation à relativement court terme.

53. Afin d'assurer une sûreté continue, des orientations en matière de gestion du vieillissement et des projets appuyant la recherche-développement (R-D) sont élaborés, notamment en Allemagne et aux États-Unis d'Amérique. Par exemple, la NRC a élaboré un rapport intitulé *Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report*, publié pour observations en septembre 2016, afin d'aider les exploitants d'installations d'entreposage de combustible indépendants lors du renouvellement de leur licence. Pour élaborer les bases techniques et la méthodologie en vue de fournir des orientations aux États Membres, l'Agence a aussi lancé en octobre 2016 un projet de recherche coordonnée sur les programmes de gestion du vieillissement des systèmes d'entreposage à sec du combustible usé.

54. On estime que la quantité de combustible usé entreposé a atteint 273 000 tonnes de métal lourd (t ML) fin 2016 et s'accumule au rythme d'environ 7 000 t ML par an⁷. En 2016, cinq installations supplémentaires d'entreposage de combustible usé hors du site du réacteur ont été mises en service. Ce sont toutes des installations d'entreposage à sec qui utilisent la technologie des châteaux en béton. Elles sont situées à Ignalina (Lituanie), à Palo Verde (Mexique), à Sizewell (Royaume-Uni), à Watts Bar (États-Unis d'Amérique) et à Summer (États-Unis d'Amérique). La figure A-5 indique la répartition mondiale des 151 installations d'entreposage hors du site du réacteur en exploitation dans 27 pays. Les États-Unis, qui ont actuellement 70 installations d'entreposage à sec abritant environ 36 % de leur stock total de combustible usé, continuent d'en créer chaque année de nouvelles. Les projections actuelles indiquent que d'ici 2020, ce pays possèdera 74 installations indépendantes d'entreposage à sec de combustible usé.

⁷ Chaque année, quelque 10 000 t ML de combustible usé sont déchargées de centrales nucléaires dans le monde.

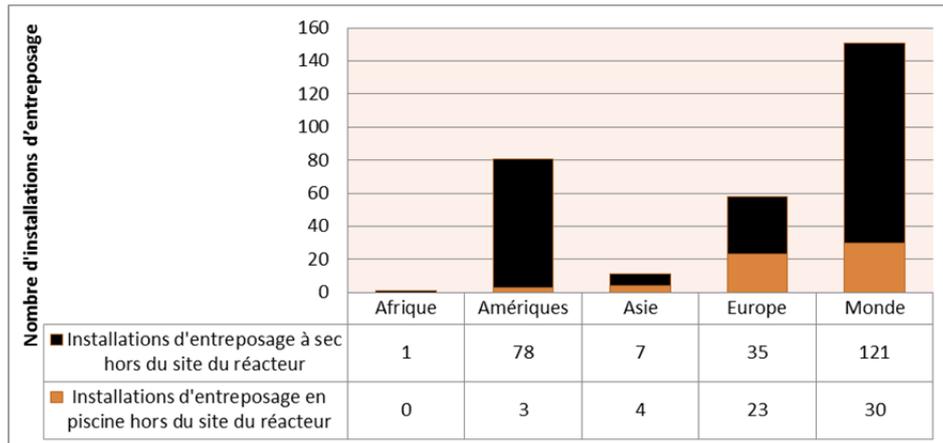


FIG. A-5. Répartition mondiale des installations d'entreposage de combustible usé hors du site du réacteur.

55. Il y a eu du retard, pour des raisons diverses, dans la mise en œuvre de nouvelles installations d'entreposage hors du site du réacteur en Espagne, au Japon et en Ukraine. L'une des installations concernées, celle de Mutsu, au Japon, devrait maintenant être opérationnelle en 2019.

56. En 2016, les préparatifs pour le retrait du combustible de la centrale nucléaire de Wylfa, au Royaume-Uni, ont commencé après que le dernier réacteur en exploitation a été mis à l'arrêt le 30 décembre 2015. La centrale nucléaire de Wylfa, qui date des années 1970, possède les plus anciennes installations d'entreposage à sec du combustible usé en service pour le combustible de réacteurs de puissance. L'objectif est de retirer le combustible du cœur des réacteurs et des installations d'entreposage à sec associées d'ici la fin de 2018. Le Ministère britannique de l'économie, de l'énergie et de la stratégie industrielle a lancé un nouveau programme britannique de recherche et d'innovation dans le domaine nucléaire. La phase initiale de ce programme, qui dispose de 20 millions de livres sterling (25 millions de dollars) de fonds de 2016 à 2018, couvre cinq grands domaines : les combustibles avancés, les matières et leur fabrication, la conception des réacteurs, le recyclage avancé et un ensemble d'outils stratégiques. Cette initiative s'inscrit dans la volonté du gouvernement de doubler les dépenses d'innovation énergétique du Royaume-Uni, qui devraient dépasser 40 millions de livres sterling (50 millions de dollars) par an d'ici 2021.

57. La Fédération de Russie a mis en place un nouveau programme concernant la gestion de son combustible nucléaire usé pour la période « 2016-2018 et jusqu'en 2020 », pour remplacer le programme précédent, devenu caduc. Ce nouveau programme couvre le transport de matières de combustible nucléaire usé des centrales nucléaires russes jusqu'à l'usine de retraitement de Mayak, à Ozersk, ou jusqu'aux installations centralisées d'entreposage provisoire du Combinat minier et chimique, à Zheleznogorsk, en vue de leur retraitement. Le site du Combinat minier et chimique possède des piscines où pourra être entreposé le combustible nucléaire usé des réacteurs VVER-1000 des centrales nucléaires de Balakovo, de Kalinin, de Novovoronezh et de Rostov, ainsi que du réacteur à neutrons rapides BN-600 de la centrale nucléaire de Beloyarsk. Depuis 2012, le site du Combinat minier et chimique possède également une installation centralisée d'entreposage provisoire à sec pouvant recevoir jusqu'à 8 129 tonnes de combustible nucléaire usé russe des réacteurs RBMK-1000 des centrales nucléaires de Leningrad, de Kursk et de Smolensk. La productivité de l'usine de retraitement de Mayak a augmenté de 35 %. En 2016, cette usine de retraitement a reçu pour la première fois du combustible nucléaire usé du réacteur RBMK-1000 de la centrale nucléaire de Leningrad. On a aussi commencé à y retraiter le combustible usé, contenant de l'uranium et du zirconium, provenant de brise-glaces soviétiques et russes, qui s'est accumulé pendant des décennies dans des installations d'entreposage.

58. La Lituanie a construit, à côté de sa centrale nucléaire d'Ignalina mise à l'arrêt, une installation d'entreposage provisoire de combustible usé destinée à recevoir le combustible nucléaire usé déchargé des tranches 1 et 2 de cette centrale. Cette installation comporte environ 190 châteaux en béton armé pouvant recevoir quelque 17 000 assemblages combustibles, qui seront entreposés pendant 50 ans. Des essais en inactif ayant été menés à bien en juin 2016, l'installation est à un stade avancé en vue de sa mise en service.

59. Des difficultés financières et des questions relatives à l'attribution des terres dans la zone d'exclusion de la centrale nucléaire de Tchernobyl sont les principales raisons pour lesquelles le projet de construction de l'installation centralisée d'entreposage de combustible usé de l'Ukraine a été reporté à fin 2018.

60. Les travaux préliminaires relatifs à la sélection du site d'une nouvelle usine de retraitement de combustible à Lianyungang, dans la province de Jiangsu (Chine), ont été suspendus en raison d'un problème d'acceptation par le public. Cependant, le projet de construction demeure, car cinq autres provinces chinoises sont envisagées pour sa mise en œuvre.

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

Déclassement des installations nucléaires

61. Cent cinquante-huit réacteurs de puissance dans le monde ont été mis à l'arrêt ou sont en cours de déclassement, et 17 d'entre eux ont été entièrement déclassés. Plus de 150 installations du cycle du combustible ont été définitivement mises à l'arrêt ou sont en cours de déclassement, et 127 ont été entièrement déclassées. On dénombre également plus de 180 réacteurs de recherche à l'arrêt ou en cours de déclassement. Plus de 300 réacteurs de recherche et assemblages critiques ont été entièrement déclassés.

62. En 2016, des approches innovantes ont été mises en œuvre à la centrale nucléaire de Dungeness A, au Royaume-Uni, comme le recours à des plongeurs pour nettoyer d'anciens bassins de refroidissement. D'autres travaux de recherche-développement, menés notamment dans des pays qui possèdent depuis longtemps un programme électronucléaire, comme la Belgique, l'Espagne, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, le Japon et le Royaume-Uni, apportent un appui continu. L'initiative RACE (« Applications à distance dans des environnements difficiles ») menée au Royaume-Uni, qui a débuté officiellement en mai 2016, en est un exemple récent.

63. Le déclassement des centrales nucléaires après un accident pose un problème spécifique et complexe auquel quelques pays sont actuellement confrontés. Des progrès importants ont été accomplis dans ce domaine au Japon, avec la préparation au déclassement de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (voir l'encadré ci-dessous pour plus de détails). L'achèvement de la nouvelle enveloppe de confinement sûr au-dessus de la tranche 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, après plusieurs années de travaux de construction et grâce au soutien de donateurs internationaux, est un autre exemple d'activités consécutives à un accident.



FIG. A-6. La nouvelle enveloppe de confinement sûr construite au-dessus de la tranche 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl (à gauche, vue depuis le site de construction ; à droite, vue depuis la tranche 3). La structure est haute de 108 mètres, longue de 162 mètres et large de 257 mètres. Elle pèse environ 36 000 tonnes. (Photos : centrale nucléaire de Tchernobyl)

64. La mise en œuvre de projets de déclasserement se poursuit aussi en Bulgarie, en Lituanie et en Slovaquie, où des centrales nucléaires ont été mises à l'arrêt avant la fin de leur durée de vie nominale. Ces projets bénéficient de l'appui financier de la Banque européenne pour la reconstruction et le développement.



FIG. A-7. Activités de démantèlement dans le bâtiment des turbines des tranches 1 (à gauche) et 2 (à droite) de la centrale nucléaire d'Ignalina, en Lituanie. (Photos : centrale nucléaire d'Ignalina)

Progrès dans le déclasserement de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi

Un endommagement du cœur et/ou des explosions d'hydrogène se sont produits dans quatre des six réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Le déclasserement de ces réacteurs est un projet sans précédent exécuté dans le cadre de la feuille de route à moyen et long termes⁸ et du Plan stratégique technique⁹ adoptés par les autorités japonaises. Lors d'une manifestation organisée en marge de la 60^e session ordinaire de la Conférence générale de l'Agence en septembre 2016, des représentants du Japon ont mis en lumière les progrès accomplis et présenté des plans destinés à répondre, en coopération avec la communauté internationale, à des difficultés telles que l'extraction des débris de combustible.

⁸ *Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*, publié par l'Inter-Ministerial Council for Contaminated Water and Decommissioning Issues le 12 juin 2015, disponible à l'adresse suivante : http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20150725_01b.pdf

⁹ Un résumé de *Technical Strategic Plan 2016 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.*, publié par l'Organisme chargé de faciliter la réparation des dommages nucléaires et le déclasserement le 13 juillet 2016, est disponible à l'adresse suivante : http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20160926_SP2016esum.pdf

La contamination de l'eau résultant du passage des eaux souterraines dans les bâtiments des réacteurs et de leur mélange avec le caloporteur servant à refroidir les débris de combustible pose un problème important. L'eau contaminée est traitée à l'aide d'un système d'extraction de nucléides. Dans le cadre des efforts visant à maintenir l'eau éloignée des sources contaminées, des canalisations de congélation ont été installées pour que les murs étanches côté montagne bloquent les eaux souterraines, et la congélation partielle des murs a commencé en mars 2016. Afin d'empêcher les fuites d'eau contaminée, les murs étanches côté mer ont été fermés en octobre 2015.

Les 1 535 assemblages combustibles entreposés dans la piscine de la tranche 4 ont tous été retirés en 2014. En préparation du retrait des assemblages combustibles de la tranche 1 (392 assemblages), de la tranche 2 (615 assemblages) et de la tranche 3 (566 assemblages), des travaux de décontamination et de blindage des planchers de service ont commencé en vue de réduire encore l'émission de rayonnements.

L'état de l'intérieur des enveloppes de confinement primaire des tranches de réacteurs a été examiné au moyen de la tomographie muonique et de la robotique. L'inspection de l'intérieur de l'enveloppe de confinement primaire de la tranche 1 par un robot a permis de confirmer l'absence de dommages importants de l'équipement, comme les pompes de recirculation du circuit primaire, et de vérifier que de vastes zones de la partie inférieure du puits sec étaient couvertes de sédiments. Dans la tranche 2, la tomographie muonique a permis de mettre en évidence la présence d'une substance de densité élevée dans la partie inférieure de la cuve sous pression du réacteur, laquelle semble correspondre aux débris de combustible.



FIG. A-8. Robot à forme adaptable utilisé pour inspecter l'intérieur de l'enveloppe de confinement primaire de la tranche 1.

(Photos : Institut international de recherche pour le déclassé des centrales nucléaires, Japon)

Des travaux intensifs de décontamination sont effectués pour améliorer l'environnement sur le site. La dose effective supplémentaire dans la zone du site étant inférieure à 1 mSv/an, le port d'un masque intégral ou de vêtements de protection n'est plus nécessaire dans environ 90 % du site.

Un conseil chargé des partenariats en recherche-développement sur le déclassé a été créé par l'organisme chargé de faciliter la réparation des dommages nucléaires et le déclassé, en vue d'améliorer la recherche-développement en favorisant une collaboration avec les institutions pertinentes. L'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) a créé une nouvelle organisation mondiale de recherche-développement basée au Japon et appelée Laboratoires de collaboration pour une science avancée du déclassé. En outre, elle a mis en service le Centre de développement de technologies à distance de Naraha, où des équipements actionnés à distance, comme des robots, et des processus connexes, seront mis au point et testés. Elle a aussi commencé la construction du Centre d'analyse et de recherche d'Okuma.

