

# RAPPORT D'ENSEMBLE SUR LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE

2019



**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique



Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire  
2019

GC(63)/INF/2

Imprimé par l'AIEA en Autriche  
Août 2019

IAEA/NTR/2019

# 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 2019 rend compte des faits notables survenus en 2018 dans le monde en ce qui concerne les applications énergétiques, les données atomiques et nucléaires, les applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, les techniques nucléaires dans les domaines de l'alimentation et de la gestion des sols et du bétail, le diagnostic du cancer et la cancérothérapie, les faits nouveaux dans l'étude des isotopes dans les précipitations, les effets de l'acidification des océans et la préservation du patrimoine culturel.

Un projet de rapport a été examiné par le Conseil des gouverneurs à sa réunion de mars 2019 (document GOV/2019/4). La présente version définitive a été établie à la lumière des débats tenus lors du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.



# Tables des matières

Synthèse .....	1
Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2019.....	1
Rapport principal.....	1
A. Applications énergétiques .....	1
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui .....	1
A.1.1. Pays qui exploitent des centrales nucléaires.....	3
A.1.2. Pays qui développent leur parc électronucléaire .....	4
A.1.3. Pays primo-accédants .....	6
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire .....	7
A.3. Cycle du combustible .....	8
A.3.1. Partie initiale.....	8
A.3.2. Assurance de l'approvisionnement.....	11
A.3.3. Partie terminale.....	12
A.4. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs.....	13
A.4.1. Déclassement des installations nucléaires .....	13
A.4.2. Remédiation.....	14
A.4.3. Gestion des déchets radioactifs.....	15
B. Données atomiques et nucléaires.....	19
C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche.....	20
C.1. Accélérateurs et instruments connexes .....	20
C.1.1. Avancées dans le domaine de la technologie des faisceaux d'ions .....	20
C.1.2. Simulation des dommages causés aux matériaux d'un réacteur à l'aide d'accélérateurs ...	21
C.1.3. Surveillance à grande échelle de la pollution atmosphérique à l'aide de techniques nucléaires d'analyse .....	22
C.1.4. Caractérisation de la contamination superficielle grâce aux mesures effectuées sur place	23
C.2. Réacteurs de recherche .....	24
C.2.1. Nouvelles technologies de modérateurs permettant de produire des neutrons froids.....	27
D. Technologies des rayonnements.....	28
D.1. Tomographie par rayons cosmiques : une sonde venant des étoiles.....	28
D.1.1. Applications.....	28
E. Santé humaine .....	31
E.1. Services d'étalonnage pour les procédures modernes de mammographie par rayons X .....	31
E.1.1. Contexte .....	31
E.1.2. Qualités de rayonnement.....	31
E.1.3. Dosimètres .....	32
E.1.4. Étalonnages.....	32

E.1.5. Autres avancées .....	32
E.2. Chirurgie radioguidée appliquée aux cancers gynécologiques .....	33
E.2.1. Contexte .....	33
E.2.2. Cancer du col de l'utérus .....	34
E.2.3. Cancer du corps de l'utérus.....	34
E.2.4. Cancer des ovaires .....	34
E.2.5. Tendances futures .....	34
F. Alimentation et agriculture.....	35
F.1. Irradiation dans les domaines alimentaire et phytosanitaire : de nouvelles avancées annoncent un changement de paradigme .....	35
F.2. Les technologies nucléaires au service de l'adaptation rapide des cultures et des systèmes de culture face au changement climatique .....	38
F.2.1. La sélection par mutation à l'aide de marqueurs pour une mise au point plus rapide de variétés intelligentes face au climat.....	39
F.2.2. La tomographie au service du phénotypage haut débit non invasif des plantes .....	40
F.3. Application innovante de techniques isotopiques et nucléaires en nutrition animale .....	41
F.3.1. Techniques nucléaires pour l'étude et l'amélioration de la nutrition des animaux au pâturage .....	42
F.3.2. Contribution des alcanes à chaîne linéaire à l'étude de la consommation, de la digestibilité et du choix des aliments du bétail .....	42
F.3.3. Évaluation de la teneur en nutriments, de l'ingestion volontaire et du choix des aliments grâce à l'analyse par SPIR de nutriments résiduels.....	43
F.3.4. Détermination exacte de la teneur en minéraux de fourrages par fluorescence X à dispersion d'énergie.....	43

# Synthèse

1. À la fin de 2018, la capacité de production totale des 450 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans le monde atteignait un pic record de 396,4 GWe, en augmentation de 5 GWe par rapport à 2017. En 2018, neuf réacteurs ont été couplés au réseau, sept ont été définitivement mis à l'arrêt et cinq ont été mis en chantier. Les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie, où se trouvent 35 des 55 réacteurs en construction, ainsi que 58 des 68 réacteurs couplés au réseau depuis 2005.
2. Sur les 30 États Membres qui exploitent actuellement des centrales nucléaires, 14 construisent de nouveaux réacteurs ou achèvent des projets de construction qui avaient été suspendus. Vingt-huit autres pays envisagent ou planifient d'inclure l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique, ou œuvrent activement dans ce sens. Quatre pays primo-accédants construisent leur première centrale nucléaire et plusieurs autres sont à des stades avancés de préparation de l'infrastructure.
3. D'après les projections hautes établies par l'Agence en 2018, la capacité mondiale de production d'énergie d'origine nucléaire devrait augmenter de 30 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux actuels et pratiquement doubler d'ici à 2050, tandis que les projections basses prévoient qu'elle continuera de diminuer pendant une dizaine d'années avant de repartir à la hausse pour atteindre les niveaux de 2030 à l'horizon 2050. Les profils d'émission présentés dans un rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat font apparaître la nécessité de développer sensiblement la contribution de l'électronucléaire aux objectifs d'atténuation des changements climatiques.
4. La 26<sup>e</sup> édition du « Livre rouge », rapport de référence biennal qui fait autorité dans le monde, montre que l'offre mondiale d'uranium est plus que suffisante pour répondre aux besoins prévus dans un avenir prévisible, quel que soit le rôle que l'énergie nucléaire jouera in fine pour satisfaire la future demande d'électricité et atteindre les objectifs climatiques fixés à l'échelle mondiale. Toutefois, les faibles prix de l'uranium ont continué de restreindre la capacité des sociétés à investir dans la prospection, les études de faisabilité et la mise en chantier de nouveaux projets. Les capacités mondiales de conversion, d'enrichissement et de fabrication de combustible sont plus que suffisantes pour répondre à la demande exprimée dans les projections hautes et basses de la capacité nucléaire installée.
5. S'agissant de la banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA, l'accord de transit avec la Chine est entré en vigueur en février 2018, et des contrats de transport avec les organismes habilités de la Fédération de Russie et du Kazakhstan ont été signés en septembre et en novembre 2018, respectivement. L'Agence a signé des contrats d'achat d'UFE avec la compagnie nucléaire nationale Kazatomprom, société par actions, et avec Orano Cycle.
6. À ce jour, environ 400 000 tonnes de combustible nucléaire usé sous forme de métaux lourds ont été extraites des centrales nucléaires, dont approximativement 25 % sont en cours de retraitement. Le reste est entreposé soit dans des piscines situées sur le site de réacteurs, soit dans les 151 installations d'entreposage de combustible usé hors site réparties dans 27 pays.
7. Dans les années à venir, de gros travaux de déclassement de réacteurs de puissance, de réacteurs de recherche, d'installations du cycle du combustible, d'assemblages critiques, d'accélérateurs et d'installations d'irradiation, ainsi que les activités de remédiation connexes, devraient se dérouler. Tant les nouvelles techniques que celles qui ont fait leurs preuves permettent d'apporter en continu des améliorations dans ces domaines.
8. Plusieurs pays ont progressé dans leurs projets de stockage définitif en formations géologiques profondes de déchets de haute activité et/ou de combustible usé déclaré en tant que déchet. Au Ghana et en Malaisie, des projets avant-gardistes de stockage en puits de sources radioactives scellées retirées

du service ont bien avancé. Des installations de stockage définitif sont en service pour toutes les autres catégories de déchets radioactifs dans le monde entier.

9. La sûreté a continué d'être renforcée et améliorée dans les centrales nucléaires et les réacteurs de recherche à travers le monde, et l'Agence a exécuté des missions d'examen par des pairs et offert des services consultatifs en grand nombre dans tous les domaines de la sûreté. Les États Membres ont continué de solliciter son assistance en ce qui concerne la gestion du vieillissement, la gestion des risques internes et externes, le contrôle de la contamination, l'utilisation de l'expérience d'exploitation, le cadre réglementaire applicable à un programme électronucléaire et aux réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires, ainsi que les opérations de déclassement et la gestion des déchets radioactifs.

10. Plusieurs bibliothèques de données nucléaires, indispensables à toutes les activités de recherche-développement menées dans le cadre des applications énergétiques et non énergétiques, ont vu le jour en 2018. Le Réseau international d'évaluation des données nucléaires (INDEN) a été créé pour faire avancer les calculs des sections efficaces de capture neutronique de nucléides particulièrement importants pour les techniques nucléaires.

11. Des technologies et des instruments nouveaux faisant appel à des accélérateurs et à des faisceaux d'ions ont permis d'enregistrer des résultats encourageants dans des domaines comme la sécurité des communications, la simulation de dommages matériels, la surveillance de la pollution de l'air, l'atténuation de l'effet des oxydes d'azote et des sulfures de soufre sur les changements climatiques et la pollution environnementale, et la mesure de la contamination superficielle.

12. Les 252 réacteurs de recherche en exploitation dans 55 pays continuent d'apporter une contribution importante aux secteurs de la médecine, de l'industrie, de l'éducation et de l'électronucléaire. Sept pays en ont mis en chantier, tandis que plusieurs autres planifient ou envisagent d'en construire de nouveaux. À ce jour, 99 réacteurs de recherche et quatre installations de production d'isotopes médicaux qui fonctionnaient à l'uranium hautement enrichi (UHE) ont été transformés pour pouvoir utiliser de l'UFE, ou leur mise à l'arrêt a été confirmée. En 2018, au Nigeria, le réacteur source de neutrons miniature a été converti à l'utilisation d'UFE à la place d'UHE, et son combustible irradié à l'UHE a été réexpédié en Chine. Curium, fournisseur de solutions en médecine nucléaire, a mené à bien le passage à la fabrication de cibles uniquement à partir d'UFE, grâce à quoi environ 75 % du molybdène 99 vendu dans le monde aujourd'hui est produit sans UHE. Bien que de brèves interruptions de production dans certaines installations d'irradiation et de traitement de cibles de molybdène 99 à travers le monde aient provoqué ici et là quelques ruptures d'approvisionnement, les mesures prises tant par les producteurs que par les professionnels de la santé ont compensé en partie les fluctuations de la production.

13. La radiographie par muons est une toute nouvelle technique qui fait appel aux muons cosmiques du fond de rayonnement naturel. Ceux-ci émettent à peu près 10 000 fois plus d'énergie qu'un rayon X habituel et peuvent ainsi pénétrer des structures imposantes sans y laisser de doses de rayonnement autres que celles du fond naturel de rayonnement. Les techniques d'imagerie fondées sur la radiographie par muons sont un outil non destructif qui permet d'étudier l'intégrité de structures civiles en grandeur nature, comme des bâtiments, des ponts et des tunnels. Elles peuvent être appliquées en géosciences et en archéologie, mais aussi dans les domaines de la sûreté et de la sécurité nucléaires et de la gestion des déchets radioactifs.

14. Chaque année, des millions de femmes passent une mammographie (radiographie à faible dose du sein) au titre du dépistage du cancer du sein. Il est essentiel de leur administrer la dose la plus faible possible tout en veillant à assurer la meilleure qualité d'image possible, quelles que soient la taille et la texture des seins. À cette fin, les services modernes de mammographie recourent à de larges spectres

d'énergie. Les laboratoires secondaires d'étalonnage en dosimétrie aident les hôpitaux à s'assurer que leurs doses sont conformes aux normes internationales agréées. Leur matériel de dosimétrie doit être régulièrement étalonné. Pour une mesure exacte des doses, il est recommandé d'employer des chambres d'ionisation de bonne qualité qui donnent des résultats fiables pour la gamme d'énergies des différents faisceaux.