Gestion des sources radioactives scellées retirées du service

65. Les options de gestion de la fin de vie des sources radioactives scellées retirées du service ont été examinées plus avant, notamment le stockage conjoint avec d'autres déchets dans des installations appropriées. Le nombre d'options de recyclage et de réexpédition a augmenté. Plusieurs pays,

notamment le Ghana, la Malaisie et les Philippines, ont des projets de stockage en puits à divers stades d'avancement.

66. En 2016, un certain nombre d'opérations consistant à enlever des sources radioactives scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et à les placer sous contrôle dans des conditions de stockage adéquates ont été menées à bien. Des sources radioactives scellées retirées du service de catégorie 1 de fabrication française ont été réexpédiées du Liban et de Tunisie (une source dans chaque cas), et deux autres sources ont été réexpédiées du Cameroun. Une source radioactive scellée de catégorie 1 a été retirée d'une tête radiogène en Ouganda et transférée pour être entreposée de manière sûre et sécurisée. Deux sources radioactives scellées de catégorie 1 ont été retirées d'un hôpital et entreposées de manière sûre et sécurisée en Jordanie. Le retrait de sources des catégories 1 et 2 a débuté dans plusieurs États Membres, notamment en Albanie, au Burkina Faso, dans l'ex-République yougoslave de Macédoine et au Liban, et devrait être achevé en 2017.

67. Des progrès importants ont été accomplis dans l'incorporation d'une cellule chaude mobile dans plusieurs conceptions de stockage en puits, permettant de réduire la manipulation des sources et d'éliminer tout transport inutile. Par ailleurs, une boîte à outils mobile a été mise au point pour faciliter les opérations de conditionnement des sources des catégories 3 à 5 et préparer le stockage en puits.

68. Des opérations de conditionnement de sources radioactives scellées retirées du service ont été menées à bien en Indonésie, en Malaisie, au Népal, aux Philippines, en Thaïlande et au Viet Nam, où le personnel local a reçu une formation appropriée.

69. L'Agence a donné accès au Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes à un plus grand nombre d'utilisateurs dans les États Membres, facilitant ainsi le recensement de telles sources trouvées sur le terrain. En 2016, on s'est attaché à fournir davantage d'informations sur les sources et les dispositifs, pour que le catalogue soit encore plus utile.

70. Le retrait de sources scellées hautement radioactives du Brésil a commencé en octobre 2016 et devrait être terminé en février 2017. En vertu d'un accord de coopération trilatéral entre le Brésil, le Canada et les États-Unis d'Amérique, plus de 80 sources radioactives scellées retirées du service des catégories 1 et 2 d'origine canadienne et américaine seront traitées et expédiées à l'étranger. Les sources d'origine canadienne seront envoyées à la société Gamma-Service Recycling, à Leipzig (Allemagne), pour y être recyclées, tandis que celles d'origine américaine seront réexpédiées aux États-Unis d'Amérique. Cette opération sera effectuée par des équipes formées de la South African Nuclear Energy Corporation.

Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif

71. L'Argentine a mis en service une installation au Centre atomique Ezeiza pour la cimentation et le compactage de déchets de faible activité provenant de la Commission nationale de l'énergie atomique (principalement de l'exploitation d'un réacteur de recherche, de la production de radio-isotopes et d'activités de recherche) ou générés par d'autres dispositifs externes (servant à la fabrication de combustible ou utilisés dans des applications médicales, industrielles et de recherche).

72. Une autorisation pour la pleine exploitation de l'installation de solidification de Fortum, à la centrale nucléaire de Loviisa, a été octroyée par l'Autorité de sûreté radiologique et nucléaire de la Finlande. Cette installation traitera les déchets liquides de faible ou moyenne activité (notamment les résines échangeuses d'ions et les boues) déjà existants ou qui seront générés à l'avenir par l'exploitation de la centrale. Elle est une bonne illustration du fait que la planification de la gestion intégrée des déchets conduit à la conception d'une installation unique destinée à gérer efficacement les déchets hérités du passé, les déchets résultant de l'exploitation actuelle et les stocks de déchets futurs.

73. La réduction des déchets au minimum est un objectif majeur à Fukushima Daiichi, où de grandes quantités d'articles solides contaminés, comme des vêtements de protection (gants, combinaisons

protectrices) et des déchets résultant de l'exploitation (papier, plastique, tissu, bois), sont générés quotidiennement. Par conséquent, la Compagnie d'électricité de Tokyo a récemment mis en service une installation d'incinération de déchets solides divers, comprenant deux lignes pouvant traiter 300 kilogrammes de déchets par heure chacune. Les cendres générées représentent une petite fraction du volume initial et seront stockées dans des fûts, sur le site, en attendant leur stockage définitif.

74. L'Australie a achevé la conception d'une usine intégrée complète destinée à traiter les déchets générés par son installation de production de molybdène 99 au moyen de la technologie « Synroc ». La construction devrait commencer en 2017. Le processus Synroc consiste à immobiliser des déchets radioactifs liquides dans une matrice durable en « roche synthétique » en vue de leur stockage définitif.

75. Une usine de vitrification intra-conteneur a été mise en service à la centrale de Sellafield, au Royaume-Uni. La vitrification est une technologie éprouvée qui consiste à immobiliser des liquides et des boues sous une forme de déchet vitrifiée durable convenant au stockage définitif. Le système de vitrification intra-conteneur GeoMelt est conçu pour traiter des flux de déchets problématiques de petit volume pour lesquels on ne dispose actuellement pas de moyen de stockage définitif.

76. En mars 2016, Sellafield Ltd, au Royaume-Uni, a annoncé qu'elle avait transféré l'ensemble des stocks de combustible nucléaire en vrac hérités du passé de sa piscine d'entreposage du combustible des piles vers un bâtiment d'entreposage moderne. Cela a permis de réduire de 70 % les niveaux de radioactivité dans la piscine d'entreposage, vieille de 68 ans, et donc de réduire de manière importante les risques pour les personnes et pour l'environnement.

Stockage définitif des déchets radioactifs

77. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs, sauf les déchets de haute activité et/ou le combustible nucléaire usé (déclaré comme déchet), sont en service dans le monde. Ainsi, il existe des installations de stockage définitif en tranchées destinées aux déchets de très faible activité (en Espagne, aux États-Unis, en France et en Suède, par exemple) ou, dans des régions arides, aux déchets de faible activité (DFA) (en Afrique du Sud et aux États-Unis, par exemple), des installations construites en surface ou à faible profondeur destinées aux DFA (comme en Chine, en Espagne, en France, en Hongrie, en Inde, au Japon, en Pologne, en République tchèque, au Royaume-Uni et en Slovaquie) et des installations d'entreposage en structures artificielles destinées aux déchets de faible et moyenne activité (DFMA) construites dans des formations géologiques, à différentes profondeurs (en Allemagne, aux États-Unis, en Finlande, en Hongrie, en Norvège, en République de Corée et en République tchèque, par exemple).

78. D'autres installations de stockage définitif de DFMA, notamment en Allemagne (Konrad), en Belgique (Dessel), en Bulgarie (Radiana), au Canada (Kincardine), en Lituanie (Stabatiškės), en République islamique d'Iran (Talmesi), en Roumanie (Saligny) et en Slovénie (Vrbina), sont à différentes étapes d'autorisation ou de construction.

79. Les options de stockage définitif des déchets de matières radioactives naturelles varient suivant les réglementations nationales : leur gamme s'étend des installations de stockage définitif en tranchées à celles construites sous la surface (en Norvège, par exemple).

80. En Australie, le gouvernement d'Australie du Sud a reçu le rapport de sa Commission royale du cycle du combustible nucléaire et a annoncé qu'il donnerait suite à neuf des 12 recommandations qui y sont formulées. Il poursuivra notamment ses investigations afin d'évaluer le bien-fondé de la création en Australie du Sud d'installations d'entreposage et de stockage définitif de combustible nucléaire usé et de déchets de moyenne activité en provenance du monde entier.

81. En Bulgarie, l'entreprise nationale chargée des déchets radioactifs a reçu une autorisation et commencé la construction d'une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur destinée à des DFA sur le site de Radiana, près de la centrale nucléaire de Kozloduy.

82. Au Canada, le gouvernement fédéral devrait prendre à la fin de 2017 une décision relative à l'évaluation de l'impact environnemental du projet de dépôt géologique profond de déchets de faible ou moyenne activité de la société Ontario Power Generation sur le site de Bruce à Kincardine (Ontario). Par ailleurs, une évaluation de l'impact environnemental a été mise en place dans le cadre du projet de création par les Laboratoires nucléaires canadiens d'une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur de déchets de faible activité et d'autres déchets sur le site de Chalk River.

83. En Chine, l'élaboration du programme de stockage définitif en formations géologiques profondes a progressé, puisqu'il a été décidé de construire une installation souterraine expérimentale dans une formation cristalline dans la région de Beishan. On y a procédé à une étude de sites et sélectionné par itération des sites dans une formation hôte sédimentaire.

84. En mars 2016, le gouvernement estonien a décidé que la future installation de stockage définitif du pays serait construite sur le même site que l'actuelle installation d'entreposage centralisée, dans le centre sous-marin de Paldiski.

85. En Finlande, des travaux de construction ont débuté en décembre 2016 à Olkiluoto en vue de la création de la première installation de stockage géologique de combustible nucléaire usé au monde.

86. À la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire en France, l'Agence a mené en novembre 2016 un examen par des pairs des options de sûreté dans le cadre du projet de stockage géologique de déchets de haute activité (Cigéo).

87. Le gouvernement allemand a reçu le rapport de sa commission nationale concernant l'entreposage de déchets hautement radioactifs, lequel préconise un processus de choix de site national pour un dépôt géologique profond. Ce rapport contient des recommandations détaillées sur les critères d'exclusion en matière de sûreté et les critères des évaluations comparatives dont il devrait être tenu compte, ainsi que sur les processus de participation des parties prenantes qu'il convient d'établir pour avoir une large acceptation par le public des décisions relatives au choix du site. Le gouvernement a aussi reçu un rapport sur l'estimation des coûts et le financement liés aux engagements relatifs à l'aval du cycle nucléaire pris au niveau, notamment pour le stockage définitif des déchets radioactifs.

88. En République islamique d'Iran, la construction de l'installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur de Talmesi se poursuit, et les premiers conteneurs de déchets ont été acceptés pour un entreposage sur le site, en attendant le début des opérations de stockage définitif.

89. La République de Corée a défini sa politique nationale relative à la gestion des déchets de haute activité sur la base des recommandations de sa Commission de mobilisation publique sur la gestion du combustible nucléaire usé, laquelle est assortie d'un calendrier pour l'élaboration d'un programme de stockage géologique, comprenant le choix du site d'un laboratoire de recherche souterrain ainsi que la construction et l'exploitation d'une installation de stockage géologique. L'autorisation de la deuxième étape de l'installation de stockage définitif de DFMA de Wolsong, qui prévoit la construction de casemates de stockage définitif en surface ou à faible profondeur, est actuellement à l'examen.

90. La stratégie de la Fédération de Russie, consistant à mettre en place un réseau d'installations de stockage définitif en surface ou à faible profondeur dans tout le pays, progresse. L'Exploitant national pour la gestion des déchets radioactifs a obtenu deux licences pour le stockage définitif en surface ou à faible profondeur sur un site nucléaire existant dans la région de l'Oural, et a encore des demandes d'autorisation en instance pour le stockage définitif sur deux autres sites nucléaires existants. Une demande d'autorisation relative à une installation souterraine expérimentale, première étape de la

future installation de stockage définitif en formations géologiques profondes prévue près de Krasnoyarsk, est aussi à l'examen.

91. En juin 2016, l'Autorité suédoise de sûreté radiologique a approuvé la demande d'autorisation relative au dépôt géologique profond de combustible usé, et elle devrait se réunir pour une autre séance importante en 2017. La procédure d'autorisation relative à l'agrandissement du dépôt destiné à des DFMA à courte période, appelé dépôt final pour des déchets radioactifs à courte période, est toujours en cours.

92. La Suisse a progressé dans la deuxième étape du processus de choix de site pour son dépôt géologique profond. Elle a en effet collaboré activement avec les « Conférences régionales » des parties prenantes des régions envisagées pour le site, achevé sa campagne de caractérisation sismique des sites en 3D, et obtenu des autorisations de forage pour son programme de caractérisation du site basée sur le forage. Les évaluations comparatives sont fondées sur 13 critères et 49 indicateurs établis par l'autorité nationale de sûreté.

93. En juillet 2016, l'autorité de planification du comté de Cumbria (Royaume-Uni) a autorisé la construction de deux nouvelles casemates au dépôt pour déchets de faible activité du Royaume-Uni, de même qu'un agrandissement pour une troisième casemate. Cela garantit l'avenir de l'installation, située près du village de Drigg, jusqu'en 2050. Les travaux de construction devraient commencer en 2017.

A.4. Sûreté

94. On continue d'accomplir des progrès dans le renforcement et l'amélioration de la sûreté des centrales nucléaires dans le monde entier, notamment en tirant des enseignements 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.

95. L'Agence a défini des priorités en matière de sûreté nucléaire pour renforcer le cadre mondial de sûreté nucléaire. Ces priorités couvrent tout l'éventail des activités de l'Agence dans les domaines de la sûreté nucléaire et radiologique et de la sûreté du transport et des déchets. L'Agence a publié des prescriptions de sûreté révisées dans la collection Normes de sûreté de l'AIEA afin de tenir compte des enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi. Ces publications comprennent cinq prescriptions de sûreté concernant les centrales nucléaires, des révisions ciblées publiées « par amendement ». Par ailleurs, une révision complète de deux autres prescriptions de sûreté relatives à la capacité de direction et de gestion pour la sûreté et à la sûreté des réacteurs de recherche a également été publiée. On a continué l'examen et la révision des guides de sûreté connexes¹⁰.

96. L'analyse des données du Système international de notification pour l'expérience d'exploitation relatives aux centrales nucléaires met en évidence un certain nombre de difficultés actuelles, notamment des vulnérabilités dans la conception de centrales ou les pratiques d'exploitation dans certaines situations de risque externe, ainsi qu'en ce qui concerne la réalisation de modifications dans les centrales. Les données montrent aussi que la surveillance de l'exploitant reste un défi et que le nombre d'incidents liés à la dégradation des composants due au vieillissement augmente.