15. La chirurgie radioguidée appliquée aux cancers gynécologiques peut réduire la morbidité à court et à long terme par rapport à l'ablation d'un nœud lymphoïde. Les ganglions lymphatiques sentinelles étant au cœur du processus de diffusion des métastases, leur localisation et biopsie sont donc indispensables au traitement de nombreux cancers. Leur biopsie est considérée comme la seule méthode fiable d'examen des ganglions lymphatiques au stade des micro-métastases. L'utilisation en salle d'opération de certains instruments comme des gamma-caméras portatives est ce qui a le plus apporté à la chirurgie radioguidée appliquée aux cancers gynécologiques.

16. L'irradiation des aliments est un élément important du processus de post-production qui vise à éliminer de ceux-ci les microbes à l'origine des intoxications alimentaires, les ravageurs ou les organismes provoquant leur altération, et donc à en prolonger la durée de conservation. Habituellement, elle est souvent externalisée à de grandes installations indépendantes, mais la mise au point de nouveaux irradiateurs et de techniques associées ouvre de nouvelles perspectives. Grâce à la technologie, la taille des générateurs de faisceaux d'électrons et de rayons X diminue, et de récentes avancées en matière d'irradiation par des sources implantées dans des appareils à rayonnements donne à penser qu'à l'avenir il sera plus facile d'installer des unités d'irradiation sur les chaînes d'emballage des denrées alimentaires.

17. Face aux pertes de récoltes considérables qu'induisent les changements climatiques, il est préconisé de suivre des parcours de sélection innovants pour assurer la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. La combinaison de techniques de sélection par mutation, de sélection assistée par marqueurs et de phénotypage à haut débit de diverses plantes est un moyen efficace de permettre à celles-ci de s'adapter rapidement aux changements climatiques. Des processus d'exécution des tâches sont mis sur pied pour la recherche efficace de mutations induites à l'origine de certains phénotypes, et ces méthodes et techniques sont de plus en plus diffusées aux États Membres.

18. D'ici à 2050, la demande mondiale d'aliments d'origine animale devrait augmenter de 60 à 70 %. Pour la satisfaire, le secteur de l'élevage devra intensifier le recours à la technologie dans ses systèmes de production. Il faudra multiplier par deux l'approvisionnement en aliments et fourrage pour animaux et l'accès à de bons pâturages. L'application innovante de techniques nucléaires et isotopiques peut contribuer à la création d'un ensemble de données sur la consommation d'aliments, le choix alimentaire des animaux et la teneur en nutriments des herbes dont ils se nourrissent, qui infléchiront l'orientation de stratégies appropriées de gestion de l'alimentation animale et des pâturages. Les études sur la micro-nutrition peuvent être à la base d'une supplémentation en minéraux qui est nécessaire pour optimiser la santé et la productivité des animaux.



# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2019

## Rapport principal

### A. Applications énergétiques

#### A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2018, il y avait 450 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité totale de 396,4 GWe<sup>1</sup> (voir tableau A-1), puissance la plus élevée à ce jour. Cela représente une augmentation de quelque 5 GWe de la capacité totale par rapport à 2017. Parmi les réacteurs en service, 82,2 % sont modérés et refroidis par eau ordinaire, 10,9 % sont modérés et refroidis par eau lourde, 3,1 % sont refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite, et 3,1 % sont refroidis par gaz. Trois d'entre eux sont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide. Près de 89 % de l'électricité d'origine nucléaire a été produite par 376 réacteurs à eau ordinaire.

2. En 2018, neuf nouveaux réacteurs à eau sous pression (REP) ont été couplés au réseau : sept en Chine (Haiyang-1, Haiyang-2, Sanmen-1, Sanmen-2, Taishan-1, Tianwan-4 et Yangjiang-5), et deux en Fédération de Russie (Leningrad 2-1 et Rostov-4). Sept réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt : Chinshan-1 à Taiwan (Chine) ; Ikata-2, Ohi-1, Ohi-2 et Onagawa-1 au Japon ; Leningrad-1 en Fédération de Russie ; et Oyster Creek aux États-Unis d'Amérique.

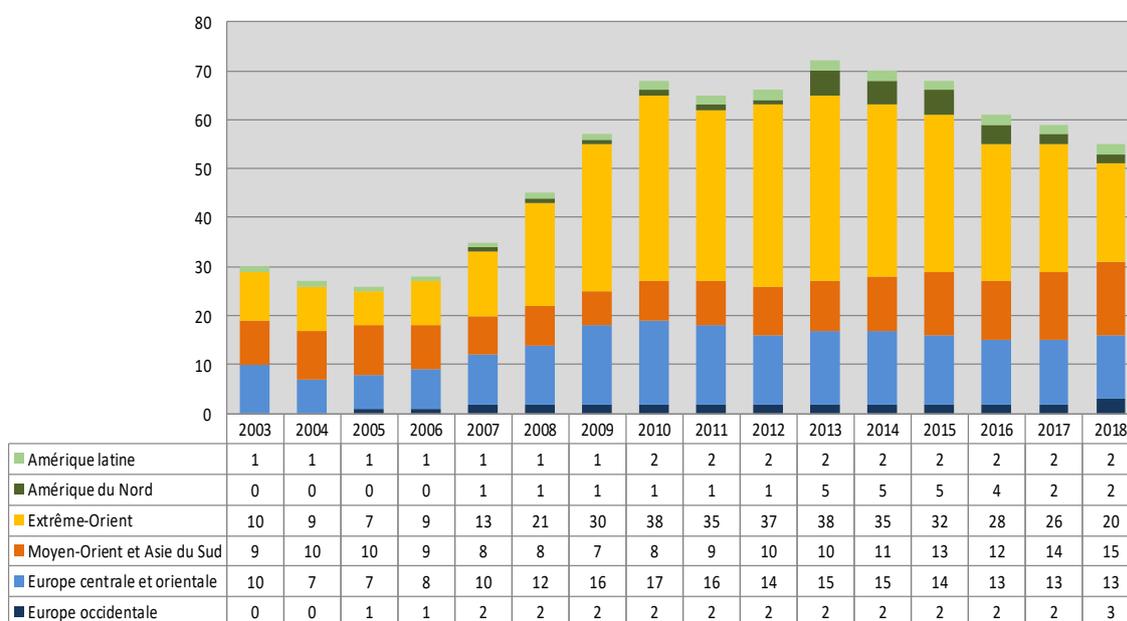


FIG. A-1. Nombre de réacteurs en construction par région.

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

3. Au 31 décembre 2018, 55 réacteurs étaient en construction. Akkuyu-1 (Turquie), Kursk 2-1 (Fédération de Russie), Rooppur-2 (Bangladesh), Shin-Kori-6 (République de Corée) et Hinkley

<sup>1</sup> Un GWe ou gigawatt électrique correspond à un milliard de watts d'énergie électrique.

Point C-1 (Royaume-Uni) ont été mis en chantier. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (figure A-1), où 35 réacteurs sont en construction. C'est également en Asie que se trouvent 58 des 68 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 2018)<sup>a</sup>

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2017		Expérience d'exploitation totale en 2017	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			10,6	4,7	68	3
ALLEMAGNE	7	9 515			71,9	11,7	839	7
ARGENTINE	3	1 633	1	25	6,5	4,7	85	2
ARMÉNIE	1	375			1,9	25,6	44	8
BANGLADESH			2	2160				
BÉLARUS			2	2 220				
BELGIQUE	7	5 918			27,3	39,0	296	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 340	14,8	2,7	55	3
BULGARIE	2	1 966			15,4	34,7	165	3
CANADA	19	13 554			94,4	14,9	750	6
CHINE	46	42 858	11	10 982	277,1	4,2	322	11
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	24	22 444	5	6700	127,1	23,7	547	5
ÉMIRATS ARABES UNIS			4	5 380				
ESPAGNE	7	7 121			53,4	20,4	336	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	98	99 061	2	2 234	808,0	19,3	4 408	6
FÉDÉRATION DE RUSSIE	36	27 252	6	4 573	191,3	17,9	1 298	6
FINLANDE	4	2 784	1	1 600	21,9	32,4	159	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	395,9	71,7	2 222	4
HONGRIE	4	1 902			14,9	50,6	134	2
INDE	22	6 255	7	4 824	35,4	3,1	504	11
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			6,3	2,1	7	4
JAPON	38	36 476	2	2 653	49,3	6,2	1 863	2
MEXIQUE	2	1 552			13,2	5,3	53	11
PAKISTAN	5	1 318	2	2 028	9,3	6,8	77	5
PAYS-BAS	1	482			3,3	3,1	74	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 932			28,3	34,5	164	10
ROUMANIE	2	1 300			10,5	17,2	33	11
ROYAUME-UNI	15	8 923	1	1 630	59,1	17,7	1 604	7
SLOVAQUIE	4	1 814	2	880	13,8	55,0	168	7
SLOVÉNIE	1	688			5,5	35,9	37	3
SUÈDE	8	8 613			65,9	40,3	459	0
SUISSE	5	3 333			24,5	37,7	219	11
TURQUIE			1	1 114				
UKRAINE	15	13 107	2	2 070	79,5	53,0	503	6
Total <sup>b,c</sup>	450	396 413	55	56 643	2 563,0		17 880	11

- a. Données tirées du Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'Agence (<http://www.iaea.org/pris>).
- b. Note : Le total inclut les chiffres suivants pour Taiwan (Chine) : 5 tranches en service (4 448 MWe) et 2 en construction (2 600 MWe) ; 26,7 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 11,4 % de la production électrique totale.
- c. L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) et des centrales à l'arrêt et en service à Taïwan (Chine) (224 ans et un mois).

### **A.1.1. Pays qui exploitent des centrales nucléaires**

4. À la fin de 2018, 66 % des 450 réacteurs nucléaires en service l'étaient depuis plus de 30 ans. Une exploitation à long terme et des programmes de gestion du vieillissement sont mis en œuvre pour un nombre croissant de centrales nucléaires.
5. La Hongrie a pratiquement fini de prolonger la durée d'exploitation de ses réacteurs. L'Autorité hongroise de l'énergie atomique a approuvé l'exploitation pendant 20 années supplémentaires de quatre centrales à Paks (en plus de la durée initiale nominale de 30 ans). Deux nouvelles tranches devraient être mises en chantier à Paks (projet Paks-II) en 2020, et leur exploitation industrielle devrait débuter en 2026 et 2027.
6. En mai 2018, la République islamique d'Iran a commencé les travaux de stabilisation du sol sur le chantier de construction du réacteur Bushehr-2 de 1 050 MWe, le premier des deux qui sont prévus sur le site. Les tranches Bushehr-2 et -3 devraient être couplées au réseau en 2026 et 2027, respectivement.
7. Au Canada, les travaux de rénovation de la tranche 2 de la centrale de Darlington ont commencé. La rénovation des quatre réacteurs CANDU, qui devrait permettre à la centrale de poursuivre ses activités jusqu'en 2055, devrait être terminée d'ici à 2026. En août 2018, la centrale de Pickering a reçu une licence d'exploitation de dix ans comprenant trois phases : poursuite de l'exploitation commerciale jusqu'en 2024 ; activités de stabilisation, notamment retrait du combustible et de l'eau ; et entreposage sûr avec surveillance.
8. Le Gouvernement britannique, qui est déterminé à fournir de nouvelles capacités nucléaires dans le cadre de sa stratégie de croissance verte de 2017, a pris des mesures pour encourager la construction de nouveaux réacteurs, l'industrie proposant jusqu'à 17,8 GWe de nouvelles capacités. Les travaux de préparation du site sont en cours pour le premier réacteur à Hinkley Point C, dont la mise en service est prévue pour 2025.
9. En juillet 2018, la centrale de Kozloduy en Bulgarie a mené à terme une mise à niveau qui pourrait prolonger sa durée de vie jusqu'en 2051. En juin 2018, le conseil des ministres a annulé une décision de 2012 qui mettait fin à la construction de la centrale nucléaire de Belene, autorisant ainsi la reprise du projet et des travaux sur le site.
10. En 2018, des études étaient en cours au Mexique pour augmenter la capacité installée de la centrale nucléaire de Laguna Verde.
11. En juillet 2018, l'Arménie a confirmé qu'elle travaillait à prolonger la durée de vie utile de la tranche 2 de sa centrale nucléaire de Metsamor.
12. La Roumanie prévoit d'accroître encore sa capacité de production nucléaire grâce à la construction et à la mise en service des tranches 3 et 4 de la centrale nucléaire Cernavodă. En mai 2018, il a été décidé que la tranche Cernavodă-1 serait mise à l'arrêt pour rénovation en 2026.
13. En août 2018, l'Afrique du Sud a publié son dernier Plan de ressources intégré/Plan de développement national, qui ne prévoit aucune augmentation de sa capacité nucléaire avant 2030.