97. Des programmes d'exploitation à long terme et de gestion du vieillissement sont mis en œuvre pour un nombre croissant de réacteurs nucléaires de puissance dans le monde. Sur les 450 réacteurs de

¹⁰ Pour plus de détails, voir le Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour 2017 de l'AIEA (document GOV/2017/3).

ce type en service dans le monde à la fin de 2016, 46 % l'étaient depuis 30 à 40 ans, et 15 % depuis plus de 40 ans.

98. Le Groupe international pour la sûreté nucléaire (INSAG) a noté que des conceptions de réacteurs modernes sont actuellement mises au point pour réduire à des niveaux très bas les risques liés à des événements internes. Les événements externes devraient constituer la principale source de risques, et méritent donc une attention continue dans les années à venir. Les experts participant aux réunions techniques de l'Agence continuent d'exprimer leur intérêt pour les enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi en ce qui concerne : a) la difficulté d'évaluer les risques extrêmes, par définition incertains, b) la nécessité d'utiliser des données historiques et préhistoriques pour évaluer les risques externes, c) la prise en considération de risques externes multiples, d) la prise en considération de l'incidence des risques externes sur les sites à plusieurs tranches, et e) le recours à des analyses probabilistes des événements externes.

99. La sûreté d'exploitation des centrales nucléaires reste élevée, comme le montrent les indicateurs de sûreté recueillis par l'Agence et l'Association mondiale des exploitants nucléaires. La figure A-9 indique le nombre d'arrêts d'urgence ou de mises à l'arrêt non programmés manuels ou automatiques, par tranche, pour 7 000 heures d'exploitation (environ un an). Bien que le nombre d'arrêts d'urgence ne soit qu'un indicateur parmi d'autres de la performance en matière de sûreté, il est couramment utilisé pour donner une idée de l'efficacité des mesures prises pour améliorer la sûreté des centrales en réduisant le nombre de transitoires thermohydrauliques et de réactivité indésirables et non programmés nécessitant un arrêt du réacteur.

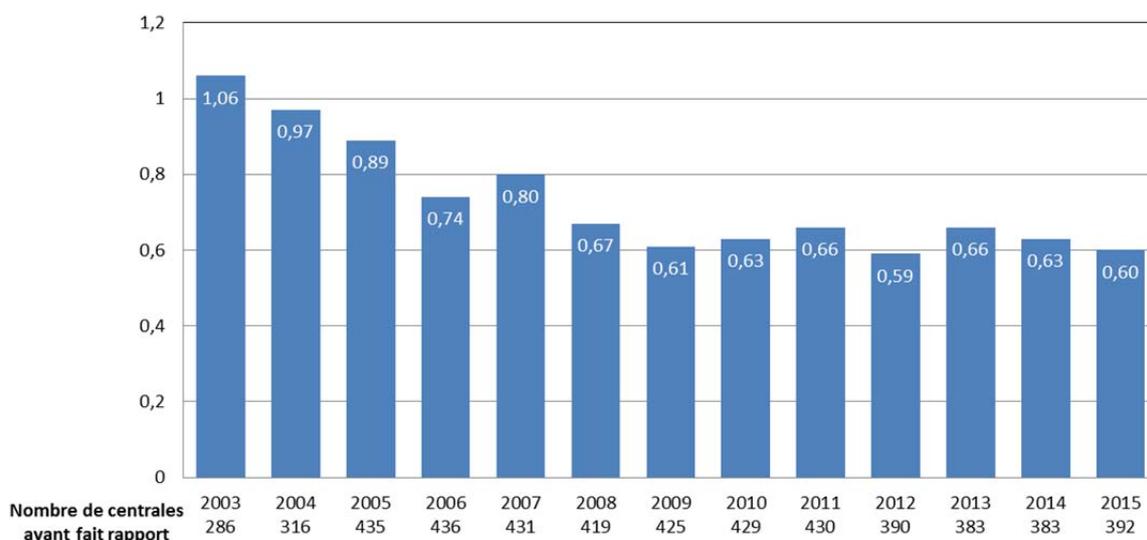


FIG. A-9. Taux moyen d'arrêts non programmés (automatiques ou manuels) – nombre d'arrêts non programmés pour 7 000 heures de fonctionnement d'une tranche.

(Source : Système d'information de l'AIEA sur les réacteurs de puissance, www.iaea.org/pris)

100. Dans plusieurs États Membres, les doses collectives résultant des utilisations médicales des rayonnements sont supérieures aux doses résultant du rayonnement de fond naturel et à celles provenant d'autres sources anthropiques. Compte tenu de l'utilisation accrue de la technologie des rayonnements à des fins pacifiques, cette situation devrait être observée dans un nombre croissant d'États Membres. Les expositions médicales pourraient être évitées dans une large mesure (20 à 50 % dans certaines régions) si les actes médicaux étaient mieux sélectionnés et si des mesures de protection radiologique efficaces étaient en place. Les méthodes établies pour optimiser la protection radiologique des patients lors de l'imagerie diagnostique n'ont été que partiellement mises en œuvre

dans le monde, et il est nécessaire de déployer des efforts continus afin qu'elles soient appliquées correctement et de manière plus généralisée en vue d'améliorer la sûreté et la qualité.

101. De plus en plus, des technologies et des procédures complexes de radiothérapie sont adoptées dans des régions où on ne les utilisait pas encore, d'où la nécessité de mettre en place des mesures de sûreté appropriées. Si les experts s'accordent généralement à penser que la radiothérapie est une méthode de traitement efficace, il est aussi reconnu que les mesures de sûreté doivent encore être améliorées.

B. Données atomiques et nucléaires

102. L'Organisation internationale de collaboration pour une bibliothèque de données évaluées, qui coordonne l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (OCDE/AEN), a permis de progresser dans l'évaluation de la section efficace de capture neutronique de nucléides particulièrement importants pour les technologies nucléaires (isotopes de l'oxygène, du fer, de l'uranium et du plutonium). L'action coordonnée d'experts des sciences nucléaires venus des quatre coins du monde a contribué, dans le cadre de cette organisation, à améliorer la précision de simulations de criticité nucléaire et de transport de neutrons menées à grande échelle. Les évaluations de cette organisation méritent d'être ajoutées aux bibliothèques de données nucléaires d'envergure mondiale, telles que le Fichier de données nucléaires évaluées ENDF/B-VIII (États-Unis d'Amérique), la Bibliothèque de données neutroniques évaluées du Japon, le Fichier commun de données évaluées sur la fission et la fusion (OCDE/AEN), la bibliothèque de données nucléaires évaluées de la Chine et la bibliothèque de données nucléaires évaluées à l'aide du code TALYS (Commission européenne/AIEA).

103. Le Réseau international des évaluateurs de données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux est une initiative internationale de collaboration qui vise à recenser et à évaluer les propriétés de base relatives à la structure et à la décroissance des nucléides. Depuis que la base de données du Réseau est associée à des techniques modernes de communication, telles que le site Web « Graphique interactif des nucléides » de l'Agence et l'application « Isotope Browser », lancée par l'Agence en 2013, les spécialistes des sciences nucléaires l'utilisent beaucoup plus. Cette application mobile gratuite pour Android et iOS, qui permet d'obtenir des informations relatives aux nucléides sur un appareil mobile, a déjà été téléchargée 40 000 fois.

104. Depuis 1935, la base de données expérimentales sur les réactions nucléaires (EXFOR) a emmagasiné plus de 22 000 ensembles de données. Cet outil unique en son genre constitue le fondement des bibliothèques de données qui sont utilisées pour toutes les technologies nucléaires, à savoir essentiellement pour l'analyse des centrales nucléaires, les questions liées au cycle du combustible, les modèles de réacteurs innovants, la fusion et la production d'isotopes à des fins médicales. De nouveaux partenariats ont été établis, en particulier en Chine et en Inde, pour mettre à jour cette base.

105. Une méthode novatrice consistant à analyser les dommages d'irradiation à partir de données nucléaires permet actuellement d'établir des liens entre des phénomènes physiques d'échelles très diverses. Grâce à la puissance des ordinateurs actuels, il est à présent possible d'évaluer les dommages de façon plus scientifique – à l'aide des équations NRT-dpa¹¹ (déplacements par atome), arc (recombinaison athermique corrigée)-dpa et rpa (remplacements par atome), ainsi que de la grandeur

¹¹ L'équation NRT-dpa, qui permet de mesurer l'endommagement d'un matériau, a été proposée par Norgett, Robinson et Torrens en 1975.

kerma (énergie cinétique libérée dans la matière) et de la production de gaz –, en quantifiant les incertitudes. Ces progrès auront des répercussions dans le domaine du blindage des réacteurs à fission et à fusion, ainsi que des accélérateurs.

106. Les activités de production d'isotopes à des fins médicales au moyen d'accélérateurs se sont multipliées, de même que les publications consacrées à ce sujet, et en conséquence, les bibliothèques de données nucléaires relatives aux réactions induites par des particules chargées ont été de plus en plus utilisées, le but étant de trouver les meilleurs moyens de produire ces radio-isotopes médicaux.

107. La propagation des incertitudes relatives aux données nucléaires et atomiques de base, qui était habituellement utilisée pour évaluer l'incertitude de la criticité dans les dispositifs nucléaires de grande envergure, sert maintenant à évaluer également d'autres facteurs d'une exploitation sûre et fiable de ces dispositifs. Les estimations des incertitudes sont désormais prises en compte dans des domaines importants de la recherche, notamment l'évaluation des dommages d'irradiation dans les réacteurs à fission et à fusion, l'utilisation de données atomiques et moléculaires pour la modélisation de l'hydrogène et de l'hélium, dans leur état excité, dans le plasma de fusion, et l'obtention de données sur l'érosion et la rétention du tritium dans les matériaux faisant face au plasma constitués de béryllium.

108. La Conférence internationale sur les données nucléaires pour la science et la technologie, organisée à Bruges (Belgique), en septembre 2016, avec le concours du Centre commun de recherche (CCR) de la Commission européenne, de l'OCDE/AEN et de l'AIEA, a réuni quelque 450 participants. Elle a été l'occasion de présenter les nouveautés en matière de technologie relative aux données nucléaires, comme les possibilités expérimentales offertes par l'Institut des matériaux et mesures de référence du CCR de Geel (Belgique), et des méthodes permettant de produire des données nucléaires de façon plus systématique à l'aide du code TALYS.

109. Des données nucléaires de meilleure qualité ont été mises au point concernant les réactions induites par des particules alpha sur le fluor, ce qui présente un intérêt pour les analyses effectuées dans le cadre des garanties.

110. À l'heure actuelle, la Chine se consacre plus activement à l'évaluation des données nucléaires concernant un réacteur à sels fondus (RSF). Ainsi, des expériences et des activités de modélisation coordonnées par le Centre chinois de données nucléaires (Beijing) visent à collecter des données utiles pour la sûreté et l'économie de ce RSF.

111. Dans le cadre de son projet CHANDA, qui vise à résoudre les difficultés liées aux données nucléaires, la Commission européenne investit dans la mise au point de données nucléaires à grande échelle, et des laboratoires, des universités et des organismes de recherche de tous les pays de l'Union européenne collaborent dans ce domaine. Les objectifs prioritaires sont la réduction maximale des déchets radioactifs et la mise au point de systèmes à neutrons rapides. La mise au point de nouvelles bibliothèques de données nucléaires devrait permettre d'améliorer l'analyse des systèmes de réacteurs avancés fondée sur des calculs.

C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

112. Les accélérateurs de particules ont été mis au point pour faire la lumière sur des questions fondamentales posées par les scientifiques qui étudiaient la structure et les propriétés internes du noyau atomique et les lois physiques régissant les interactions entre les rayonnements et la matière. De

nos jours, des dizaines de milliers d'accélérateurs sont exploités partout dans le monde dans les domaines de l'industrie, de la médecine, de l'environnement ou de la recherche fondamentale, notamment de la physique subatomique et de l'astrophysique, et contribuent à améliorer la vie quotidienne de millions de personnes. Afin de répondre à une demande toujours croissante d'accélérateurs dans la recherche scientifique de pointe et de maintenir, voire d'étendre, la vaste gamme de leurs applications, qui sont sources d'importants bienfaits socioéconomiques, il est essentiel de continuer à améliorer et à promouvoir la technologie des accélérateurs. Les innovations technologiques permettent de faire reculer les limites des accélérateurs sur le plan de l'énergie, du type et de la taille des faisceaux de particules qu'ils peuvent accélérer. Une autre difficulté consiste à réduire leur taille et leur coût pour pouvoir les exploiter à des fins industrielles et médicales.

C.1.1. Techniques pompe-sonde inédites destinées à étudier in situ les dommages d'irradiation

113. L'expérimentation et les simulations nous permettent de mieux comprendre les effets des rayonnements. Ainsi, il est encourageant d'observer l'essor rapide des techniques pompe-sonde, grâce auxquelles des impulsions brèves et intenses d'ions (produites par des accélérateurs à induction, tels que le NDCX-II du Laboratoire national Lawrence de Berkeley, ou par des accélérateurs laser-plasma) peuvent entraîner des modifications dans la dynamique structurale des matériaux, lesquelles peuvent être suivies in situ au moyen de sondes structurales rapides, comme la diffraction d'électrons ultra-rapide ou des impulsions intenses de rayons X. Ces nouvelles techniques permettent d'étudier in situ les effets des rayonnements d'ions. Elles nous aident à mieux comprendre des phénomènes fondamentaux et contribuent à accélérer la mise au point de nouveaux matériaux qui se comportent mieux et résistent davantage aux rayonnements dans des milieux à haute intensité de rayonnement.