14. En mai 2018, l'entreprise de services publics tchèque ČEZ a mené une étude qui n'a révélé aucun obstacle technique ou de sécurité fondamental à ce que les tranches de la centrale de Temelin aient une durée de vie utile de 60 ans. Le même mois, le gouvernement a reporté sa décision de construire de nouvelles tranches nucléaires.

15. En Belgique, les centrales nucléaires devraient être progressivement mises hors service d'ici à 2025. Comme le confirme la nouvelle stratégie énergétique approuvée par le gouvernement en mars 2018, le réacteur Doel-3 sera mis hors service d'ici à 2022, Tihange-2 d'ici à 2023 et les autres tranches seront mises à l'arrêt en 2025. Le Plan national intégré énergie et climat 2021-2030, en cours d'élaboration en Espagne, devrait définir l'évolution de l'énergie nucléaire dans le bouquet énergétique du pays, avec un calendrier de fermeture des centrales nucléaires. L'Allemagne continue d'abandonner progressivement le nucléaire. La Suède et la Suisse maintiennent leur parc nucléaire actuel comme prévu.

16. La sûreté d'exploitation des centrales nucléaires reste élevée, comme le montrent les indicateurs de sûreté recueillis par l'Agence. La figure A-2 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). Le nombre d'arrêts d'urgence n'est qu'un des nombreux indicateurs de performance en matière de sûreté à être couramment utilisés.

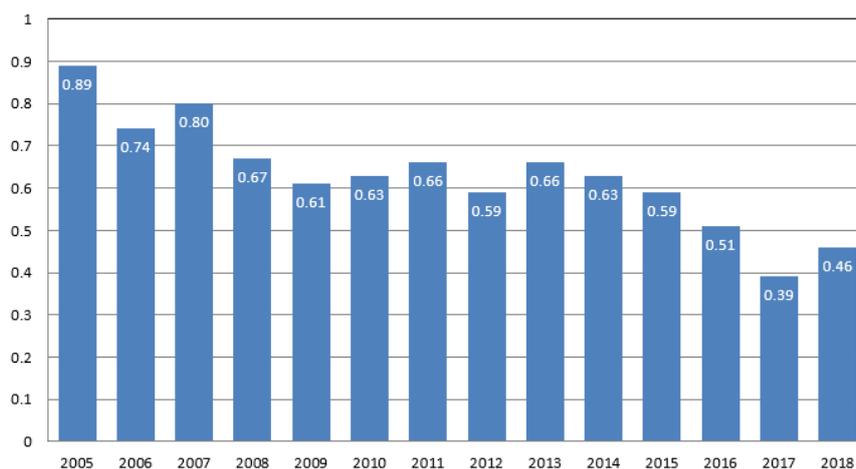


FIG. A-2. Taux moyen d'arrêts d'urgence (automatiques ou manuels) – nombre d'arrêts d'urgence pour 7 000 heures de fonctionnement d'une tranche. (Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA [www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris))

### A.1.2. Pays qui développent leur parc électronucléaire

17. Sur les 30 États Membres qui exploitent des centrales nucléaires, 11 s'emploient activement à construire de nouveaux réacteurs ou à développer leur programme électronucléaire. Sur les 55 projets de réacteurs en cours, 46 se trouvent dans des pays dotés de programmes nucléaires en cours, la Chine (11), l'Inde (7) et la Fédération de Russie (6) étant en tête.

18. À l'heure actuelle, la Chine a 46 tranches de réacteurs nucléaires en exploitation et 11 en construction. En 2018, sept tranches (Sanmen-1 et -2, Taishan-1, Haiyang-1 et -2, Yangjiang-5 et Tianwan-4) ont été couplées au réseau. L'organisme chinois de réglementation de l'énergie, l'Administration nationale de l'énergie, devrait se fixer pour objectif d'atteindre une capacité nucléaire de 120 à 150 GWe d'ici à 2030. La Chine prévoit aussi de construire 30 réacteurs à l'étranger d'ici à 2030.

19. La Fédération de Russie compte 37 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation et 6 en construction. Selon son dernier programme fédéral cible, la part du nucléaire dans l’approvisionnement en électricité devrait être de 25 à 30 % d’ici à 2030, de 45 à 50 % en 2050 et de 70 à 80 % d’ici à la fin du siècle. En avril 2018, la Russie a achevé la construction d’une centrale nucléaire flottante, l’Akademik Lomonosov, qui devrait entrer en service en 2019.

20. Le projet EPR Okiluoto-3, en Finlande, est entré dans la phase de mise en service, les essais fonctionnels à froid et à chaud s’achevant. L’exploitation industrielle devrait démarrer à la fin de 2019. La Finlande a quatre réacteurs nucléaires en exploitation et prévoit de développer son programme. Les licences d’exploitation d’Olkiluoto-1 et d’Olkiluoto-2 ont été prolongées, ce qui permet d’exploiter celles-ci jusqu’en 2038. Le projet Hanhikivi-1 fait toujours l’objet d’un examen en vue de l’obtention d’une licence, et la construction devrait démarrer en 2019.

21. Le plan de sécurité énergétique du Pakistan fixe un objectif de capacité de production d’électricité d’origine nucléaire de 8 800 MWe d’ici à 2030, grâce notamment à un REP de 1 100 MWe, dont la construction devrait commencer en 2020 et l’exploitation industrielle en 2025.

22. Les États-Unis d’Amérique ont 98 réacteurs nucléaires commerciaux en exploitation. La construction des tranches 3 et 4 (modèle AP1000) de la centrale Vogtle, dans l’État de Géorgie, est en cours, et leur exploitation devrait démarrer en 2021 et 2022. En juillet 2018, il a été annoncé que le Duane Arnold Energy Center doté d’un seul réacteur, situé dans l’Iowa, serait définitivement mis à l’arrêt à la fin de 2020, cinq ans avant l’expiration de sa licence d’exploitation. Les exploitants des tranches 3 et 4 de Turkey Point en Floride, des tranches 2 et 3 de Peach Bottom en Pennsylvanie et des tranches 1 et 2 de Surry en Virginie ont déposé des demandes pour faire passer de 60 à 80 ans leur durée d’exploitation. Les États-Unis sont le premier pays à envisager d’étendre jusqu’à 80 ans la durée de vie d’une centrale. L’unique réacteur de la centrale d’Oyster Creek a été mis hors service en septembre 2018 après environ 49 ans d’exploitation industrielle.

23. En Argentine, le réacteur de la centrale d’Embalse fait l’objet d’un processus de prolongation de sa durée de vie et de modernisation. La mise en service du petit réacteur modulaire (PRM) Carem-25 de 30 MWe est prévue pour 2022. En avril 2018, l’organisme de réglementation nucléaire a prolongé la licence d’exploitation d’Atucha-1 jusqu’en 2024.

24. En mars 2018, la Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL, Inde) et Électricité de France (EDF) ont signé un accord sur la construction de la centrale nucléaire de Jaitapur, comprenant six réacteurs EPR (réacteurs européens à eau sous pression). En octobre, l’Inde et la Fédération de Russie ont signé un autre accord pour la construction d’une centrale de six réacteurs VVER dont le site n’est encore sélectionné.

25. Le Gouvernement brésilien, qui cherche à accroître sa production d’électricité d’origine nucléaire, prévoit que quatre nouveaux REP seront en exploitation en 2025-2030. La construction du réacteur Angra-3 de 1 405 MWe avait repris en 2010, la date initiale de démarrage prévue étant 2018. Cependant, les travaux n’avancent plus alors que près de 60 % de la tranche est achevée, aussi Eletronuclear s’est-il engagé dans un partenariat pour les relancer. En mai, une mission d’examen par des pairs de l’Agence a constaté qu’Eletronuclear, l’exploitant public d’Angra-1, avait fait des progrès dans la gestion du vieillissement du réacteur et la préparation à son exploitation à long terme.

26. La France maintient en exploitation 58 réacteurs nucléaires de puissance et le combustible d’une nouvelle tranche à la centrale de Flamanville devrait avoir été chargé à la fin de 2019. Selon le Gouvernement français, la stratégie de développement de l’énergie nucléaire est liée aux objectifs fixés par la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et le plan énergétique pluriannuel, qui devrait avoir été adoptée à la mi-2019. Le projet de plan fixe 2035 comme date limite pour ramener à 50 % la part du nucléaire dans le parc électrique du pays. À cette fin, 14 réacteurs existants seront mis

à l'arrêt d'ici à 2035. Le Gouvernement rédigera d'ici 2021, en collaboration avec l'industrie nucléaire, un plan de travail qui servira de base pour une décision sur la construction de nouveaux réacteurs de puissance.

27. Conformément au 8<sup>e</sup> Plan de base de l'offre et de la demande d'électricité sur le long terme de décembre 2017, la République de Corée poursuivra la construction de cinq réacteurs APR-1400 d'ici à 2023. Toutefois, il sera mis fin à la construction de nouvelles tranches et à la prorogation de la durée de vie utile des centrales existantes. En juin 2018, la Compagnie coréenne d'énergie hydroélectrique et nucléaire a décidé de mettre à l'arrêt le deuxième réacteur nucléaire le plus ancien du pays, Wolsong-1, sur la base d'une analyse économique effectuée dans le cadre de la politique de transition énergétique du Gouvernement. Le réacteur était à l'arrêt depuis mai 2017 pour une maintenance planifiée.

28. En juillet 2018, il a été annoncé que la tranche 3 de la centrale nucléaire slovaque de Mochovce devrait entrer en service au deuxième trimestre de 2019.

29. En juillet 2018, la licence d'exploitation de Rovno-3 en Ukraine a été prolongée de 20 ans, de sorte que la centrale puisse poursuivre ses activités jusqu'en 2037. Une étude de faisabilité en vue d'une reprise de la construction des tranches Khmelnytskyi-3 et -4 a été achevée en 2018. La « Stratégie énergétique de l'Ukraine jusqu'en 2035 » prévoit que le nucléaire représentera 50 % de la production d'électricité de ce pays d'ici à 2035.

30. En juillet 2018, le Gouvernement japonais a approuvé le plan énergétique de base, qui a confirmé que la part du nucléaire y serait d'environ 20 à 22 % d'ici à 2030. En juin 2018, la Compagnie d'électricité de Tokyo a annoncé son intention de déclasser toutes les tranches de la centrale nucléaire de Fukushima Daini. Le même mois, Genkai-4 a redémarré selon de nouvelles normes réglementaires. En 2018, il a été décidé que les réacteurs Ohi-3 et -4 et Tokai-2 seraient autorisés à poursuivre leurs activités.