*FIG. C-1. L'accélérateur NDCX-II¹² du Laboratoire national Lawrence de Berkeley (États-Unis d'Amérique) permet d'étudier la dynamique structurale des matériaux. Sur cette photo, on peut voir l'accélérateur de 10 mètres de long et, au premier plan, son poste final.
(Photo : Laboratoire de Berkeley)*

C.1.2. Nouveaux dosimètres biocompatibles faisant appel à des faisceaux d'ions focalisés

114. Les dosimètres fabriqués à partir de diamant de synthèse présentent des avantages par rapport aux appareils classiques en ce qu'ils se caractérisent par une résistance aux rayonnements et une biocompatibilité accrues, en particulier en protonthérapie. Les faisceaux d'ions focalisés, dont les protons couvrent un large spectre d'énergies cinétiques (entre 5 et 250 MeV), permettent de déterminer si des dosimètres fabriqués à partir de diamant constitué de monocristaux peuvent être suffisamment précis. Les faisceaux à haute énergie sont utilisés pour la pratique clinique et les faisceaux à basse énergie, émis par un système de balayage à microsonde nucléaire, permettent de mesurer la réponse précise du dosimètre de manière à évaluer de nouveaux modèles de détecteurs. Les

¹² Pour plus d'informations, voir P.A. Seidl, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 800 (2015), 98–103 (en anglais).

images produites à l'aide de la technique de la charge induite par faisceau d'ions (en l'occurrence par un microfaisceau de 5,5 MeV) permettent de mesurer la réponse précise du dosimètre en même temps que l'efficacité de collection de charges, qui peut s'approcher de 100 %.

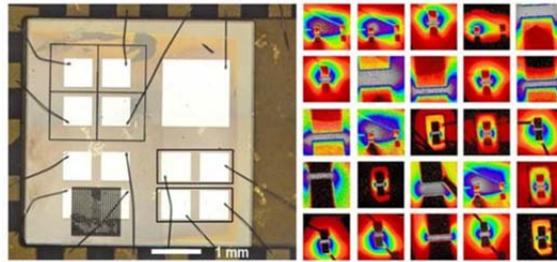


FIG. C-2. Les images ci-dessus montrent des prototypes de dosimètres fabriqués à partir de diamant de synthèse conçu à cette fin et des représentations des réponses aux rayonnements des différents modèles de dosimètres, mesurées à l'aide de la technique de la charge induite par faisceau d'ions (en l'occurrence par un rayonnement d'ions HE^+ de 5,5 MeV).

[Photos : Pr D. Jamieson (Université de Melbourne), Dr J. Davis (Université de Wollongong) et Dr D. Prokopovich (ANSTO)]

C.1.3. Diffusion neutronique à l'aide d'un accélérateur

115. Grâce à l'évolution que connaît la technologie des accélérateurs de protons depuis une dizaine d'années, la moyenne temporelle des flux de neutrons produits par des sources de spallation telles que la SNS (Spallation Neutron Source) (États-Unis d'Amérique) et la future ESS (source de spallation européenne) (Suède), dépasse celle des flux que peuvent émettre les plus puissants des réacteurs à faisceaux sortis. La brillance inégalée de ces sources, conjuguée à la capacité de pénétration du neutron et à la puissance de sa diffusion causée par l'hydrogène et les moments magnétiques, promet des progrès dans les domaines de l'énergie et des matériaux magnétiques, des sciences de la vie, de l'archéologie et de la géologie, et des matériaux industriels.

116. Pour de telles applications, les neutrons doivent être modérés, opération habituellement exécutée au sein de modérateurs cryogéniques volumineux, desquels seule une infime fraction de neutrons sortent pour être émis en direction d'installations expérimentales. Par conséquent, l'objectif actuel est de mettre au point des matériaux et d'élaborer des configurations adaptées à une nouvelle génération de modérateurs. En sélectionnant l'un des isomères du spin de l'hydrogène, le parahydrogène, il est possible de construire des modérateurs froids liquides en forme de barres ou de galettes. Ces configurations permettent de réduire l'absorption des neutrons et pour plus d'efficacité, des spectromètres peuvent être placés autour de la source. Le méthane solide est également un modérateur froid très efficace, mais il risque d'être endommagé par les rayonnements. En conséquence, on examine actuellement de nouveaux matériaux et de nouvelles configurations susceptibles de convenir à des modérateurs solides. Comme il est essentiel de connaître précisément les sections efficaces de capture neutronique des matériaux envisagés, les mesures nécessaires sont effectuées actuellement dans de nombreux accélérateurs de recherche, notamment en Afrique du Sud, en Argentine, aux États-Unis d'Amérique et au Japon. Pour remédier au problème des dommages d'irradiation, des prototypes sont également en cours de mise au point, par exemple en Fédération de Russie, avec lesquels des pastilles de ces nouveaux matériaux peuvent être envoyées dans la cuve pour en être retirées ultérieurement et régénérées.



FIG. C-3. Le site de l'ESS, la source de spallation européenne, à Lund (Suède), en octobre 2016. Alimentée par un accélérateur linéaire fonctionnant en mode pulsé capable de porter l'énergie des protons à 2 GeV et de produire un faisceau d'une puissance moyenne de 5 MW, la source de neutrons la plus puissante du monde doit être mise en service en 2019.

(Source : https://dam.ess.lu.se/asset-bank/images/assets/33/40_2S5D41851.jpg)

C.2. Réacteurs de recherche

117. Les applications les plus courantes des réacteurs de recherche sont présentées dans le tableau C-1. Leur puissance peut aller de zéro (assemblages critiques ou sous-critiques, p. ex.) à environ 200 MWth. Les réacteurs de recherche peuvent avoir des conceptions beaucoup plus variées que les réacteurs de puissance, et différents modes d'exploitation - le mode continu ou le mode pulsé.

118. Il ressort de la base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche qu'à ce jour, 774 réacteurs de recherche ont été construits dans 70 pays et qu'au 31 décembre 2016, 249 d'entre eux étaient en service dans 56 pays. C'est la Fédération de Russie qui abrite le plus grand nombre de réacteurs de recherche en service ou provisoirement à l'arrêt (55), suivie des États-Unis d'Amérique (42), de la Chine (17) et du Japon (14). Il y a aussi des réacteurs de recherche en service dans de nombreux pays en développement, notamment 10 en Afrique. Il y a dans le monde 64 réacteurs de recherche fonctionnant à des puissances supérieures à 5 MW et produisant donc des flux de neutrons élevés pouvant être exploités pour toutes sortes de produits et services.

Tableau C-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde¹³.

Type d'application ^a	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Formation théorique/pratique	165	51
Analyse par activation neutronique	118	51
Production de radio-isotopes	87	43
Neutronographie	69	37
Irradiation de matériaux/de combustible	68	27
Diffusion neutronique	45	30
Géochronologie	27	23
Transmutation (dopage de silicium)	24	16
Transmutation (pierres précieuses)	17	10
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	16	11
Autres ^c	120	36

^a La publication de l'Agence intitulée *Applications of Research Reactors* (n° NP-T-5.3 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA, Vienne, 2014) décrit ces applications de manière plus détaillée.

^b Sur les 249 réacteurs de recherche considérés (230 en service et 19 provisoirement à l'arrêt), au 31 décembre 2016.

^c Étalonnage et essais d'instruments, expériences de blindage, mesures de données nucléaires, visites destinées au public et séminaires.

119. De nombreux réacteurs de recherche en exploitation présentent encore un faible facteur d'utilisation, et la moitié d'entre eux sont en service depuis plus de 40 ans. Pour la majorité d'entre eux, il faut donc constamment veiller à la planification stratégique, à la gestion du vieillissement, à la modernisation et à la rénovation. On s'emploie de plus en plus activement à améliorer leur exploitation pour les rendre plus rentables. Au cours des trois dernières années, les organismes exploitants de 41 installations de réacteurs de recherche ont élaboré et présenté des plans stratégiques à l'Agence pour examen¹⁴.

120. La collaboration internationale se poursuit, le but étant de promouvoir et d'améliorer l'utilisation des réacteurs de recherche aux fins du renforcement des capacités nucléaires, notamment de la formation théorique et pratique. Le projet d'Internet Reactor Laboratory (IRL), mis en œuvre dans les régions Amérique latine et Caraïbes et Europe, en est un exemple : lancé en 2015, il vise à mettre en relation, par l'internet, des universités et des organismes de recherche dotés de réacteurs de recherche en service à des fins de formation théorique et pratique. La mise en œuvre de ce projet s'est poursuivie en 2016, où il y a eu six transmissions en direct dans la région Amérique latine et Caraïbes (l'installation hôte étant le réacteur argentin RA-6 de la CNEA et les organismes bénéficiaires se trouvant en Colombie, à Cuba et en Équateur) et cinq autres dans la région Europe et Afrique (l'installation hôte étant le réacteur français du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives en France et les organismes bénéficiaires se trouvant au Bélarus, en Lituanie, en République-Unie de Tanzanie et en Tunisie). Le projet de Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR) en est un autre exemple. Facilité par l'Agence, il

¹³ Données extraites de la base de l'Agence sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

¹⁴ L'Agence a révisé son document d'orientation de 2001, intitulé *Strategic planning for research reactors: Guidance for reactor managers* (IAEA-TECDOC-1212), pour y mentionner des projets de construction de réacteurs de recherche ou de gros travaux de rénovation, et y donner de nombreux exemples d'installations bien exploitées. Cette version révisée paraîtra en 2017 dans la collection Énergie nucléaire de l'AIEA sous le n° NG-T-3.16.

visé à promouvoir la coopération entre les États Membres par des activités de renforcement des capacités nucléaires et des travaux conjoints de R-D. Après le Commissariat français à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) en 2015, représenté par ses centres de recherche de Saclay et de Cadarache, c'est l'Institut russe de recherche sur les réacteurs nucléaires de Dimitrovgrad qui a reçu, en 2016, le titre de Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche, et le Centre d'étude belge de l'énergie nucléaire de Mol s'est porté candidat pour le prochain titre.



FIG. C-4. À gauche : expérience transmise en direct du réacteur de recherche hôte ISIS, du CEA-Saclay (France), à la Commission tanzanienne de l'énergie atomique, lors d'une réunion de coordination organisée dans le cadre du projet de coopération technique RAF/1/005 de l'Agence (Photo : AIEA). À droite : transmission réalisée en direct d'un laboratoire du réacteur hôte RA-6, de la CNEA, à Bariloche (Argentine). [Photo : Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA)]

121. Plusieurs pays construisent actuellement de nouveaux réacteurs de recherche, les installations nationales qui seront la clé du développement des programmes consacrés à la science et à la technologie nucléaires, y compris à l'électronucléaire, et de l'infrastructure connexe. Ces pays sont l'Argentine, l'Arabie saoudite, le Brésil, la Fédération de Russie, la France, l'Inde et la République de Corée. Plusieurs États Membres, dont le Bélarus, la Belgique, l'État plurinational de Bolivie, les États-Unis d'Amérique, les Pays-Bas et le Viet Nam, ont élaboré des plans officiels dans ce sens. D'autres encore, comme l'Afrique du Sud, l'Azerbaïdjan, le Bangladesh, l'Éthiopie, le Ghana, le Kenya, le Koweït, le Liban, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Nigeria, les Philippines, la République-Unie de Tanzanie, le Sénégal, le Soudan, le Tadjikistan, la Thaïlande et la Tunisie, envisagent de construire de telles installations¹⁵. En 2016, la mise en service du réacteur jordanien de recherche et de formation, un réacteur de recherche polyvalent d'une puissance de 5 MWth situé sur le campus de l'Université jordanienne des sciences et des technologies, a été couronnée de succès.

122. Les réseaux et les groupements régionaux de réacteurs de recherche, auxquels l'Agence apporte son concours¹⁶, aident à stimuler la coopération internationale et contribuent au développement des communautés de parties prenantes et d'utilisateurs des réacteurs de recherche. En 2016, deux organisations de réacteurs de recherche, l'Organisation australienne pour la science et la technologie

¹⁵ La publication de l'Agence intitulée *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (n° NPT-5.1 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA) et un ensemble de documents complémentaires visant à aider les États Membres dans ce domaine.

¹⁶ L'Agence soutient les groupements de réacteurs de recherche de la Baltique, des Caraïbes, d'Afrique centrale, d'Asie centrale, d'Europe orientale, de la Méditerranée et de la Communauté d'États indépendants, ainsi que le Réseau mondial de réacteurs de recherche TRIGA. Au sujet de ce dernier, elle a récemment fait paraître une publication intitulée *History, Development and Future of TRIGA Research Reactors* (n° 482 de la collection Rapports techniques, AIEA, Vienne, 2016).

nucléaires (ANSTO) et l'Institut néerlandais du réacteur de Delft, ont reçu le titre de centres collaborateurs de l'AIEA pour travailler respectivement sur des techniques multi-analytiques applicables aux recherches sur les matériaux, aux études sur l'environnement et aux applications industrielles, et sur des méthodes fondées sur l'activation neutronique et l'utilisation de faisceaux de neutrons applicables aux réacteurs de recherche.

123. Fin 2016, 97 réacteurs de recherche avaient été convertis à l'utilisation de combustible à l'UFE ou déclarés définitivement à l'arrêt, y compris une installation de production de molybdène 99 qui utilisait de l'UHE. L'année 2016 a été marquée par des réalisations importantes : la conversion au combustible à l'UFE du prototype chinois de réacteur source de neutrons miniature (RSNM), qui a divergé en mars, ainsi que du réacteur kazakh WWR-K, qui a divergé en avril, et le retrait de la totalité de l'UHE de l'unité japonaise d'assemblage critique rapide. En coopération avec la Chine, les États-Unis d'Amérique et d'autres parties prenantes, l'Agence a continué à prêter appui au Ghana en vue de la conversion et du retrait du cœur à l'UHE de son RSNM, prévus en 2017. Des activités ont été entreprises en vue de la conversion du RSNM du Nigeria.

124. Pour réduire le plus possible les quantités d'UHE, on peut rapatrier le combustible à l'UHE utilisé dans les réacteurs de recherche dans le pays où il a été enrichi. Ainsi, fin 2016, près de 1 300 kg de combustible à l'UHE neuf et usé de réacteurs de recherche avaient été retirés dans le cadre du programme de reprise du combustible à l'UHE provenant des États-Unis. Dans le cadre du programme de reprise du combustible à l'UHE d'origine russe, 2 228 kg de combustible neuf et usé de réacteurs de recherche avaient été retirés à la même période. En septembre 2016, la Pologne, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie et l'Agence ont rapatrié en Fédération de Russie les 61 kg de matières à l'UHE d'origine russe encore présents dans le réacteur de recherche Maria d'Otwock-Świerk (Pologne).