### **A.1.3. Pays primo-accédants**

31. Parmi les 28 États Membres qui envisagent ou planifient d'inclure l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique, ou œuvrent activement dans ce sens, 19 ont entrepris des études sur l'infrastructure électronucléaire, cinq ont déjà pris une décision et préparent l'infrastructure nécessaire et cinq ont signé des contrats et se préparent à la construction ou l'ont déjà commencée.

32. Aux Émirats arabes unis, la construction des quatre réacteurs de la centrale nucléaire de Barakah a progressé. La mise en service de la tranche 1 est prévue pour la fin de 2019 ou le début de 2020 et celle de la deuxième un an plus tard. Une mission d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) pour la phase 3 a été menée à la demande de ce pays en 2018. Au Bélarus, la construction de la première centrale nucléaire, à Ostrovets, s'est poursuivie, la mise en service de la première et de la deuxième tranches étant prévue pour 2019 et 2020, respectivement. Le Bangladesh a procédé à la première coulée de béton de la deuxième tranche de la centrale nucléaire de Rooppur. La mise en service des tranches 1 et 2 est prévue en 2024 et 2025, respectivement. Un deuxième projet de centrale nucléaire est également planifié. En Turquie, une nouvelle législation nucléaire a été promulguée par un décret législatif. La construction de la centrale nucléaire d'Akkuyu a commencé et la mise en service de la première tranche est prévue pour 2023. En Égypte, une licence d'implantation de la centrale nucléaire à quatre tranches d'El Dabaa était à l'étude. Les travaux de construction devraient commencer en 2020 et la mise en service de la première tranche est prévue en 2026. L'Égypte a demandé qu'une mission INIR soit menée pour la phase 2 en octobre 2019.

33. L'Arabie saoudite prévoit la construction en parallèle d'un PRM et de deux centrales nucléaires classiques, pour lesquelles le processus d'achat est en cours. La construction du PRM devrait commencer en 2020 et celle de la première grande centrale nucléaire en 2021, la mise en service de cette

dernière étant prévue pour 2028. Une mission INIR sur la phase 2 a eu lieu en juillet 2018. En Jordanie, un programme électronucléaire sur deux axes est en cours d'élaboration ; il comprend la sélection d'une technologie PRM d'ici à 2019 qui sera déployée en 2027-2028 avec une capacité totale de 200 à 600 MWe selon la demande d'électricité et la construction d'un grand REP d'une capacité d'environ 1 000 MWe, probablement après 2030. En octobre 2018, l'Ouzbékistan a signé un accord avec la Fédération de Russie pour la construction de sa première centrale nucléaire à deux tranches, d'une capacité totale pouvant aller jusqu'à 2 400 MWe. Le Nigeria prévoit la construction de quatre réacteurs, selon une approche CEPC (construction-exploitation-propriété-cession), le premier devant être mis en service en 2027. Au Kenya, en attendant une décision concernant la poursuite du programme électronucléaire, la mise en service de la première centrale nucléaire est prévue pour 2027. Une mission SEED (site et conception basée sur les événements externes) s'y est déroulée en 2018. Le Kenya a demandé qu'une mission INIR de suivi soit menée en août 2019. Il a récemment exprimé le souhait de poursuivre la construction d'un réacteur de recherche avant d'entreprendre celle d'une centrale nucléaire. En Pologne, la mise en service de la première tranche est prévue pour 2030 si le gouvernement décide de poursuivre le programme électronucléaire.

34. Les États Membres continuent de bénéficier de l'aide de l'Agence pour développer l'infrastructure nucléaire nationale nécessaire selon l'approche par étapes, qui contribue à la mise en place de programmes électronucléaires sûrs, sécurisés et durables. Cette approche comprend des examens par des pairs, des missions d'experts, des cours et des outils portant systématiquement sur les 19 questions d'infrastructure nucléaire. Avec cinq missions INIR menées en 2018 en Arabie saoudite, aux Émirats arabes unis, au Niger, aux Philippines et au Soudan, le nombre de missions INIR menées (dans 20 États Membres) depuis leur création en 2009 s'établit à 27.

## **A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire**

35. Les projections de l'Agence (figure A-3), établies en 2018 en consultation avec des experts régionaux d'après les informations les plus récentes sur les politiques et les conditions du marché, suggèrent que l'énergie nucléaire pourrait avoir des difficultés à maintenir sa place actuelle dans le bouquet énergétique mondial. Dans la projection basse pour 2030, la production d'électricité d'origine nucléaire diminue de plus de 10 % à partir d'une capacité installée nette de 392 GWe à la fin de 2017, alors que dans la projection haute, elle augmente de 30 % pour atteindre une capacité de 511 GWe en 2030. À plus long terme, dans la projection basse, la capacité continue de diminuer pendant une dizaine d'années avant de repartir à la hausse jusqu'à ses niveaux de 2030 d'ici à 2050, la part du nucléaire dans la capacité de production mondiale tombant à 2,8 %, contre 5,7 % actuellement. Dans la projection haute, la capacité installée devrait atteindre 748 GWe d'ici à 2050, soit 5,8 % de la capacité de production mondiale.

36. L'écart important entre les projections basse et haute est dû à l'incertitude qui plane sur le remplacement du grand nombre de réacteurs devant être retirés du service vers 2030 et au-delà, en particulier en Amérique du Nord et en Europe.

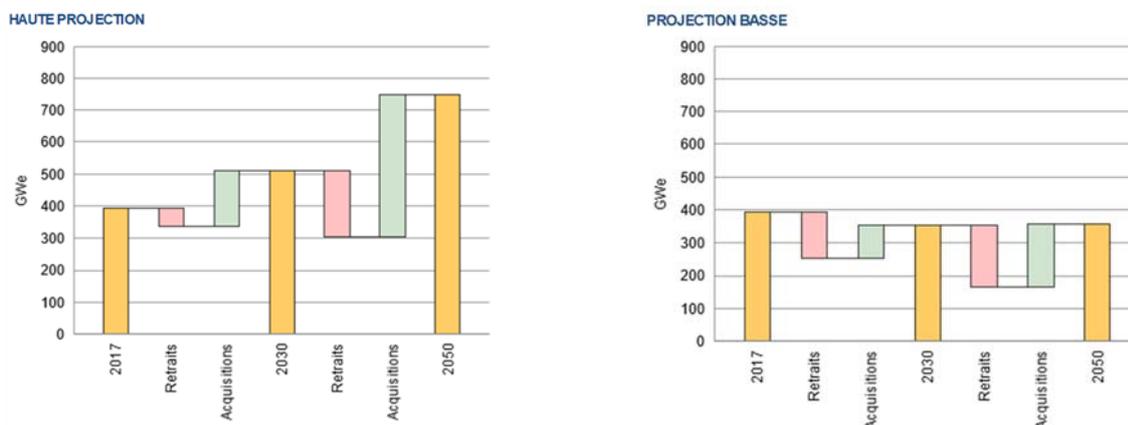


FIG. A-3 : Projections haute (à gauche) et basse (à droite) de la capacité nucléaire dans le monde.  
(Source : Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, IAEA Reference Data Series No. 1, 2018)

37. La nécessité d'accroître considérablement la contribution de l'électronucléaire à l'atténuation des changements climatiques se reflète dans les profils d'émissions présentés dans le récent rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat consacré aux incidences d'un réchauffement climatique de 1,5 °C<sup>2</sup>. Dans la plupart des profils compatibles avec la limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C, le nucléaire augmente sa part d'ici à 2050 ; par exemple, les quatre modèles présentés dans le résumé établi à l'intention des décideurs prévoient une augmentation de la production d'électricité d'origine nucléaire d'au moins 59 % d'ici à 2030 et de 501 % au plus d'ici à 2050, par rapport à 2010.

38. L'intérêt pour l'électronucléaire demeure également vif dans les pays en développement, en particulier en Asie, où des pays comme la Chine et l'Inde cherchent à répondre à l'augmentation rapide de la demande d'électricité tout en réduisant les émissions de GES. Ainsi, les négociations internationales sur les changements climatiques qui sont en cours dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, ainsi que de la 24<sup>e</sup> session de la Conférence des Parties (COP24) qui s'est tenue en décembre à Katowice (Pologne), sont une bonne occasion de montrer comment l'énergie nucléaire à faible émission de carbone peut aider à affronter les problèmes climatiques et énergétiques mondiaux.

### A.3. Cycle du combustible

#### A.3.1. Partie initiale

##### Ressources et production d'uranium

39. La 26<sup>e</sup> édition de la publication biennale établie conjointement par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE et l'AIEA, intitulée *Uranium 2018 : Ressources, Production and Demand*<sup>3</sup>, également connu sous le nom de « Livre rouge », montre que l'offre mondiale d'uranium est plus que suffisante pour répondre aux besoins prévus dans un avenir prévisible, quel que soit le rôle que l'énergie nucléaire jouera in fine, à savoir satisfaire la future demande en électricité et atteindre les objectifs climatiques fixés à l'échelle mondiale. Toutefois, le rapport souligne que des investissements importants et des compétences techniques seront requis pour que ces ressources d'uranium puissent être exploitées en temps voulu, y compris celles provenant de mines fermées temporairement pour entretien et maintenance.

<sup>2</sup> IPCC, Global Warming of 1.5°C, 1 October 2018, <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

<sup>3</sup> Publiée en décembre à l'adresse suivante : <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>

40. Les prix au comptant de l'uranium sont restés relativement déprimés en 2018, se situant généralement entre 47 \$/kg U et 59 \$/kg U, légèrement supérieurs à la fourchette de variation en 2017, avec une tendance générale à la hausse en cours d'année. Cette diminution des prix a considérablement limité la capacité des entreprises à mobiliser des fonds pour la prospection, les études de faisabilité et les nouveaux projets de construction. De nombreux projets concernant l'uranium sont restés en veilleuse ou insuffisamment financés. Certains projets qui avaient été lancés ou pour lesquels la construction était à un stade avancé sont restés fermés temporairement pour entretien et maintenance ou leur production a diminué. Ainsi, la production mondiale en 2018 sera probablement similaire à celle de 2017, qui était de 59 342 t U, une quantité inférieure à celle qui avait été indiquée pour 2016.

41. Le Kazakhstan est toujours le premier pays producteur mondial d'uranium, presque exclusivement grâce à ses mines de lixiviation in situ. Après avoir augmenté rapidement entre 2000 et 2016, la production a diminué, s'établissant à 23 400 t U en 2017 ; on attend un chiffre similaire pour 2018.

42. Au Canada, deuxième producteur mondial, la mine de Cigar Lake a atteint sa pleine capacité de production de 6 925 t U en 2017 et un chiffre similaire est prévu pour 2018. Toutefois, la suspension des activités d'extraction à McArthur River et de préparation à Key Lake, annoncée en novembre 2017 pour une période de dix mois, a été prolongée pour une durée indéfinie en janvier 2018 en raison de la faible demande d'uranium et des prix peu élevés.

43. L'exploitation des mines de Rössing et de Husab en Namibie s'est poursuivie en 2018 et la mine d'uranium de Langer Heinrich a été temporairement fermée pour entretien et maintenance en mai 2018 compte tenu de la période prolongée de faibles prix de l'uranium. Des études de faisabilité d'une portée limitée se sont poursuivies sur certains autres gisements d'uranium dans le pays.

44. En Australie, la mine d'uranium à lixiviation in situ de Four Mile a produit environ 1 500 t U en 2018. Dans la mine du projet Ranger, la production provient seulement des stocks de minerai et les opérations d'extraction et de traitement devraient cesser d'ici janvier 2020. En général, les travaux sont en attente pour plusieurs gisements d'uranium en Australie occidentale ou certaines études supplémentaires sont en cours de réalisations, mais aucune date n'a été fixée pour la construction et l'ouverture.

45. Les études de faisabilité et les études environnementales et les approbations se sont poursuivies pour le projet du gisement d'éléments de terres rares, de métaux de base et d'uranium de Kvanefjeld, au Groenland (Royaume du Danemark).