125. Des combustibles avancés à l'uranium et au molybdène sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et de haute performance. Bien que de grands progrès aient été faits dans ce domaine, il faudra approfondir les essais d'irradiation et les examens après irradiation et mener des travaux plus poussés sur les techniques de fabrication avant de pouvoir utiliser des combustibles à l'UFE de haute densité dans des réacteurs commerciaux.

126. Bien qu'il n'y ait pas eu de sérieuses pénuries de molybdène 99 en 2016, l'exploitation des installations de traitement continue de poser des difficultés. Les pannes survenues en 2016 dans certaines installations n'ont pas entraîné de pénuries. En Belgique, le réacteur de recherche BR2, un important irradiateur utilisé pour produire du molybdène 99, a redémarré le 19 juillet 2016, après neuf mois d'arrêt pendant lesquels il a fait l'objet d'une maintenance et d'une modernisation poussées. Au Canada, le réacteur NRU a cessé de produire du molybdène 99 le 31 octobre 2016, mais il est maintenu en « arrêt chaud » pour pouvoir servir de capacité de production de secours dans l'hypothèse improbable où une pénurie globale surviendrait entre le 1^{er} novembre 2016 et le 31 mars 2018. En effet, depuis, les autres grands producteurs ont augmenté leur production pour compenser cette perte.

127. La réorganisation des processus de production de molybdène 99 se poursuit pour permettre la conversion de l'UHE à l'UFE ; l'ANSTO (Australie) et la société NTP Radioisotopes (Afrique du Sud) sont les premiers fournisseurs de molybdène 99 à base d'UFE. Ainsi, la construction de la nouvelle installation de production de l'ANSTO ayant bien progressé en 2016, elle devrait s'achever début 2017. La société NTP Radioisotopes poursuit la réorganisation de ses processus en vue d'une utilisation exclusive d'UFE. Deux autres grands producteurs, l'Institut des radioéléments (Belgique) et Mallinckrodt (Pays-Bas), ont continué à réorganiser leurs processus de production d'échelle commerciale afin de permettre une conversion de l'UHE en UFE.

D. Alimentation et agriculture

D.1. Utilisation des techniques nucléaires et connexes pour déterminer l'authenticité des aliments

128. La qualité et la sécurité sanitaire des aliments sont des priorités tant pour le secteur alimentaire que pour les consommateurs. Les crises récurrentes qui frappent cette filière risquent de mettre en danger la santé publique et d'ébranler la confiance de la population dans l'intégrité de l'offre alimentaire. La mondialisation du commerce des produits alimentaires nécessite de mettre en place des systèmes plus efficaces de contrôle des aliments pour protéger les consommateurs contre les aliments contaminés ou frauduleux. Les délits en matière alimentaire – étiquetage intentionnellement trompeur ou adultération des denrées alimentaires à grande échelle et de manière organisée en vue d'un profit matériel – sont devenus très courants. Ils peuvent entraîner de lourdes pertes financières et discréditer des secteurs entiers de l'économie, ce qui peut nuire au commerce international. Bien que la fraude alimentaire soit motivée par l'appât du gain, elle fait aussi souvent peser un risque sur la sécurité sanitaire des aliments, des produits adultérés ou contrefaits n'ayant pas subi les mêmes contrôles qu'un produit authentique et leur composition n'étant pas toujours connue. À titre d'exemples, l'ajout de mélamine à du lait en poudre, destiné à gonfler artificiellement sa teneur en protéines, a entraîné des milliers d'intoxications alimentaires et la mort de plusieurs enfants, en raison de la toxicité de cet additif ; l'adultération d'huile d'olive extra-vierge de bonne qualité, par l'ajout d'huiles meilleur marché, telles que l'huile d'arachide, qui ne sont pas mentionnées sur l'étiquette, peut entraîner des réactions allergiques graves ; et même du riz a été contrefait, à partir d'amidon de pomme de terre et de résine synthétique industrielle.

D.1.1. Techniques d'analyse

129. Il est devenu rapidement nécessaire d'élaborer des méthodes d'analyse sur lesquelles faire reposer les mécanismes d'authentification et de traçabilité des aliments, et il le sera de plus en plus à mesure que les chaînes d'approvisionnement alimentaire gagneront en complexité et que l'industrie et la technologie alimentaires évolueront. À cet égard, les techniques nucléaires présentent des caractéristiques essentielles permettant de vérifier l'authenticité des aliments.

130. La technique consistant à mesurer la quantité d'isotopes stables naturels présents dans les bioéléments (hydrogène, carbone, azote, oxygène et soufre) des aliments permet souvent d'informer sur l'origine géographique ou la technique de production de ces aliments, par comparaison avec la quantité d'isotopes présents dans l'environnement ou le processus de production. Des isotopes stables d'éléments lourds (comme le strontium) peuvent aussi informer sur la géologie de la région d'origine des aliments, car cette « signature » se transmet des sols dans les plantes et les animaux. Les isotopes stables étant des caractéristiques intrinsèques des atomes présents dans les aliments, leur répartition et leur quantité sont difficiles à manipuler à des fins de fraude.

131. L'analyse élémentaire des aliments fournit d'importantes informations sur leur sécurité sanitaire, en révélant leur concentration en éléments susceptibles d'être toxiques, et peut également aider à retrouver leur lieu de production. La composition complexe des tissus animaux reflète, dans une certaine mesure, celle des végétaux dont ils se nourrissent. Par exemple, les métaux alcalins, en particulier le rubidium et le césium, étant facilement mobilisés dans le sol et transportés dans les plantes, sont de bons indicateurs d'identité géographique.

132. L'étude des empreintes métabolomiques, qui consiste à analyser les métabolites, produits des processus cellulaires ou moléculaires en œuvre dans un organisme, est aussi utilisée pour vérifier l'authenticité. La métabolomique peut être soit ciblée, lorsqu'elle vise des groupes de métabolites connexes pour fournir des informations fonctionnelles directes utiles à la modélisation, soit non ciblée,

lorsqu'elle décèle dans le métabolome des tendances qui permettent de différencier les différents ensembles d'échantillons et d'élaborer des modèles en vue du classement d'échantillons inconnus. L'analyse SGF (Spin-Generated Fingerprint), utilisée pour les jus de fruits et les vins, en est un exemple. Elle repose sur la spectroscopie, qui mesure la résonance magnétique des protons.

133. Ces techniques, associées à d'autres telles que la spectroscopie de vibration, l'analyse ADN et l'empreinte microbienne, se révèlent très précieuses pour authentifier les denrées alimentaires.

134. Pour que ces techniques soient efficaces, il faut étudier leur utilité pour différentes denrées alimentaires, mettre au point de vastes bases de données consignnant les résultats des mesures d'aliments authentiques, et procéder à des analyses et à une modélisation statistiques fiables.

Techniques accessibles d'analyse de l'authenticité

135. Grâce aux progrès récents de l'instrumentation, les techniques d'analyse requises deviennent plus faciles d'accès. Ainsi, des instruments qui n'étaient auparavant utilisés qu'en laboratoire commencent à se trouver dans différents formats (d'atelier, portables ou de poche) plus abordables, et il est possible de s'en servir pour procéder à des analyses. Par exemple, on trouve depuis peu des instruments de résonance magnétique nucléaire (RMN) relativement bon marché permettant d'exécuter des analyses qui nécessitaient auparavant des instruments de RMN à champ élevé, lesquels étaient onéreux et faisaient appel à une infrastructure et à du personnel spécialisés. De même, on trouve désormais dans le commerce des spectromètres de poche permettant de mesurer la fluorescence X et les rayonnements proches de l'infrarouge, qui sont utilisés pour l'analyse des aliments. Parmi les autres techniques (de format atelier ou portable) susceptibles d'être utilisées pour vérifier l'authenticité, on trouve : la spectrométrie à mobilité ionique, qui utilise le nickel 63 comme source d'ionisation et est employée depuis peu à grande échelle pour détecter les explosifs et les drogues dans les aéroports, et la mesure des rapports isotopiques par la spectrométrie isotopique et moléculaire avec ablation laser.

136. Grâce à leur efficacité et à leur accessibilité, ces techniques modernes pourraient permettre aux intervenants de la filière alimentaire, aux organismes de réglementation et aux consommateurs d'analyser les aliments en différents points de la chaîne alimentaire, ce qui améliorerait considérablement l'efficacité des systèmes de contrôle. Si nécessaire, les produits suspects pourraient être analysés, pour confirmation, à l'aide de techniques sophistiquées dans un laboratoire de référence, afin de fournir des informations plus détaillées aux fins de recherches plus poussées.

D.2. L'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques : une nouvelle méthode de surveillance de l'humidité des sols à l'échelle d'une zone

137. Environ deux tiers de la consommation mondiale d'eau douce peuvent être imputés à l'agriculture. Pour surmonter les obstacles que soulèvent le changement climatique et la croissance rapide de la population, les agriculteurs doivent s'employer, partout dans le monde, à maximiser leurs rendements tout en économisant davantage les ressources en eau à l'aide de l'irrigation. Pour ce faire, il leur faudra des moyens de surveiller les ressources en eau présentes dans les sols afin de rentabiliser davantage l'eau d'irrigation. Les méthodes classiques permettant de mesurer la teneur en eau des sols font notamment appels à des appareils placés sur le terrain, qui transmettent les données correspondant aux points précis auxquels ils se trouvent. Sans un réseau de capteurs, cette technique in situ ne permet pas de collecter de données sur la teneur en eau des sols – ni sur l'hétérogénéité naturelle de cette teneur – à l'échelle d'une zone. L'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques est un tout nouvel appareil, qui permet de recueillir et de mesurer à distance des données relatives à la teneur en eau des sols au sein d'une vaste zone circulaire d'un rayon d'environ 250 mètres et d'une superficie d'environ 20 hectares, sans les inconvénients de la technique classique fastidieuse consistant à installer un réseau d'appareils de mesure sur le terrain. Les populations qui bénéficient des informations sur l'humidité des sols fournies par ce dispositif sont mieux à même de gérer des ressources en eau qui se font de plus en plus rares.

138. L'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques détecte les particules nucléaires de haute énergie provenant de l'espace qui entrent dans l'atmosphère. Nombre de ces particules entrent en collision avec des gaz de l'atmosphère, ce qui leur fait perdre de l'énergie et, à l'issue d'une cascade de transformations, ils ne sont plus que des neutrons de faible énergie lorsqu'ils approchent de la surface du sol (fig. D-1). Ces neutrons sont rapidement absorbés par des atomes d'hydrogène. Autrement dit, c'est avant tout l'hydrogène présent dans l'environnement qui fait disparaître ces neutrons d'origine cosmique des sols et de l'atmosphère. Cela se vérifie pour toutes les formes d'hydrogène présentes dans un milieu donné, que leurs sources changent rapidement (humidité des sols) ou lentement (végétation, eaux de surface ou matières organiques des sols), ou qu'elles ne changent pas (eau contenue dans les minéraux argileux ou dans les structures humaines). L'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques détecte passivement ces neutrons lorsqu'ils traversent les sols et l'atmosphère, et détermine leur nombre par unité de temps. La majeure partie de l'hydrogène présent sous et à la surface de la Terre se présentant sous la forme d'eau, une relation peut être établie entre le nombre de neutrons et la quantité d'eau présente dans les sols, à quelque endroit que ce soit. Par un processus d'étalonnage, l'humidimètre élimine tout signal d'éléments autres que l'hydrogène constitutif de la teneur en eau des sols. Cet étalonnage nécessite de prélever des échantillons sur le terrain pour valider les données relevées.

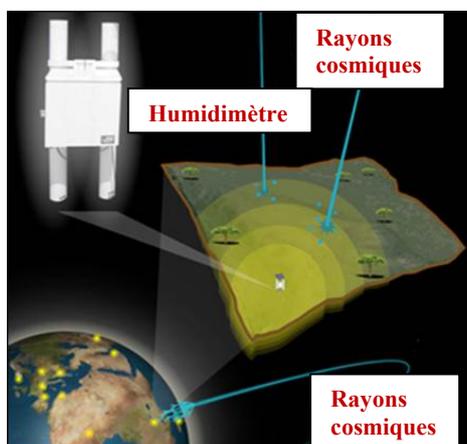


FIG. D-1. En pénétrant dans l'atmosphère, les rayons cosmiques génèrent des neutrons qui, une fois à la surface du sol, peuvent être mesurés par l'humidimètre dans l'ensemble de la zone. (Photo : AIEA)

139. L'utilisation de l'humidimètre à neutrons de rayons cosmiques, outil fixe de surveillance de la teneur en eau des sols installé dans des milieux agricoles, est bien établie dans les États Membres, partout dans le monde¹⁷. Bien que cette méthode soit très efficace pour recueillir des informations sur l'humidité des sols à l'échelle d'une zone¹⁸, des recherches poussées sont menées pour étudier comment l'humidimètre réagit lorsque cette teneur en eau est naturellement hétérogène dans l'environnement^{19,20}. Les travaux menés pour adapter l'humidimètre à l'étude de l'hétérogénéité spatiale de la teneur en eau des sols ont donné lieu à des recherches, qui ont à leur tour débouché sur la

¹⁷ Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., and Rosolem, R.: COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4079–4099, 2012 (en anglais).

¹⁸ Franz, T. E., Wahbi, A., Vreughenil, M., Weltin, G., Heng, L., Oismueller, M., Strauss, P., Dercon, G., and Desilets, D., Using cosmic-ray neutron sensors to monitor landscape scale soil water content in mixed land use agricultural systems, *Applied and Environmental Soil Science*, Article ID 4323742, 11 pages, 2016 (en anglais).

¹⁹ Desilets, D., Zreda, M., and Ferre, T. P. A.: Nature's Neutron Probe: Land Surface Hydrology at an Elusive Scale with Cosmic-Rays, *Water Resources Research*, 46, W11505, 7 pages, 2010 (en anglais).

²⁰ Avery, W. A., Finkenbiner, C., Franz, T. E., Wang, T., Nguy-Robertson, A. L., Suyker, A., Arkebauer, T., and Muñoz-Arriola, F.: Incorporation of globally available datasets into the roving cosmic-ray neutron probe method for estimating field-scale soil water content, *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 3859–3872, 2016 (en anglais).

mise au point d'humidimètres mobiles plus modernes et plus polyvalents. Un humidimètre mobile, qu'il se transporte comme un sac à dos ou s'arrime à un véhicule, se comporte exactement de la même façon qu'un humidimètre fixe couvrant la même zone. L'humidimètre mobile, en étudiant l'hétérogénéité spatiale de l'humidité des sols dans l'environnement (fig. D-2), permet aux scientifiques et aux agriculteurs de savoir où la terre est sèche et où elle ne l'est pas, ce qui est nécessaire pour une irrigation précise. Il faudra toutefois continuer d'étudier cette technique mobile pour permettre aux États Membres d'en tirer le meilleur parti. La Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture participe activement à ces études.

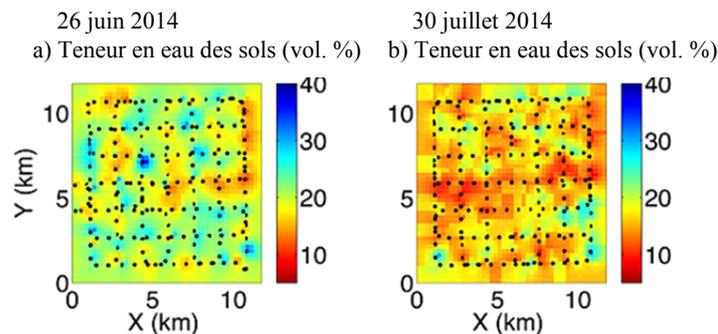


FIG. D-2. Exemple de données recueillies par un humidimètre à neutrons de rayons cosmiques mobile chargé de mesurer la variabilité spatiale de la teneur en eau des sols d'un domaine agricole. Les points noirs représentent les emplacements où les mesures ont été prises, à l'occasion de deux études réalisées à un mois d'intervalle. (Source : Franz et al., *Combined Analysis of Soil Moisture Measurements from Roving and Fixed Cosmic-Ray Neutron Probes for Multiscale Real-Time Monitoring*, *Geophysical Research Letters*, 42, 3389–3396, 2015)

D.3. La cartographie par hybrides d'irradiation contribue à la mise au point d'outils génétiques utiles pour les programmes de sélection du bétail

140. L'amélioration génétique des animaux d'élevage, qui vise à accroître la production de lait, de viande et de textile, repose habituellement sur la sélection et l'élevage de bêtes performantes. Grâce aux progrès récents de la génomique, il est désormais possible d'estimer la valeur des bêtes dès leur naissance à l'aide d'outils génomiques tels que les puces à ADN. La mise au point de ces puces à ADN passe par le séquençage de l'ADN de l'animal et sa cartographie génétique. Les cartes génétiques indiquent l'emplacement d'éléments caractéristiques sur les chromosomes d'un organisme. Ce sont des outils essentiels qui permettent d'identifier les gènes codant les maladies ou les caractéristiques de production et de reproduction.

141. Une carte génétique peut être établie soit à l'aide de techniques classiques, soit à l'aide de techniques radio-isotopiques. Les techniques classiques, comme la cartographie des liaisons génétiques, reposent sur les recombinaisons naturelles et nécessitent des animaux inscrits sur le registre d'élevage de génération en génération. Dans le cas du bétail, ces méthodes ne nécessitent pas d'investir beaucoup de temps ni d'argent (en raison de la durée des intervalles entre les générations), mais elles donnent lieu à des cartes de faible résolution. Les techniques radio-isotopiques permettent de remédier à ces insuffisances : en reproduisant les recombinaisons génétiques et en accélérant le processus de cartographie génétique, elles permettent de mettre au point plus rapidement des outils capables d'accroître la productivité animale.

D.3.1. Les techniques radio-isotopiques au service de la cartographie génétique des animaux d'élevage

142. Le cobalt 60 ou les rayons X peuvent être utilisés pour irradier le génome des animaux d'élevage afin de le casser de façon aléatoire en plusieurs fragments. La dose de rayonnement utilisée est normalement comprise entre 30 et 150 Gy. Les extrémités des chromosomes se réparent rapidement après l'irradiation. Les fragments chromosomiques sont réintroduits dans des cellules de rongeurs. Lorsque les cellules issues des animaux d'élevage fusionnent avec celles des rongeurs, les fragments de chromosomes se fixent, par translocation, dans les chromosomes des rongeurs. Entre 90 et 100 cellules hybrides rongeur-animal d'élevage sont ensuite analysées, le but étant d'y déceler la présence éventuelle de marqueurs génétiques. Pour une dose donnée de rayonnement, les marqueurs les plus isolés sur le chromosome sont plus susceptibles de se casser et de se fixer sur d'autres fragments de chromosomes qui pourraient être intégrés à d'autres cellules hybrides. La fréquence de telles cassures permet non seulement d'estimer la distance qui sépare les marqueurs, mais aussi de déterminer l'ordre dans lequel ils se présentent sur les chromosomes, ce qui permet d'établir des cartes denses du génome des animaux d'élevage. La résolution de ces cartes d'hybrides d'irradiation dépend normalement de la dose de rayonnement utilisée : ainsi, plus la dose est élevée, plus la résolution est fine. Les cartes d'hybrides d'irradiation sont donc très utiles, en particulier pour établir des cartes du génome des animaux d'élevage de haute résolution à des coûts relativement bas et à des intervalles plus courts que ne le permettent les techniques classiques.

D.3.2. Applications des cartes d'hybrides d'irradiation dans le domaine de la sélection animale

143. Les cartes d'hybrides d'irradiation de haute résolution ont facilité la mise au point de puces à ADN, qui sont couramment utilisées pour sélectionner des bovins laitiers en vue d'accroître leur productivité. Cette technique de sélection génétique a révolutionné le secteur de l'insémination artificielle, car elle contribue dans une large mesure à l'augmentation annuelle de la production laitière. La part de marché que représentent les jeunes taureaux issus de l'insémination artificielle sélectionnés à l'aide de cette technique a désormais dépassé les 50 % dans de nombreux pays industrialisés. D'autres pays en développement dont l'économie repose sur l'agriculture comptent bien exploiter cette nouvelle technique dans leurs systèmes de production laitière. De même, des cartes génétiques de haute résolution ont été établies pour d'autres espèces animales, comme les moutons, les buffles et les porcs. Plus récemment, des chercheurs de différents pays ont utilisé des panels d'hybrides d'irradiation mis au point par l'Agence pour établir — une première dans le monde — une ébauche de la séquence du génome de la chèvre²¹ et une carte de haute résolution de l'ensemble du génome de la chèvre²², autre animal d'élevage important pour les pays en développement. Cela a également contribué à la mise au point d'une puce à ADN qui pourrait être utilisée pour sélectionner des chèvres afin qu'elles donnent plus de viande.

D.3.3. Quelles conséquences pour la sécurité alimentaire et les objectifs de développement durable ?

144. Il n'existe pas encore de cartes d'hybrides d'irradiation ni d'outils génomiques pour un grand nombre d'espèces animales d'élevage importantes pour l'agriculture, comme le chameau, le zébu, l'alpaga, le lama, le yak, l'âne, le gayal et le lapin. Ces espèces animales, qui vivent dans les deux

²¹ Dong, Y., et al. (2013). Sequencing and automated whole-genome optical mapping of the genome of a domestic goat (*Capra hircus*). *Nature Biotechnology* 31, 135–141 (en anglais).

²² Du, X., et al. (2014). An update of the goat genome assembly using dense radiation hybrid maps allows detailed analysis of evolutionary rearrangements in Bovidae. *BMC Genomics* 15, 625 (en anglais).

principaux types d'environnement extrême (déserts très chauds ou régions froides de haute altitude), apportent des moyens de subsistance à un grand nombre d'agriculteurs isolés. Ainsi, le chameau joue un rôle important dans la vie quotidienne de plusieurs millions de bergers nomades d'Afrique et d'Asie. La demande de lait de chamelle, en particulier, augmente rapidement dans plusieurs pays.

145. L'élaboration et l'utilisation de cartes d'hybrides d'irradiation et d'outils génomiques permettront d'établir des programmes de sélection visant à améliorer la productivité de ces animaux d'élevage et à renforcer la sécurité alimentaire. Depuis quelques années, les États Membres sont de plus en plus nombreux à demander des panels d'hybrides d'irradiation pour cartographier le génome des espèces susmentionnées. Grâce aux laboratoires FAO/AIEA, l'Agence est le pôle où sont mis au point ces panels et d'autres ressources indispensables (p. ex. des matières biologiques de référence, des ressources de cartographie et des logiciels), qui sont ensuite distribués aux États Membres.



FIG. D-3. À gauche : irradiation de cellules de chameaux en vue de la construction de panels d'hybrides d'irradiation. À droite : A. Prélèvement de cellules hybrides vivantes dans une boîte de Pétri. B. Colonie de cellules hybrides d'irradiation destinées à la cartographie du génome. (Photos : AIEA)

E. Santé humaine

E.1. Progrès dans la prise en charge du cancer de la prostate : diagnostic et thérapie

E.1.1. Contexte

146. Le cancer de la prostate compte parmi les trois cancers les plus fréquents chez l'homme à travers le monde, et, avec les cancers du poumon, du foie, de l'estomac et de l'intestin, c'est l'un de ceux qui cause le plus de décès parmi cette population. Après une prostatectomie ou une radiothérapie externe, 54 % des patients risquent une récurrence biochimique, c'est-à-dire une augmentation du taux de PSA (antigène prostatique spécifique) sérique. On peut prédire avec une précision de l'ordre de 80 % les récurrences locales dans le lit prostatique à la suite d'une prostatectomie radicale. Le choix du type de thérapie ne repose pas uniquement sur les niveaux de PSA, mais aussi sur d'autres tests d'imagerie diagnostique, tels que les scintigraphies osseuses permettant de détecter d'éventuelles métastases, ou la tomodensitométrie (CT) et l'imagerie par résonance magnétique, qui font apparaître les récurrences locales.

147. S'ils sont suffisamment sensibles pour distinguer une récurrence locale d'une récurrence à distance, les outils de prédiction disponibles, comme les nomogrammes, soit ne fournissent pas d'informations sur le siège réel de la récurrence (ex. : nœud lymphoïde ou os, récurrence pelvienne ou extra-pelvienne),

soit n'indiquent pas le nombre réel de métastases. De plus, chez de nombreux patients atteints d'un cancer de la prostate, l'augmentation du taux de PSA peut être aussi bien le signe d'une récurrence locale que d'une récurrence systémique. Par conséquent, l'incertitude liée à l'utilisation des seuls nomogrammes ne permet pas de planifier des thérapies de sauvetage ciblées. Les patients sont donc généralement orientés vers une radiothérapie de sauvetage au niveau du lit prostatique (lorsqu'on pense qu'il s'agit d'une récurrence locale) ou vers un traitement systémique avec hormonothérapie (ex. : blocage androgénique), quand on craint une récurrence systémique.

E.1.2. Diagnostic

148. Les valeurs données par les techniques d'imagerie conventionnelles, telles que la CT, la scintigraphie osseuse ou la résonance magnétique, employées pour la restadification des tumeurs de patients en récurrence biochimique, sont imprécises. La sensibilité de la tomographie à émission de positons (TEP)-CT à la choline est loin d'être optimale quand elle est pratiquée sur des patients en récurrence biochimique précoce, c'est-à-dire ceux chez qui on relève de faibles taux de PSA sérique après une thérapie radicale. Au cours des dix dernières années, des techniques de médecine nucléaire, telles que la TEP à la 11C-choline et à la 18F-choline, se sont révélées plus précises que l'imagerie diagnostique conventionnelle pour la restadification des tumeurs en cas de récurrence biochimique, car elles permettent de distinguer une récurrence locale, encore confinée au pelvis, d'une récurrence systémique.

149. Le meilleur moment pour administrer des traitements de sauvetage, et obtenir des résultats optimaux d'un point de vue pronostique, est quand la maladie est encore peu développée, plutôt que lorsque les niveaux de PSA sérique atteignent à peine des valeurs détectables après une thérapie radicale. Dans ce contexte, il peut s'avérer crucial de disposer d'un test de diagnostic permettant potentiellement de différencier une rechute initiale, ou une récurrence loco-régionale, qu'il est possible de soigner, d'une récurrence systémique, qu'on ne pourra traiter qu'avec des moyens palliatifs.

E.1.3. Évolutions et tendances récentes

150. Une nouvelle molécule ciblant l'antigène membranaire prostatique spécifique (PSMA) a récemment été mise au point. Le PSMA est une enzyme membranaire qui est principalement présente dans les cellules cancéreuses de la prostate, plus rarement dans les tissus d'une prostate saine. Lors d'études préliminaires sur le diagnostic des récurrences précoces de la maladie, le 68Ga-PSMA, inhibiteur extracellulaire du PSMA récemment mis au point et que l'on a utilisé comme radiopharmaceutique pour l'imagerie TEP-CT au lieu de la 18F-choline, a permis d'obtenir des résultats bien plus précis que cette dernière. Ces études ont également fait ressortir que le rapport tumeur-fond de la TEP-CT au 68Ga-PSMA était meilleur que celui de la TEP-CT à la 18F-choline pour la détection de lésions suspectes, potentiellement annonciatrices de rechute.

151. D'autres études réalisées sur un panel plus important de patients en récurrence biochimique après une thérapie radicale ont démontré l'excellente efficacité de la TEP-CT au 68Ga-PSMA pour le diagnostic de ces récurrences chez les patients soumis à un bilan d'extension complet, même quand leurs taux de PSA sérique étaient très faibles. Ces derniers mois, l'utilisation de ce traceur a suscité un intérêt particulier grandissant au sein de la communauté scientifique. Des études recourant à l'analyse histologique comme norme de référence pour la validation des résultats de la TEP (fig. E-1) ont par ailleurs fait ressortir une spécificité élevée (> 90 %) pour ce radiopharmaceutique. Enfin, aucune de celles publiées jusqu'ici ne fait état d'événements indésirables ou d'effets pharmacologiques détectables par des moyens cliniques qui seraient imputables à ce dernier.