46. La Chine a continué d'augmenter ses dépenses de prospection et de mise en valeur de l'uranium, tant à l'intérieur de ses frontières qu'à l'étranger. En décembre 2018, la China National Uranium Corporation a décidé d'acheter la participation de 69 % de Rio Tinto dans la mine de Rössing, mine à ciel ouvert en exploitation la plus ancienne du monde qui a produit plus d'uranium que n'importe quelle mine.

47. Le Conseil espagnol de sûreté nucléaire a continué d'analyser les documents du Projet d'uranium de Salamanca afin de produire son rapport obligatoire sur l'autorisation de construction de l'usine de concentration d'uranium, l'une des approbations requises avant sa mise en service.

48. Des études de faisabilité et des travaux réglementaires sont en cours dans la mine d'Engenho dans l'État de Bahia (Brésil) pour une autre opération d'extraction à ciel ouvert, près de la mine épuisée de Cachoeira.

### **Conversion et enrichissement**

49. La capacité de conversion et d'enrichissement actuelle est plus que suffisante pour satisfaire la demande mondiale, bien que le marché soit segmenté et que la production soit centrée sur un petit nombre de fournisseurs.

50. En septembre 2018, Orano a inauguré au Tricastin (France) sa nouvelle usine de conversion dans le cadre du projet Comurhex II. Conçue à l'aide des technologies les plus avancées, l'usine « Philippe Coste » consomme très peu de produits chimiques et d'énergie. Trois fours produiront jusqu'à 15 000 tonnes d'hexafluorure d'uranium (UF<sub>6</sub>) par an.

51. Le principal procédé laser moléculaire destiné à enrichir l'uranium est la SILEX, utilisant de l'UF<sub>6</sub>. En juin 2018, l'entreprise australienne Silex Systems a décidé de renoncer à l'acquisition d'une participation majoritaire dans Global Laser Enrichment (GLE), coentreprise réunissant General Electric (GE), Hitachi et Cameco. Silex Systems a déclaré que, bien que les négociations avec GE-Hitachi fussent un stade avancé, l'analyse de rentabilité de GLE présentait trop de risques.

### **Fabrication de combustible**

52. En janvier 2018, les entreprises américaines spécialisées dans la mise au point du combustible nucléaire Lightbridge et Framatome Inc. ont lancé Enfission, une coentreprise détenue à parts égales, en vue de mettre au point, fabriquer et commercialiser des assemblages combustibles basés sur la technologie de combustible nucléaire métallique avancé de Lightbridge. Le combustible 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 d'améliorer l'économie, l'efficacité et la sûreté des centrales nucléaires existantes et futures.

53. En janvier 2018, Westinghouse Electric Company a annoncé avoir signé un contrat avec Energoatom prolongeant la livraison de combustible nucléaire pour réacteurs VVER en Ukraine de 2020 à 2025.

54. Westinghouse et ses huit partenaires du consortium européen ont annoncé en mars 2018 avoir mené à bien un projet financé par l'Union européenne visant à diversifier l'approvisionnement en combustible nucléaire pour réacteurs VVER-440 de conception russe en Europe.

55. En mars 2018, la tranche 1 de la centrale nucléaire Edwin I. Hatch aux États-Unis a commencé à effectuer des essais à l'aide d'assemblages combustibles résistants aux accidents fabriqués par Global Nuclear Fuel (GNF), composés de deux types de crayons combustibles « IronClad » possédant une gaine du combustible en alliage fer, chrome et aluminium, et « ARMOR » utilisant un revêtement de zirconium. En mai 2018, GENUSA (coentreprise réunissant l'entreprise espagnole ENUSA et GNF) a été retenue par la compagnie d'électricité suédoise Vattenfall, pour fournir huit recharges de combustible pour la centrale nucléaire de Forsmark de 2020 à 2023.

56. En avril 2018, la société russe de combustible nucléaire TVEL (qui fait partie de la Société nationale d'énergie atomique « Rosatom ») a signé des accords avec l'Organisation iranienne de l'énergie atomique et la Société de production et de développement électronucléaires en vue de remplacer les assemblages combustibles du type UTVS pour le réacteur VVER-1000 de la centrale iranienne de Bushehr par des cartouches combustibles du type TVS-2M en 2020. En août, TVEL a fourni le premier lot de combustible nucléaire modifié TVSA-T.mod.2 au réacteur VVER-1000 de la centrale nucléaire de Temelin (République tchèque). À la centrale nucléaire de Rostov (Fédération de Russie), un lot expérimental de cartouches de combustible TVS-2M munies d'un filtre anti-débris, mises au point dans le cadre du projet russe de défaillance zéro du combustible nucléaire, ont été chargées dans le réacteur VVER-1000.

57. En mai 2018, l'entreprise espagnole ENUSA et Westinghouse Electric Company ont signé un accord cadre de coopération en vue de collaborer à la mise au point du combustible résistant aux accidents EnCore de Westinghouse. Le combustible comprendra des concepts tels que des gaines de zirconium chromées, des gaines de carbure de silicium et des pastilles de siliciure d'uranium ( $U_3Si_2$ ).

58. En juin 2018, le Complexe du combustible nucléaire en Inde a annoncé son intention de développer ses installations de production de composants du combustible et de réacteurs à Hyderabad et à Kota afin de satisfaire la demande pour les nouveaux réacteurs proposés.

59. En août 2018, la société canadienne SNC-Lavalin a signé avec la Third Qinshan Nuclear Power Company un contrat de services d'ingénierie et un accord de licence en vue de l'utilisation de grappes de combustible modifié à 37 éléments pour réacteurs CANDU-6, utilisant de l'équivalent uranium naturel et de l'uranium naturel. Ce combustible sera utilisé aux tranches 1 et 2 de la centrale nucléaire de Qinshan (Phase III) dans la province chinoise de Zhejiang. Il s'agirait de la première utilisation commerciale de ce combustible modifié.

60. En septembre 2018, Framatone a signé un contrat pour la fourniture et l'installation de barres de combustible revêtues de chrome dans la tranche 1 de la centrale nucléaire Arkansas Nuclear One d'Entergy fin 2019. Vattenfall a en outre passé un contrat avec Framatome pour l'approvisionnement de dix recharges d'assemblages combustibles fabriqués dans son installation de Lingen (Allemagne) entre 2021 et 2024 pour Forsmark-3 et Ringhals-3 et -4.

61. En octobre 2018, l'Administration nationale de la sécurité nucléaire des États-Unis a dénoncé le contrat liant au consortium construisant l'installation de fabrication de combustible à mélange d'oxydes (MOX), ou projet MOX, sur le site de Savannah River, en Caroline du sud. L'installation était conçue pour neutraliser au moins 34 tonnes de plutonium de qualité militaire en le transformant en combustible pour réacteurs nucléaires commerciaux.

62. En décembre 2018, le premier lot industriel de combustible MOX a été produit commercialement au Combinat minier et chimique de Zheleznogorsk (Fédération de Russie) pour le réacteur à neutrons rapides BN-800.

### **A.3.2. Assurance de l'approvisionnement**

63. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs de l'Agence a approuvé la création de la banque d'uranium faiblement enrichi de l'AIEA (banque d'UFE). En 2015, l'Agence et le Kazakhstan ont établi le cadre juridique de base en vue de la création de cette banque d'UFE dans l'usine métallurgique d'Ulba à Ust-Kamenogorsk (Kazakhstan).

64. En 2018, l'accord de transit avec la Chine est entré en vigueur, et des contrats de transport avec les organismes habilités de la Fédération de Russie et du Kazakhstan ont été signés.

65. Le plan relatif aux activités spéciales est presque achevé, après la prise en compte de différentes questions, notamment celles liées au cadre réglementaire du Kazakhstan, à la sûreté et à la sécurité du site.

66. L'Agence a signé des contrats d'achat d'UFE avec Kazatomprom du Kazakhstan et avec Orano Cycle de la France et prévoit que la livraison d'UFE à son installation d'entreposage d'UFE aura lieu avant la fin de 2019.

67. 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

68. À ce jour, plus de 400 000 tonnes de métaux lourds (t ML) ont été déchargées des centrales nucléaires. Jusqu'à présent, quelque 75 % du combustible déchargé des réacteurs commerciaux sont entreposés soit dans des piscines situées sur le site du réacteur, soit dans des installations d'entreposage à sec/en piscine du combustible usé situées hors du site du réacteur. Il existe actuellement 151 lieux d'entreposage hors du site du réacteur dans 27 pays.

69. Le système d'entreposage à sec dans des conteneurs souterrains à la centrale nucléaire à l'arrêt de San Onofre (États-Unis) a reçu en février 2018 les premiers transferts de conteneurs d'entreposage de combustible chargés. La conception en-dessous de la surface a été choisie en raison de sa résistance à des événements sismiques extrêmes. Également en février 2018, la Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis a déclaré avoir accepté la demande d'autorisation déposée en mars 2017 pour la construction d'une installation consolidée d'entreposage provisoire au Nouveau Mexique, dans le comté de Lea. Il est également prévu que l'installation utilise un système de conteneurs d'entreposage à sec en dessous de la surface, entreposant dans un premier temps jusqu'à 8 680 t ML de combustible usé.

70. En juillet 2018, le Ministère espagnol de la transition écologique a demandé au Conseil de sûreté nucléaire (CSN) de suspendre la publication du rapport sur la demande d'autorisation pour la construction de l'installation proposée d'entreposage centralisée de déchets de haute activité (DHA) et de combustible nucléaire usé. Le programme d'activités concernant la suspension a été approuvé par le CSN le 25 juillet 2018.

71. Au Japon, les travaux ont débuté en août 2018 en vue de retirer le combustible usé de la cuve d'entreposage remplie de sodium du prototype de surgénérateur à neutrons rapides de Monju. Les assemblages combustibles sont transférés vers une piscine d'entreposage située sur le site du réacteur après lavage pour en éliminer le sodium résiduel.

72. Dans la centrale nucléaire de Borssele (Pays-Bas), le premier combustible MOX usé a été déchargé et mis dans la piscine de combustible usé du réacteur en mai 2018. Il est prévu d'y entreposer le combustible MOX usé pendant quatre ans avant de le transporter. La stratégie de recyclage des Pays-Bas aura pour effet qu'il n'y ait plus de combustible usé aux fins de stockage définitif en formations géologiques profondes, comme cela a été indiqué dans le rapport du projet OPERA, publié en janvier 2018.

73. Au Japon, on est en train de créer un espace dans la piscine commune d'entreposage du combustible usé à Fukushima en transférant les assemblages combustibles vers une installation d'entreposage à sec temporaire située sur le site du réacteur. L'installation temporaire est en exploitation depuis avril 2013 et a la capacité d'entreposer 50 châteaux d'entreposage à sec. En 2018, les exploitants ont suivi une formation pratique pour pouvoir retirer à distance de la tranche 3 le combustible de la piscine d'entreposage et de l'entreposer dans la piscine commune d'entreposage du combustible usé.

74. En Allemagne, la propriété des installations d'entreposage à sec hors du site du réacteur sera transférée des entreprises de services publics à l'entreprise publique BGZ le 1<sup>er</sup> janvier 2019.

75. Une quantité restante, d'environ 100 000 t ML, qui a été déchargée du parc mondial de centrales nucléaires, a été retraitée. La capacité mondiale annuelle de retraitement est de quelque 5 000 tonnes pour les combustibles à oxyde normal, mais actuellement elle n'est pas utilisée totalement.

76. Avec une capacité annuelle totale de 1 700 tonnes, les deux usines de retraitement du combustible nucléaire d'Orano UP2-800 et UP3 de La Hague (France) retraitent en moyenne entre 1 000 et 1 100

tonnes par an (plus de 34 000 tonnes de combustible nucléaire usé ont été retraitées depuis 1976) : le plutonium extrait est recyclé en combustible MOX à l'usine MELOX sur le site de Marcoule. En 2018, Orano a poursuivi le démantèlement de sa centrale de première génération UP2-400.