152. Pour les raisons énoncées précédemment, le PSMA pourrait être une excellente cible moléculaire pour la mise au point de radiotraceurs destinés à l'imagerie TEP-CT, car il permet de détecter les rechutes à un stade précoce.

153. Au vu de l'efficacité clinique du ^{68}Ga -PSMA pour le diagnostic, un traitement a également été mis au point avec cette même molécule, qui avait été marquée cette fois avec un isotope de haute énergie, comme le lutécium 177 ou l'yttrium 90. Les essais cliniques ont donné de très bons résultats jusqu'ici, mais il est nécessaire d'en réaliser d'autres pour valider ce nouveau traitement. Quand une même molécule est utilisée pour le diagnostic et le traitement, ce qui est le cas du PSMA dans le cadre de la prise en charge du cancer de la prostate, on parle de « théragnostique ».

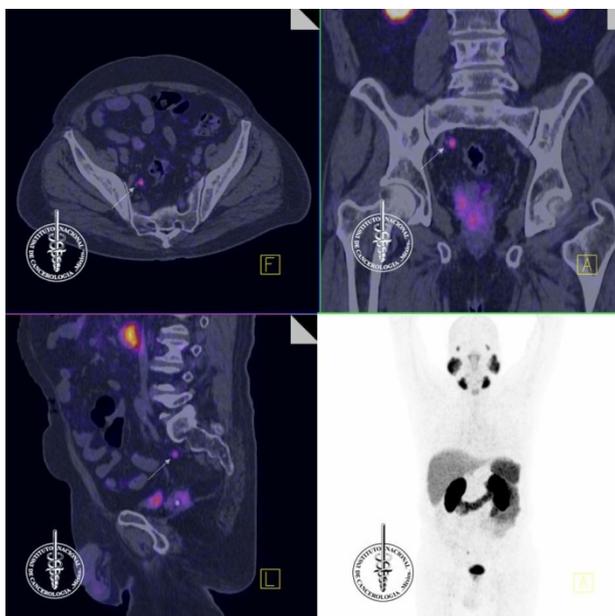


FIG. E-1. Patient ayant eu un cancer de la prostate traité par chirurgie et par chimiothérapie. L'examen de médecine nucléaire par TEP-CT au ^{68}Ga -PSMA avait pour objet d'en évaluer le suivi post-thérapeutique. La flèche indique une absorption anormale du traceur dans un nœud lymphoïde, signe d'une récurrence de la maladie. (Photos : Institut national de cancérologie du Mexique)

F. Ressources en eau

F.1. Nouvelles avancées dans l'étude de la météo et du climat au moyen des isotopes contenus dans les précipitations

154. Les précipitations sont la principale source de l'eau des fleuves, lacs et aquifères. Leurs processus de formation peuvent être classés en deux grandes catégories : convectifs et stratiformes. Les précipitations convectives, comme lors d'orages, sont très intenses (il tombe beaucoup de pluie en peu de temps), mais elles ne couvrent qu'une zone limitée (environ 10 à 25 km²), tandis que les précipitations stratiformes sont d'une intensité moindre mais s'étendent sur une durée beaucoup plus longue et sur une zone bien plus vaste (> 500 km²). Avec le réchauffement climatique, les précipitations convectives, qui sont à l'origine d'inondations et d'autres catastrophes naturelles, sont amenées à être plus fréquentes.

155. En raison de leurs masses atomiques distinctes, l'oxygène et l'hydrogène ont des rapports isotopiques qui évoluent différemment dans les nuages convectifs et dans les nuages stratiformes. En déterminant la part des précipitations de type convectif et de type stratiforme d'après la variabilité des rapports isotopiques, il est possible de mieux comprendre les processus de nébulosité et leur évolution au fil des saisons. On parvient ainsi à mieux les modéliser pour les simulations météorologiques à court terme et la prévision des effets des changements climatiques sur le long terme.

156. La possibilité de s'appuyer sur cette variabilité des rapports isotopiques pour comprendre les effets du climat sur le cycle hydrologique de la Terre a été admise au début des années 1950. Elle est l'une des principales considérations à l'origine de la création, par l'Agence, du Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations (GNIP), en coopération avec l'Organisation météorologique mondiale (OMM), en 1960. Grâce aux données isotopiques fournies par le GNIP, on a découvert que l'étude des glaces polaires et continentales (en Antarctique, en Arctique, au Groenland, dans les Andes et dans l'Himalaya) permettait de retracer l'historique des évolutions du cycle hydrologique dues aux refroidissements ou aux réchauffements climatiques.

157. On sait que les données isotopiques provenant du GNIP et d'autres observations indiquent des différences entre les précipitations dues aux divers types de nuages, par exemple entre ceux qui provoquent de courtes averses et ceux qui engendrent des pluies durables mais moins intenses. Il a cependant été estimé que ces différences isotopiques n'étaient pas suffisantes pour permettre une meilleure compréhension des processus de nébulosité. Des travaux menés récemment à l'Agence²³ ont cependant montré qu'il existait une étroite corrélation entre les rapports isotopiques et les processus de nébulosité qui sont à l'origine des précipitations. Cette découverte devrait largement revaloriser l'importance des données du GNIP dans le cadre de l'étude des processus de court terme liés à la météo et des processus de long terme liés au climat.

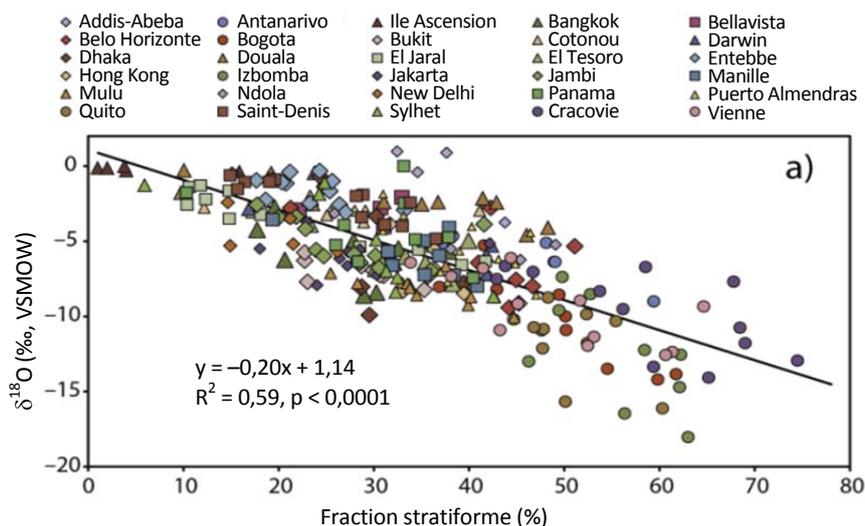


FIG. F-1. Rapport entre la teneur moyenne en oxygène 18 mesurée sur le long terme dans des échantillons mensuels de pluies composites et la fraction de précipitations stratiformes mesurée par certaines stations tropicales et de latitude moyenne du réseau GNIP. La fraction de pluie restante est de type convectif. (Source : Aggarwal, P. et al., Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geoscience*, Vol. 9)

158. Les données transmises par le radar embarqué dans le satellite de la Mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM), lancé conjointement en 1998 par les agences spatiales du Japon et des États-Unis, ont permis d'estimer les proportions des types de pluies entre 1998 et 2014. Quand ces proportions sont mises en relation avec les données isotopiques du GNIP pour la même période, on constate une étroite corrélation entre les deux paramètres (fig. F-1). Les pluies convectives affichent des rapports isotopiques supérieurs et les pluies stratiformes des rapports inférieurs. Dans la plupart des pluies recueillies sur une échelle quotidienne ou mensuelle, ces deux types sont associés.

²³ Aggarwal, Pradeep K., Ulrike Romatschke, Luis Araguas-Araguas, Dagnachew Belachew, Frederick J. Longstaffe, Peter Berg, Courtney Schumacher & Aaron Funk, « Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios », *Nature Geoscience*, Vol. 9, pp 624-629.

159. Jusqu'ici, on pensait que la teneur en tritium des précipitations était le signe d'un mélange d'humidité continentale et d'humidité océanique. Néanmoins, l'étude récente dont il est question plus haut montre que la teneur en tritium varie également en fonction des proportions des différents types de pluies. Il a été constaté que les pluies convectives avaient une teneur supérieure en tritium quand les nuages étaient très épais (jusqu'à plus de 6 km d'altitude environ) et que certaines particules de glace grossissaient en raison de l'humidité à des altitudes supérieures à 5 km, c'est-à-dire à une altitude où les teneurs en tritium sont naturellement élevées. En effet, le tritium est produit dans la stratosphère et il pénètre dans la troposphère (où se forment les nuages et les précipitations) par échange d'humidité.

160. Des mesures périodiques des isotopes stables et du tritium dans les précipitations qui surviennent quotidiennement ou plusieurs fois par jour devraient permettre de mieux comprendre la variabilité à court terme de la dynamique des nuages, qui est à l'origine des fluctuations des fractions de pluie. Les données isotopiques peuvent servir d'outil d'analyse indépendant pour observer la variabilité des types de précipitations et les effets des changements climatiques sur ces derniers.

161. Les progrès technologiques basés sur la partition des précipitations d'après les variations isotopiques contribueront à améliorer les modèles climatiques (ou modèles de circulation générale) et la simulation des précipitations convectives. Grâce à des informations précises et améliorées dans ce domaine, les États Membres devraient être mieux à même de prévoir et d'atténuer les effets du changement climatique.

G. Environnement

G.1. Utilisation d'outils isotopiques pour l'étude de l'acidification des océans

162. Les océans couvrent plus de 70 % de la surface de la Terre et jouent un rôle essentiel dans les évolutions climatiques. Gérés d'une manière écologiquement rationnelle, ils peuvent également être une importante source d'emplois et d'alimentation pour la population mondiale. Ils produisent plus de la moitié de l'oxygène que nous respirons tout en absorbant une grande part de la chaleur excédentaire et des principaux gaz à effet de serre que nous produisons, comme le dioxyde de carbone (CO_2). Cependant, on sait aujourd'hui que des changements fondamentaux s'opèrent à travers le monde dans la composition chimique de leurs eaux.

G.1.1. Acidification des océans : l'autre problème posé par le CO_2

163. Depuis le début de la révolution industrielle, les rejets de CO_2 augmentent régulièrement et la concentration de ce gaz dans l'atmosphère dépasse aujourd'hui 400 ppm (0,04 %). Les océans peuvent actuellement absorber à peu près un quart du CO_2 rejeté dans l'atmosphère chaque année. Comme dans l'atmosphère, les niveaux de CO_2 y sont en constante augmentation (fig. G-1). Si initialement les scientifiques voyaient surtout des avantages dans l'élimination du CO_2 par les océans, après des années d'observation, il apparaît clairement aujourd'hui que ce phénomène a un inconvénient majeur : le CO_2 absorbé par les eaux océaniques en modifie la composition chimique au cours d'un processus appelé acidification des océans.

164. Ce processus donne lieu à un rejet d'ions d'hydrogène (H^+) libres qui engendre une diminution du pH de l'eau de mer et une réduction des concentrations d'ions carbonate (CO_3^{2-}) du fait de l'association de certains ions d' H^+ à du carbonate, ce qui aboutit à la formation de bicarbonate (HCO_3^-). D'après des reconstitutions du pH de l'eau de mer au cours des temps géologiques, celui-ci

semble être resté relativement stable pendant des millions d'années, mais a systématiquement diminué dans le monde entier ces derniers 150 ans, depuis le début de la révolution industrielle. Bien que sa baisse constatée aujourd'hui puisse sembler relativement faible (0,1 unité, soit une augmentation de l'acidité d'environ 26 %), les meilleures projections scientifiques disponibles actuellement²⁴ indiquent que si les émissions continuent à ce rythme, le pH de l'eau de mer en surface pourrait encore diminuer de 0,4 unité au cours du siècle (ce qui équivaldrait à une augmentation de l'acidité d'environ 150 %).

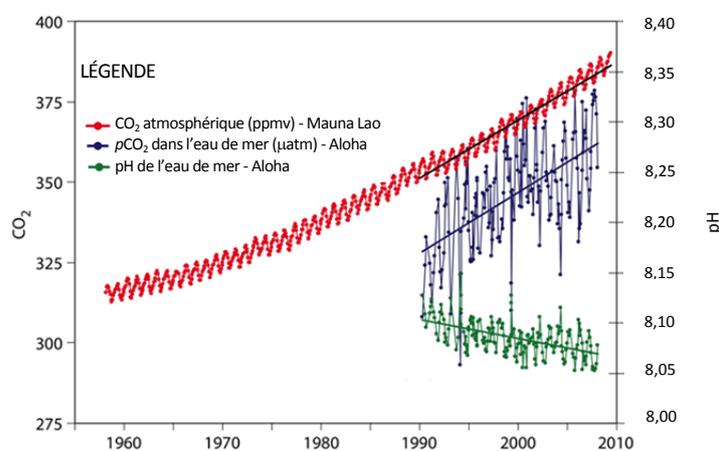


FIG. G-1. Augmentation du $p\text{CO}_2$ dans l'atmosphère et diminution du pH des eaux océaniques de surface, d'après les mesures effectuées par l'observatoire de Mauna Loa (Hawaii) et par la station ALOHA du programme Hawaii Ocean Time-series. [Source : Feely R.A., Doney S.C. and Cooley S.R., 2009. *Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high- CO_2 world*. *Oceanography* 22(4), 36–47]

G.1.2. Effets biologiques de l'acidification des océans

165. Si l'acidification des océans a un effet sur la composition chimique de l'eau de mer dans le monde entier, des processus biologiques essentiels sont aussi affectés, parfois gravement. Des organismes marins très divers (ex. : de nombreux mollusques, crustacés, coraux, algues coralliennes et foraminifères) utilisent des ions carbonate pour sécréter leur squelette ou coquille de carbonate de calcium. Il convient de noter que les ions carbonate sont également un élément fondamental des plaques de calcite du coccolithophore, plancton microscopique qui constitue la base de la chaîne alimentaire du monde marin. Qui plus est, les niveaux de CO_2 dissous peuvent influencer sur la physiologie des organismes marins, qui est souvent déterminée par des paramètres environnementaux bien précis, dont les taux de CO_2 dissous et de pH.

166. Les organismes marins peuvent être affectés de nombreuses manières par une acidification durable des océans. Pour les poissons, l'augmentation du CO_2 dans l'eau de mer peut avoir des conséquences très diverses, notamment en modifiant les comportements, la formation de l'otolithe (os situé dans leur oreille), la croissance des jeunes et les rapports entre proies et prédateurs. Chez les bivalves, dont les coquilles sont constituées de carbonate de calcium, tels que les huîtres, les palourdes et les pétoncles, l'acidification des océans peut avoir des effets préjudiciables sur leur croissance, leur physiologie et leur survie. Pour le plancton, qui est une source d'alimentation et de calcite pour d'autres organismes marins, elle peut avoir des conséquences sur sa croissance, sa physiologie et sa survie, ce qui pourrait se répercuter sur tout le réseau alimentaire. Par exemple, les ptéropodes ont des coquilles déjà très fines qui se dissoudraient rapidement dans l'eau de mer si son pH atteignait un taux de 7,8, ce qui devrait arriver d'ici 2100 selon les prévisions actuelles. Du fait de l'acidification

²⁴ Hoegh-Guldberg, O., et al. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science* 14 déc. 2007:Vol. 318, Numéro 5857, pp. 1737-1742 DOI:10.1126/science.1152509

croissante des océans, les coraux auront de plus en plus de difficultés à sécréter et conserver leurs squelettes de carbonate de calcium, et les liens qu'ils entretiennent avec leurs dinoflagellés symbiotiques risquent également d'être compromis, ce qui provoquera leur blanchiment. Selon des observations très nombreuses, l'augmentation du CO₂ est un facteur de blanchiment prononcé chez les coraux (fig. G-2).



FIG. G-2. Blanchiment massif de coraux aux Îles Marshall. (Photo : AIEA)

G.1.3. Mieux comprendre les effets de l'acidification des océans avec les techniques nucléaires

167. Plusieurs radio-isotopes sont parfaitement indiqués pour la quantification des effets biologiques de l'acidification des océans. C'est notamment le cas du calcium 45 pour l'étude des taux de calcification, du carbone 14 pour l'évaluation de la production primaire de phytoplancton marin, du strontium 85 pour l'analyse des taux de biominéralisation, du zinc 65 pour l'étude des taux métaboliques des organismes marins, et de tout un ensemble d'oligoéléments radiomarqués (ex. : argent 110n, cadmium 109, cobalt 57, cobalt 60, manganèse 54, sélénium 75) pour l'étude des variations des taux de bioaccumulation et de dépuración en fonction du pH. La composition isotopique en bore 10 et en bore 11 de coraux anciens peut permettre d'une part de reconstituer le pH de l'eau de mer et de mieux comprendre les conditions environnementales qui régnaient dans le passé, et d'autre part de remettre en contexte les variations supposées du pH des océans dans l'avenir.

168. La recherche scientifique sur l'acidification des océans²⁵ a considérablement progressé ces dernières années. Il est aujourd'hui possible de réaliser des expériences plus poussées avec plusieurs traceurs radioactifs afin d'évaluer les effets sur les organismes marins des diminutions du pH des océans que font ressortir les projections. Dans les Laboratoires de l'environnement de l'Agence, des expériences menées en milieu contrôlé sur les effets de l'acidification des océans sur certains coraux, crustacés et poissons ont démontré qu'une exposition prolongée à un pH environnemental réduit entraînait des modifications prononcées du métabolisme et de la physiologie de ces organismes. Les progrès enregistrés dans l'application des radio-isotopes, notamment les études menées avec des associations d'isotopes (ex. : ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs), apportent un nouvel éclairage sur les vastes conséquences qu'aura l'acidification des océans sur les environnements océaniques quand s'y ajoutent d'autres facteurs de stress cumulés (par ex., température et/ou oxygène dissous).

²⁵ Le Centre international de coordination sur l'acidification des océans est une plaque tournante de l'information dans ce domaine : <https://www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2181>

H. Technologies des rayonnements

H.1. Patrimoine culturel : l'étudier et le préserver à l'aide des technologies des rayonnements

169. Les objets du patrimoine culturel, qui sont souvent très prisés et d'une valeur inestimable, doivent être manipulés avec précaution et préservés avec des moyens perfectionnés. On recourt aux techniques d'irradiation pour les examiner en détail, les consolider et limiter leur détérioration ou leur dégradation. Quand ils sont infestés, on peut aussi les débarrasser de leurs parasites et ainsi mieux les préserver. Les techniques d'irradiation sont de plus en plus pointues, et les institutions responsables de la gestion du patrimoine culturel y font de plus en plus volontiers appel.

H.1.1. Étude et examen

170. Les techniques d'irradiation peuvent servir à établir l'authenticité d'une peinture ou à y découvrir l'existence d'une sous-couche, à déterminer si un objet est en or ou seulement en plaqué or, ou à évaluer la fragilité d'une statue ancienne avant son transport – le tout sans rien endommager. L'analyse par fluorescence X peut entrer en jeu dans l'analyse élémentaire des matériaux, et les musées y font souvent appel pour l'étude de diverses pièces (fig. H-1).

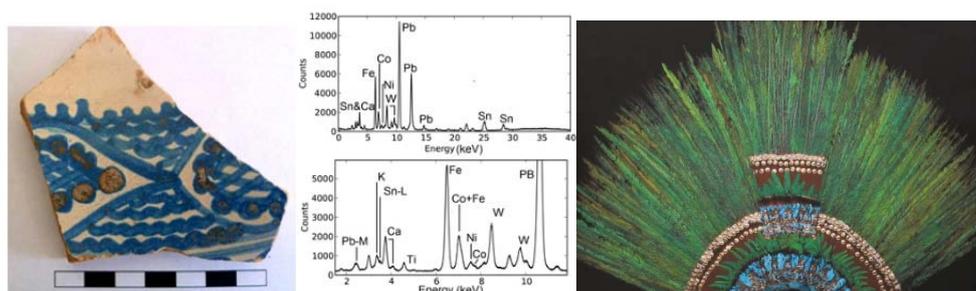


FIG. H-1. Analyse élémentaire d'un morceau de poterie du septième siècle (à gauche) et rare coiffe mexicaine du seizième siècle dont l'analyse à l'aide d'un appareil manuel à fluorescence X a permis de distinguer les ornements en or originaux des éléments ajoutés ultérieurement (à droite).

(Photos : AIEA)

171. À l'instar des radiographies médicales qui révèlent les parties internes du corps humain, les techniques radiographiques permettent de faire apparaître la structure interne des statues afin d'en déceler les éventuelles faiblesses. Plusieurs d'entre elles (ex. : radiographie conventionnelle par rayons X, radiographie gamma, radiographie basée sur des accélérateurs, radioscopie, radiographie bêta ou par électrons secondaires, radiographie d'émission d'électrons, neutronographie, autoradiographie et tomographie) facilitent l'examen et l'étude des œuvres d'art (fig. H-2, H-3 et H-4).



FIG. H-2. Les musées font couramment appel à diverses techniques basées sur les rayons X (émission de rayons X induite par particules) et des accélérateurs pour étudier des objets d'art comme cette pièce du Museo Civico d'Arte Antica de Turin (Italie). (Photo : INFN, Italie)



FIG. H-3. D'après cette radiographie, la tête et le tronc de cette statue de Jupiter, qui se trouve à Vieil-Évreux (France), ont probablement été ressoudés. (Photos : J. L. Boutaine)



FIG. H-4. Radiographie gamma révélant la structure interne de la Vénus de Milo au Musée du Louvre (France), qui a facilité la prise de décisions quant à son mode de transport. (Photos : AIEA)

H.1.2. Les techniques basées sur les rayonnements au service de la préservation et de la consolidation des objets historiques

172. Quand ils sont infectés, les objets du patrimoine culturel risquent de se détériorer plus vite et peuvent nuire à la santé des personnes qui les manipulent. Les techniques de désinfection traditionnelles utilisées en médecine et en agriculture pour traiter des objets en grand nombre, telles que la fumigation, font appel à des produits chimiques toxiques comme le formol, l'éthanol ou l'oxyde d'éthylène ou nécessitent des conditions extrêmes (ex. : température ou pression élevées) que de nombreux objets du patrimoine culturel ne pourraient pas supporter. Dans les années 1950, des expériences (irradiation gamma d'insectes xylophages) ont démontré pour la première fois l'effet biocide des rayonnements ionisants. À mesure que la technologie du radiotraitement arrivait à maturité dans l'industrie, son utilisation pour la désinfection d'objets du patrimoine culturel s'est répandue. Le traitement par irradiation, déjà largement utilisé pour la stérilisation de produits médicaux, d'aliments et de greffons, permet de traiter ces objets sans nécessiter d'additifs et à température ambiante. Non seulement les rayonnements évitent le recours à des produits chimiques toxiques, mais en plus ils pénètrent de façon homogène et en profondeur dans l'objet, quelles qu'en soient la taille et la forme, et ils ne laissent aucune substance résiduelle nocive à l'issue du traitement. Pour la préservation du patrimoine culturel, ils constituent donc une solution intéressante, sans danger pour le personnel et l'environnement. La décontamination par irradiation est réalisée en toute sûreté par des personnes autorisées, dans des installations approuvées.

Désinfection de la momie de Ramsès II

173. À l'occasion de l'expédition en France en 1976 de la momie de Ramsès II, exposée préalablement au Musée égyptien du Caire, il a été constaté qu'elle était infestée de larves, d'insectes et de nombreux champignons différents, bien qu'elle n'ait renfermé aucune bactérie pathogène. En 1977, le Muséum national d'histoire naturelle français, a entrepris, en accord avec les autorités égyptiennes, de la désinfecter à l'aide de rayons gamma à l'Atelier régional de conservation Nucléaire. Ce traitement par irradiation a été réalisé par un réseau de laboratoires et de musées de Paris et de Grenoble, après une planification et des essais rigoureux. Aux fins de la détermination de la dose de rayonnements nécessaire pour éliminer efficacement tous les champignons (plus de soixante espèces différentes) sans affecter le reste de la momie (cheveux, vêtements, peau et dents), des tests ont été effectués sur plus de 400 échantillons prélevés sur d'autres momies. En raison de la grande taille de la

momie (1,72 m), de sa silhouette irrégulière et des diverses matières qu'elle contenait, des calculs dosimétriques complexes basés sur des modèles mathématiques précis ont été nécessaires pour définir et administrer une dose uniforme de 18 kGy. Après validation sur deux maquettes de momies, la momie de Ramsès II a pu être irradiée, puis renvoyée en Égypte où elle est toujours en bon état, quarante ans plus tard.

Le projet RADIART au Portugal

174. Les carreaux de faïence portugais du XVIII^e siècle du Musée national de l'azulejo à Lisbonne ont été traités à l'aide de doses de rayonnements d'environ 4 kGy, visant à neutraliser à la fois les bactéries en surface et les champignons situés à l'intérieur, qui entraînaient l'apparition de taches vertes. L'efficacité antimicrobienne du processus d'irradiation a été supérieure à 70 %.

Centre de recherche Casaccia en Italie

175. Les études sur les effets des rayons gamma sur les matériaux qui ont été menées au Centre de recherche Casaccia de l'Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable ont montré que les rayonnements ionisants étaient d'une extrême efficacité pour l'élimination des insectes destructeurs (à des doses de 0,2 à 0,5 kGy) et des micro-champignons (à des doses entre 3 et 8 kGy). Elles ont montré que même à une dose de rayonnement de 10 kGy, la solidité des couleurs des impressions photographiques sur cellulose pure ou sur papier était préservée, que le procédé utilise de l'albumen, du gélatino-bromure, du collodion ou de l'aniline, ce qui illustre l'efficacité de la technologie des rayonnements pour le traitement des photographies anciennes attaquées par des microbes.

Un coffret mémorial au Brésil

176. Un coffret de bois et de plomb contenant des documents comptant parmi les plus anciens de l'Empire du Brésil (XIX^e siècle) a été découvert dans une pierre angulaire à Rio de Janeiro. Il a été traité à l'aide d'une dose de rayonnement de 8 à 10 kGy à l'installation polyvalente d'irradiation gamma de l'IPEN-CNEN, l'Institut de recherches énergétiques et nucléaires du Brésil, avant d'être restauré (fig. H-5).



*FIG. H-5. Traitement antifongique du coffret mémorial.
[Photos : P. Vasquez, Institut de recherches énergétiques et nucléaires IPEN/CNEN,
São Paulo, (Brésil)]*

Khroma : préserver un jeune mammouth gelé

177. En Sibérie (Fédération de Russie), un spécimen gelé de jeune mammouth a été découvert en 2008. Baptisé Khroma du nom de la rivière sur les rives de laquelle il a été trouvé, ce jeune mammouth, dont l'âge est estimé à plus de 50 000 ans, est peut-être le plus ancien spécimen connu de son espèce. Malgré son bon état de conservation, il fallait neutraliser toute trace de bactéries ou d'autres organismes potentiellement pathogènes dont il pouvait être porteur. L'irradiation gamma est apparue comme la technique la plus indiquée pour le soumettre tout entier à un traitement biocide non

destructif. En juillet 2010, le jeune mammouth gelé a été exposé à une dose de 20 kGy à Grenoble (France). Maintenant qu'il est correctement préservé, il est exposé au public. (fig. H-6).



*FIG. H-6. Conservation de « Khroma », le jeune mammouth irradié en juillet 2010.
(Photo : Dr Quoc Khoi TRAN, ARC-Nucléart, CEA-Grenoble)*



60 ans

IAEA *L'atome pour la paix et le développement*

www.iaea.org

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