77. L'usine de retraitement RT-1 de la Mayak Production Association à Ozersk (Fédération de Russie) a retraité plus de 25 t ML de combustible usé VVER-1000 en 2018, à la suite de mises à niveau effectuées en 2017. En outre, le retraitement à titre expérimental du combustible usé MOX provenant du réacteur à neutrons rapides BN-600 a été également mené à bien. Une autorisation a été délivrée en vue de l'exploitation du premier centre de démonstration pilote de techniques innovantes de retraitement au Combinat minier et chimique de Krasnoyarsk, où un assemblage de combustible usé de VVER-1000 a été retraité en 2018. Un deuxième centre de démonstration pilote ayant une capacité de retraitement de 250 t ML par an est en construction et devrait être achevé en 2020.

78. En janvier 2018, la Chine et la France ont signé un accord pour la construction d'une usine de retraitement et de recyclage en Chine. En juin, Orano et la Compagnie nucléaire nationale chinoise ont lancé les travaux préparatoires concernant l'usine dont la capacité sera de 800 t U par an.

79. Japan Nuclear Fuel Limited, l'exploitant de l'usine de retraitement de Rokkasho a annoncé fin décembre 2017 que l'achèvement de l'installation avait été repoussé de trois ans afin de permettre de se conformer à des prescriptions réglementaires additionnelles, telles que la garantie du confinement et du relèvement en cas d'accident grave.

80. L'exploitation de l'usine de retraitement de combustible THORP au Royaume-Uni a pris fin en novembre 2018. Pendant sa durée de vie, elle a retraité 9 300 t U de combustible à oxyde, notamment du combustible domestique avancé pour réacteurs refroidis par gaz, du combustible étranger pour réacteurs à eau bouillante et REP et du combustible provenant de réacteurs prototypes du Royaume-Uni.

## **A.4. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs**

### **A.4.1. Déclassement des installations nucléaires**

81. Au 31 décembre 2018, on dénombrait 173 réacteurs nucléaires de puissance mis à l'arrêt ou en cours de déclassement dans le monde. Dix-sept d'entre eux ont été entièrement déclassés et plusieurs autres approchent des étapes finales du déclassement. Plus de 150 installations du cycle du combustible ont été définitivement mises à l'arrêt ou sont en cours de déclassement, et près de 130 ont été déclassées. Plus de 120 réacteurs de recherche sont à l'arrêt ou en cours de déclassement, et plus de 440 réacteurs de recherche ont été entièrement déclassés.

82. La mise en place de techniques ayant fait leurs preuves et les travaux de recherche-développement permettent d'apporter en continu des améliorations, principalement dans les pays dotés d'importants programmes électronucléaires. Par exemple, des progrès techniques ont été accomplis dans la mise en œuvre de la décontamination et la segmentation des composants de circuits primaires dans plusieurs centrales nucléaires en Allemagne, en Espagne, en Fédération de Russie, en France en Slovaquie et en Suède. En juin 2018, l'Italie a accueilli une mission du Service d'examen intégré de l'AIEA portant sur la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, le déclassement et la remédiation (ARTEMIS) chargée d'examiner les plans de la SOGIN relatif au démantèlement des cuves sous pression et des parties internes des réacteurs de Garigliano et de Trino. L'examen faisait suite à une mission ARTEMIS effectuée en 2017 aux fins d'examiner les plans généraux de déclassement de tous les sites de la SOGIN.

83. Des progrès continuent d'être enregistrés en Bulgarie, en Lituanie, en Slovaquie et en Ukraine en ce qui concerne les projets de déclassement de centrales nucléaires financés par la Banque européenne pour la reconstruction et le développement. Il s'agit par exemple du démarrage de l'exploitation d'une

nouvelle installation de fusion de plasma pour l'élimination des déchets dans la centrale nucléaire de Kozloduy, l'achèvement de la démolition des tours de refroidissement de la centrale nucléaire de Bohunice et la mise en service complète de la nouvelle enveloppe de confinement sûr de la tranche 4 de Tchernobyl.



FIG. A-4 Démantèlement des composants du réacteur nucléaire de puissance de Chooz A (France) (à gauche) et état d'avancement du démantèlement au réacteur de recherche de Magurele (Roumanie) (à droite) (Photos : EDF, AIEA)

84. En ce qui concerne le démantèlement des réacteurs de recherche, le démantèlement du bouclier biologique du réacteur VVR-S de 2 MWth à Magurele près de Bucarest (Roumanie) est à un stade avancé (figure A-4) Le réacteur de recherche homogène « FOTON » à Tachkent (Ouzbékistan) a été entièrement démantelé ; le site du réacteur n'est plus soumis au contrôle réglementaire et il est maintenant disponible pour d'autres utilisations industrielles.

85. En octobre 2018, l'Organisme japonais chargé de faciliter la réparation des dommages nucléaires et le déclassement a publié un document intitulé *Technical Strategic Plan 2018 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.* Les travaux de démantèlement du site de Fukushima Daiichi progressent, avec l'achèvement des murs étanches côté terre (barrière cryogénique) et les préparatifs en vue du retrait du combustible de la piscine de combustible usé de la tranche 3.

#### A.4.2. Remédiation

86. En 2018, des progrès ont été accomplis dans l'élaboration de projets de remédiation des anciens sites de production d'uranium en Asie centrale. Financé par la Commission européenne, le projet intitulé « Réalisation d'une évaluation intégrée de l'impact environnemental et d'une étude de faisabilité relative à la gestion et la remédiation des anciens sites de production d'uranium de Degmay et de Taboshar au Tadjikistan » a été mené à bien. Des travaux intensifs ont été menés dans le cadre d'un projet similaire financé par la Commission européenne pour les anciens sites de production d'uranium de Mailuu Suu (Kirghizistan). Dans le cadre du programme cible intergouvernemental de la Communauté d'États indépendants (CEI) mené sous la direction technique de la Fédération de Russie, la décharge de résidus de Kadji-Sai (Kirghizistan) a été rendue inoffensive pour l'environnement. Les travaux de génie à grande échelle se sont poursuivis aux installations de Tuyuk-Suu et Dalnee. En novembre 2018, le Conseil des chefs de gouvernement de la CEI a approuvé un financement pour des activités de remédiation qui devraient démarrer en 2020 au Tadjikistan. L'appui fourni par la communauté internationale aux pays d'Asie centrale pour la remédiation de leurs anciens sites de production d'uranium est coordonné par le Groupe de coordination pour les anciens sites de production d'uranium (CGULS) sous la direction conjointe de l'Agence, de la Commission européenne et de représentants des pays bénéficiaires.

87. La mise en place du revêtement provisoire sur le dernier grand bassin de retenue de résidus sur le site de Culmützsch a été finie en 2018 dans le cadre du projet de remédiation environnementale de Wismut, qui est un projet à grande échelle de remédiation des anciens sites de production d'uranium dans l'est de l'Allemagne (figure A-5). De ce fait, tous les résidus radioactifs (178 millions de mètres cubes) sont recouverts de manière sûre. Les travaux de mise en place du revêtement définitif du bassin de retenue de Culmützsch dureront jusqu'en 2028. Sur certains autres sites, l'entreprise publique Wismut est passée à l'exécution de tâches à long terme, principalement le traitement et la surveillance à long terme des eaux et la maintenance des objets remis en état.



*FIG. A-5 Bassin de retenue de résidus de Culmützsch en cours de remédiation (Allemagne), 2018.  
(Photo : Wismut GmbH)*

88. Le Japon a régulièrement fait état de progrès dans la décontamination hors du site du réacteur. Dans la zone d'étude intensive de la contamination, où le débit de dose mesuré dans l'air était supérieur à  $0,23 \mu\text{Sv/h}$  (équivalant à une dose supplémentaire supérieure à 1 mSv par an), toutes les municipalités responsables ont achevé en mars 2018 les activités de décontamination prévues. Toute la décontamination à grande échelle requise est maintenant achevée, hormis dans la zone « dont il est difficile de revenir ».

89. En 2018, l'entreprise publique Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM), responsable du programme de remédiation des vieilles mines d'uranium au Portugal, a achevé la remédiation de l'environnement des anciennes mines de Castelejo, Formiga, Vale de Videira, Vales et Póvoa de Cervães. À Urgeiriça, EDM poursuit le démantèlement de l'ancienne usine de traitement chimique construite dans les années 1940 pour la production de concentré d'uranium et a récemment entrepris la remédiation de l'environnement de cinq autres anciennes mines d'uranium. À ce jour, les sites de 40 des 62 anciennes mines d'uranium ont fait l'objet d'activités de remédiation et sont actuellement en cours de maintenance post-remédiation et soumis à une surveillance continue avec des unités de traitement de l'eau par des moyens actifs et passifs en fonction des besoins.

#### **A.4.3. Gestion des déchets radioactifs**

##### **Gestion des sources radioactives scellées retirées du service**

90. 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. La mise en œuvre du projet de stockage en puits en Malaisie est au stade de l'examen final de l'argumentaire de sûreté, le forage devant débuter début 2019.

91. En 2018, un certain nombre d'opérations consistant à enlever les sources radioactives scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et à les placer sous contrôle dans des conditions de stockage adéquates ont été réalisées. Au Brésil, le retrait de toutes les sources restantes de catégories 1 et 2 retirées

du service a été parachevé avec l'expédition du dernier lot de sources aux États-Unis. Dans le cadre de cette opération, les plus importantes utilisant jusqu'à ce jour la cellule chaude mobile, 81 sources de téléthérapie ayant une activité de 1 093TBq (29 500 Ci), ont été rapatriées ou envoyées à une entreprise de recyclage de sources. Grâce à un financement du Canada, 27 sources radioactives scellées retirées du service des catégories 1 et 2 ont été enlevées au total du Brésil, de l'Équateur, du Paraguay, du Pérou et d'Uruguay et transportées pour être recyclées. Trois autres des catégories 1 et 2 ont aussi été enlevées du Liban. Dans plusieurs autres États Membres, dont l'Albanie, le Burkina Faso, Chypre, la Macédoine du Nord, le Népal et la Tunisie, et l'enlèvement de sources des catégories 1 et 2 a commencé.

92. La mise en service de la boîte à outils mobile qui doit être utilisée en conjonction avec le système de forage en puits s'est achevée en 2018 ; la première mise en œuvre est prévue en Malaisie début 2019.

93. Les opérations relatives au conditionnement des sources radioactives retirées du service ont été menées à bien au Chili, à Chypre, au Ghana, au Honduras, en Indonésie, en Jordanie, en Malaisie, en Slovénie, à Sri Lanka et au Viet Nam et, dans ces pays, le personnel local a reçu une formation appropriée au conditionnement de ces sources. Dans deux États Membres, des établissements ont ultérieurement été agréés et autorisés par leur autorité nationale compétente à effectuer des opérations de conditionnement qui aideront d'autres États Membres au niveau régional à l'avenir.

94. Des inventaires nationaux de sources radioactives scellées retirées du service ainsi que de sources scellées en cours d'utilisation ont été établis et/ou actualisés à Antigua-et-Barbuda, aux Bahamas, à la Barbade, au Belize, à la Dominique, au Guyana et en Papouasie-Nouvelle-Guinée.

95. Le Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes est accessible à un plus grand nombre d'utilisateurs dans les États Membres, facilitant le recensement de telles sources trouvées sur le terrain. Des initiatives visant à fournir davantage de détails sur les sources et les dispositifs ont été entreprises en 2018.

### **Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif**

96. En février 2018, Cyclife, filiale d'EDF, a commencé les opérations de traitement de 1 800 tonnes des déchets métalliques contaminés par des substances radioactives durant le démantèlement des centres nucléaires de Trino, Garigliano et de Latina (Italie), à la suite d'un accord signé avec la SOGIN en 2017.

97. La centrale nucléaire de Tchernobyl commence actuellement à traiter les déchets radioactifs liquides ; il s'agit d'une étape importante vers la restauration du site à la suite de l'accident nucléaire de 1986, les exploitants commençant à transférer la majeure partie des déchets nucléaires liquides de l'installation dans des dépôts pour stockage à long terme. L'usine de traitement des déchets radioactifs liquides de Tchernobyl traitera 22 000 tonnes d'eau contaminée résultant de l'accident ainsi que de l'exploitation des trois autres réacteurs de la centrale. L'usine de traitement des eaux usées, qui a été mise en service en janvier 2018, devrait éliminer les contaminants radioactifs de l'eau à un rythme d'environ 2 000 tonnes par an pendant les vingt prochaines années.

98. L'exploitation d'une installation de fusion du plasma dans la centrale nucléaire de Kozloduy (Bulgarie) a commencé, facilitant le traitement des déchets nucléaires pour appuyer les activités de déclasserment. La technique permet de traiter les déchets avec un minimum de risques de contamination radioactive. La forme définitive des déchets est durable et exempte de matières organiques et de liquides ; il s'agit en fait d'un laitier vitreux amorphe et chimiquement inerte. De plus, les déchets radioactifs traditionnels conditionnés dans une matrice de béton ou de bitume peuvent être retraités dans une installation de plasma en vue de produire un colis de déchets satisfaisant aux critères d'acceptation de l'installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur de Kozloduy. La technologie des plasmas permettra à l'installation de réduire de manière significative le volume de déchets radioactifs de faible ou moyenne activité provenant des réacteurs 1 à 4 de Kozloduy qui ont été mis à l'arrêt entre 2002 et 2006, et des réacteurs 5 et 6, qui sont en exploitation. Dans le plasma, les métaux sont

fondus et oxydés. Le débris de béton, le sable, les granulés inorganiques, les matériaux d'isolation et l'amiante sont fondus.

99. Un projet démontrant l'utilisation de la technique de vitrification des déchets radioactifs dans la centrale nucléaire endommagée de Fukushima Daiichi (Japon) a été lancé en avril 2018. Il comprend deux parties principales. La première porte sur l'élaboration et l'étude de formulations de matrices pour le conditionnement de formes durables de déchets. Des essais en laboratoire (100 g), des essais au banc (1 kg) et des essais dans des conditions proches des conditions industrielles (100 kg) seront effectués dans les laboratoires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives à Marcoule. La deuxième porte sur la réalisation d'études de faisabilité pour la mise en œuvre du processus, les principes relatifs à l'exploitation et la maintenance et le stockage définitif des déchets.

100. Le premier transfert des déchets liquides radioactifs provenant d'une cuve de déchets souterraine vers une installation « mégavolume » – Saltstone Disposal Unit (SDU) 6 – a été mené à bien sur le site de Savannah River appartenant au Ministère de l'énergie des États-Unis. Les SDU sont conçues pour confiner le mortier de déchets de faible activité produit à partir de la solidification des déchets salés non dangereux décontaminés sur le site de Caroline du Sud. Les cuves cylindriques en béton sont conçues sur la base d'un modèle utilisé sur le plan commercial pour l'entreposage de l'eau et d'autres liquides. La SDU 6, qui a été achevée l'année dernière, est la première unité de stockage définitif « mégavolume » du site, car plus de dix fois plus grande que d'autres SDU qui y sont installées. Son diamètre est d'environ 114 mètres et elle mesure presque 13 mètres de haut. Au total, sept unités mégavolume de ce type sont conçues pour répondre aux besoins en matière de stockage définitif sur le site.

### **Stockage définitif des déchets radioactifs**

101. 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. Elles comprennent des installations de stockage définitif en tranchées destinées aux déchets de très faible activité (en Espagne, en France et en Suède, par exemple) ou, aux déchets de faible activité (DFA) dans des régions arides (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 Fédération de Russie, 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, en Fédération de Russie, en Finlande, en Hongrie, en Norvège, en République de Corée et en République tchèque, par exemple).

102. D'autres installations de stockage définitif de DFMA, notamment en Allemagne (Konrad), en Belgique (Dessel), en Bulgarie (Kozloduy-Radiana), au Canada (Kincardine), en Lituanie (Stabatiškės), en République islamique d'Iran (Talmesi), en Roumanie (Saligny) et en Slovénie (Vrbina), ainsi qu'une installation de stockage définitif de DFA au Canada (Chalk River), sont à différentes étapes d'autorisation ou de construction.

103. 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).

104. En Bulgarie, l'entreprise publique chargée des déchets radioactifs poursuit 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.

105. 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.

106. En Finlande, Posiva, l'entreprise chargée de la gestion des déchets radioactifs, effectue in situ un test grandeur nature des systèmes, condition pour obtenir une licence d'exploitation pour le dépôt en construction à Olkiluoto. Le test a pour but de faire la démonstration de la conception intégrale du système nécessaire pour placer des assemblages combustibles nucléaires, emballés dans des silos recouverts de cuivre, dans des puits creusés dans des roches hôtes granitiques dans des tunnels construits à cet effet. Le test prévoit le remplissage des tunnels avec de la bentonite et l'installation du système définitif de scellés utilisant un bouchon mâle en béton armé. Il utilisera deux silos grandeur nature équipés d'éléments chauffants pour simuler la chaleur résiduelle censée provenir du combustible usé.

107. En janvier 2018, les autorités suédoises se sont prononcées sur la procédure d'autorisation concernant l'installation de stockage définitif du combustible usé proposée par la SKB. L'Autorité suédoise de sûreté radiologique est favorable à la construction de l'installation de stockage définitif à Forsmark, disant que la SKB dispose des capacités requises pour procéder au stockage définitif de manière sûre. Le tribunal des sols et de l'environnement a indiqué dans sa déclaration que la demande de la SKB satisfaisait en majeure partie aux conditions requises pour l'approbation, mais qu'il subsistait encore quelques incertitudes relatives à la performance à long terme du silo en cuivre en ce qui concerne les processus de corrosion du cuivre. La SKB est en train de répondre à cette demande d'informations complémentaires.

108. La solution en matière de gestion adoptée en France pour les déchets radioactifs de moyenne activité à longue période et de haute activité (DHA/DMA-LD) est un stockage définitif en formations géologiques profondes dans l'argilite du Callovo-Oxfordien. Le projet Cigéo de l'Andra vise à mettre en œuvre cette décision, prévue par une loi adoptée en 2006. Andra est en train de boucler la phase de conception détaillée et de travailler aux optimisations de référence. À l'issue d'une phase d'examen technique du dossier des options de sûreté, l'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a organisé une consultation publique en 2017 sur son projet d'avis. Après avoir analysé les contributions reçues, l'ASN a émis un avis en janvier, disant que le projet avait dans l'ensemble atteint une maturité technique suffisante au stade du dossier d'options de sûreté. Toutefois, des informations supplémentaires sur la justification de l'architecture de l'installation de stockage définitif, la conception et le dimensionnement de l'installation pour lui permettre de résister aux aléas naturels, la surveillance de l'installation, la prévention de l'inflammation des conteneurs de déchets à base de goudron et la gestion des situations post-accidentelles sont requises pour la demande d'autorisation de construction qu'Andra entend soumettre en 2019 ou début 2020.

109. En novembre 2018, le Conseil fédéral suisse a annoncé sa décision relative à l'étape 2 du Plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes ». Cela permet à Nagra, l'organisation suisse chargée de la gestion des déchets radioactifs, d'axer davantage la caractérisation détaillée du site sur les trois régions des sites d'implantation potentiels restantes. Elle a effectivement entrepris la troisième et dernière étape en vue de soumettre une demande d'autorisation pour une installation de stockage géologique d'ici 2024.

110. En décembre 2018, le Gouvernement du Royaume-Uni a publié sa politique intitulée « Working with Communities » dans le cadre du lancement au niveau national d'une approche consensuelle du choix du site d'une installation de stockage géologique.

## B. Données atomiques et nucléaires

111. Des bibliothèques de données nucléaires, indispensables à toutes les activités de recherche-développement menées dans le cadre des applications énergétiques et énergétiques, ont été rendues publiques par plusieurs organismes, en plus des données hébergées par l'Agence<sup>4</sup>. En 2018, les mises en circulation les plus importantes ont été les suivantes :

- La bibliothèque de données nucléaires ENDF/B-VIII, rendue publique par les États-Unis, présente des changements majeurs pour les réactions neutroniques concernant les nucléides les plus importants pour les applications nucléaires, notamment les principaux isotopes de l'uranium, le fer, l'oxygène et l'hydrogène. Des efforts considérables ont été consacrés à l'évaluation de nouvelles mesures des quantités d'actinides liées à la fission, telles que le spectre de neutrons instantanés de fission et le nombre moyen de neutrons de fission. La bibliothèque ENDF/B-VIII a été validée à grande échelle, notamment pour les expériences critiques de référence.
- La bibliothèque de données nucléaires JEFF-3.3, créée par l'OCDE/AEN, devrait être essentiellement utilisée dans les analyses des réacteurs européens, les logiciels des réacteurs, les analyses du cycle du combustible et la fusion.
- Un nouveau fichier de données photonucléaires, intitulé JENDL/PD-2016, rendu public par le Japon, fournit les données relatives aux réactions nucléaires induites par les photons, telles que la photoabsorption, la photofission, les sections efficaces de production de particules et de nucléides résiduels et les sections efficaces différentielles doubles des particules émises. Cette bibliothèque contient des données relatives à 2 681 nucléides, avec une gamme d'énergie des photons incidents allant de 1 MeV à 140 MeV.
- Le fichier JENDL/AD-2017 sur la section efficace d'activation pour le déclasserement des installations nucléaires, également rendu public par le Japon, vise à répondre aux besoins d'évaluation des matières radioactives durant le déclasserement des installations nucléaires.
- Une nouvelle publication de la bibliothèque de données nucléaires évaluées à l'aide du code TALYS, intitulée TENDL-2017<sup>5</sup>, succède à la bibliothèque TENDL-2015. La collection contient des fichiers de données complets au format ENDF-6, notamment des données de covariance sur 2 813 isotopes (tous stables ou ayant une période supérieure à 1 seconde), jusqu'à 200 MeV d'énergie incidente, pour les particules incidentes suivantes : neutrons, photons, protons, deutérons, tritons, hélium 3 et particules alpha.

112. Les données relatives à la spectroscopie d'absorption totale des rayons gamma (TAGS) seraient un ajout important aux bibliothèques de données existantes sur la décroissance, car elles pourraient avoir une incidence sur les calculs de la chaleur résiduelle et des spectres d'antineutrinos. Il est donc important d'examiner l'état actuel de la TAGS, ainsi que les nouvelles exigences en matière de données. Une évaluation détaillée des données relatives à la décroissance des principaux produits de fission qui contribuent à la production de chaleur de désintégration pour une vaste gamme de circuits d'alimentation a été menée à bien par l'Agence en 2018 et sera publiée en 2019 ; elle a en outre permis la mise à jour des tableaux des priorités pour les mesures par TAGS et par spectroscopie gamma à haute résolution.

113. Le Réseau international d'évaluation des données nucléaires (INDEN) a été créé en 2018 en vue d'encourager la réalisation de progrès dans les calculs des sections efficaces de capture neutronique de nucléides particulièrement importants pour les techniques nucléaires (figure B-1). Des experts en physique nucléaire coordonneront leurs efforts dans le cadre de mesures innovantes et de simulations

<sup>4</sup> Données disponibles à l'adresse <https://www-nds.iaea.org>.

<sup>5</sup> Disponible à l'adresse [https://tendl.web.psi.ch/tendl\\_2017/tendl2017.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html).

de modèles en vue d'obtenir les meilleurs tableaux de données possibles sur les réactions nucléaires pour des nucléides légers comme ceux du carbone et de l'azote, pour les matériaux de structure comme le chrome et le nickel, et pour les actinides importants tels que les isotopes du plutonium. Outre l'apport d'améliorations fondamentales aux données nucléaires, les mises à jour des bibliothèques de données nucléaires seront directement validées par des expériences de criticité intégrale de référence pour l'énergie des neutrons thermiques et des neutrons rapides. La plupart des experts contribuant à cette avancée viennent de Chine, de pays européens, du Japon et des États-Unis ; l'Agence joue, quant à elle, un rôle de coordination.

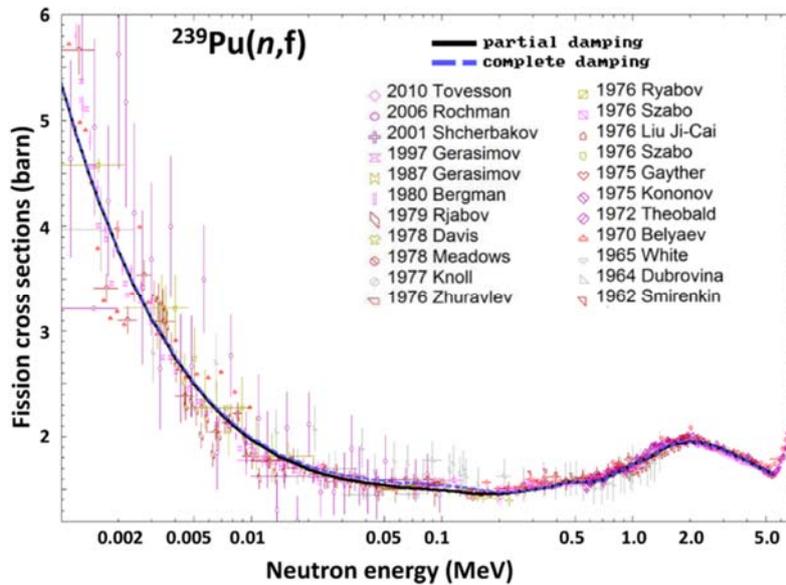


FIG. B-1. État actuel des sections efficaces de fission de l'uranium 235, telles qu'étudiées actuellement dans le cadre de la collaboration de l'INDEN.

## C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

### C.1. Accélérateurs et instruments connexes

#### C.1.1. Avancées dans le domaine de la technologie des faisceaux d'ions

114. Grâce aux dernières innovations dans le domaine de la technologie des accélérateurs, il est possible de créer des défauts de la taille d'un atome et optiquement actifs dans une vaste catégorie de matériaux, tels que les semi-conducteurs à large bande (p. ex. les diamants, le carbure de silicium, le nitrure de gallium) et les matériaux bidimensionnels (p. ex. le nitrure de bore hexagonal) (figure C-1). Ces systèmes constituent une base prometteuse pour l'émission d'un photon unique, nouveau domaine ayant des applications dans les communications sécurisées (distribution sécurisée de clés de cryptage au moyen de photons individuels) et le marquage/la détection cellulaire. Plusieurs stratégies d'implantation ionique sont en cours d'élaboration dans le cadre d'une initiative importante de collaboration internationale et avec l'aide de l'Agence. Des innovations majeures devraient prochainement voir le jour aussi bien dans le domaine des communications quantiques sécurisées que dans celui des biotechnologies.

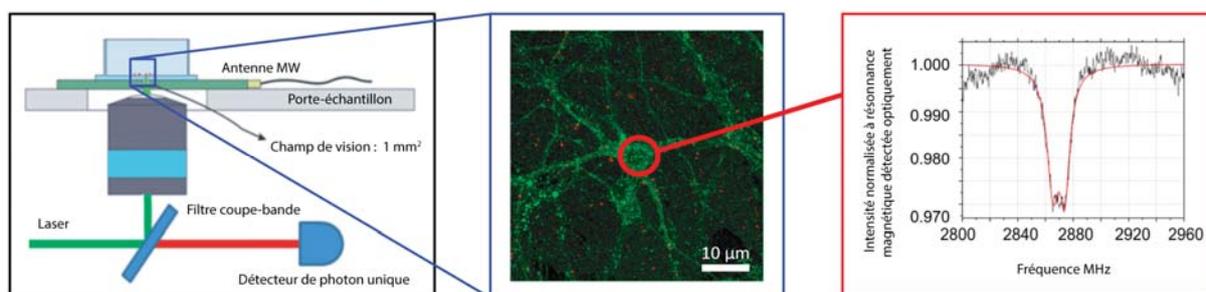


FIG. C-1. Application de faisceaux d'ions pour la création de nanodiamants luminescents internalisés dans des cellules neuronales vivantes en culture : (à gauche) schéma du dispositif expérimental d'imagerie et d'acquisition de signal ; (au centre) carte de microscopie confocale montrant les nanodiamants luminescents internalisés ; (à droite) résonance magnétique des nanodiamants détectée optiquement. (Publié avec l'aimable autorisation de Paolo Olivero, Université de Turin, Institut national italien de physique nucléaire et Institut national italien de recherche métrologique)

### C.1.2. Simulation des dommages causés aux matériaux d'un réacteur à l'aide d'accélérateurs

115. Si leur sélection et leur réglage sont adéquats, les faisceaux d'ions peuvent servir à simuler, à titre expérimental, les dommages matériels causés par les neutrons thermiques et les neutrons rapides présents dans les réacteurs de fission ou de fusion. Comme il n'existe actuellement aucune source de neutrons spécialement prévue pour la fusion ayant un flux suffisamment intense pour imiter les conditions d'irradiation propres à la première paroi d'un réacteur de fusion, des accélérateurs de faisceaux d'ions sont utilisés pour reproduire, dans la mesure du possible, les changements microstructuraux ainsi que la composition des matériaux en vue de mener des études approfondies de caractérisation microstructurale. Par exemple, il est possible de coupler un à trois accélérateurs électrostatiques de quelques centaines de kV à quelques MV, de manière à former une configuration de faisceaux simple, double ou triple, pour créer des dommages balistiques et implanter simultanément des éléments de transmutation appropriés tels que l'hélium et l'hydrogène, qui sont les principaux produits des réactions induites par neutrons dans les matériaux de structure.

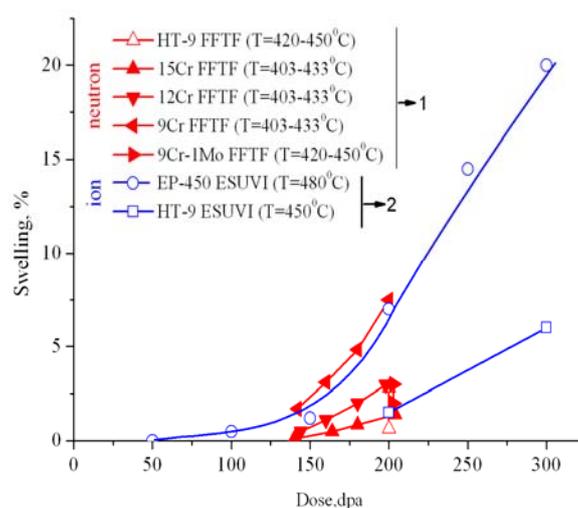


FIG. C-2. Comparaison du gonflement des matériaux dû à des irradiations par neutrons rapides (en rouge) et par faisceaux d'ions (en bleu), en fonction des différentes doses causant des dommages (dpa : déplacements par atome). (Publié avec l'aimable autorisation de V. Voyevodin, Institut de physique et de technologie de Kharkov)

116. Toutefois, avant que cette méthode ne soit pleinement reconnue, il est nécessaire de mettre en place, grâce à une coordination et à des efforts internationaux, un exercice normalisé qui permet de déterminer si les résultats peuvent être reproduits sur différents sites, mais aussi de définir les principes directeurs pour les meilleures pratiques relatives aux accélérateurs ainsi que la mesure dans laquelle l'irradiation par faisceaux d'ions peut servir à analyser rapidement les nouveaux matériaux de structure d'installations nucléaires. Dans ce contexte, l'Agence coordonne<sup>6</sup> une expérience interlaboratoires menée à l'échelle internationale en vue de comparer les résultats de l'irradiation de microstructures endommagées de l'acier T91 effectuée dans plusieurs accélérateurs de faisceaux d'ions, mais aussi de celle effectuée dans ceux-ci et le réacteur de recherche à neutrons rapides BOR-60 en Fédération de Russie.

### C.1.3. Surveillance à grande échelle de la pollution atmosphérique à l'aide de techniques nucléaires d'analyse

117. La pollution atmosphérique est un problème planétaire qui peut avoir des effets nocifs sur l'environnement et la santé humaine, et la gestion de la qualité de l'air joue un rôle important dans la réduction du niveau des émissions. Il n'y a toutefois pas assez de données à l'appui du recensement des sources de pollution nuisant à la population des grandes villes, ainsi que de la précision des voies de transport transfrontière de la pollution. Afin d'élaborer de meilleures stratégies et des outils d'atténuation, les États Membres, avec le soutien de l'Agence, utilisent des techniques d'analyse nucléaires et d'autres méthodes complémentaires pour déterminer la composition élémentaire des particules en suspension dans l'air (figure C-3). De telles informations servent à recenser les principales sources de pollution (répartition des sources) et à déterminer leur contribution spécifique à la pollution observée (inventaire). Plusieurs techniques présentent l'avantage d'avoir une capacité multi-élémentaire, d'être non destructives (c.-à-d. que les échantillons peuvent être conservés pour des analyses ultérieures) et d'obtenir rapidement des informations sur une vingtaine d'éléments chimiques utiles au recensement des sources. Parmi ces techniques, l'analyse par faisceaux d'ions, la spectroscopie de fluorescence X (fluorescence X) et l'analyse par activation neutronique sont les plus utilisées.

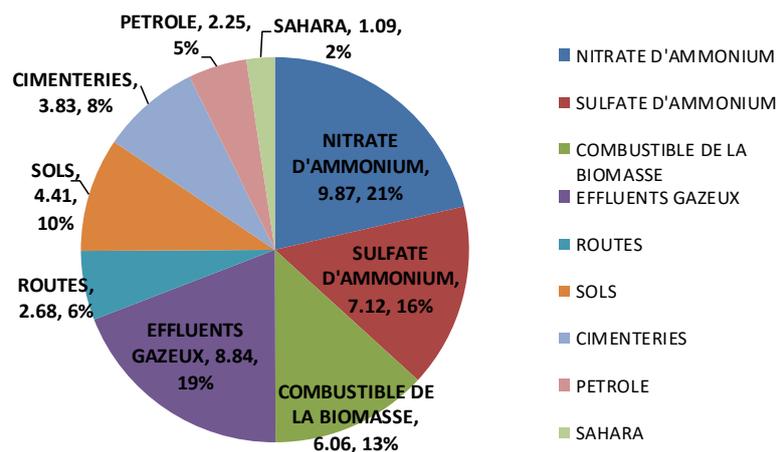


FIG. C-3. Exemple de contribution relative des sources de pollution (inventaire), sur la base de l'analyse élémentaire des échantillons effectuée à l'aide de diverses techniques nucléaires. (Source : AIEA)

<sup>6</sup> Sur la base du projet de recherche coordonné précédent de l'AIEA intitulé *Simulation par accélérateurs et modélisation théorique des effets des rayonnements sur les matériaux de structure*, dont les résultats ont été publiés en 2018.

118. L'intérêt plus marqué pour le sujet et son importance accrue ont aussi été mis en évidence durant le test de compétence organisé par l'Agence avec des échantillons de poussières urbaines introduites dans des filtres à air ; plus de 40 laboratoires d'analyse de 33 États Membres y ont participé et ont présenté leurs résultats dans le cadre de leurs procédures d'assurance et de contrôle de la qualité.

#### **C.1.4. Caractérisation de la contamination superficielle grâce aux mesures effectuées sur place**

119. L'extraction et la préparation du minerai d'uranium est un secteur à forte intensité qui a laissé dans de nombreux pays des anciens sites radiologiquement contaminés soumis à un contrôle réglementaire non conforme aux normes internationales actuelles. L'exploitation d'autres ressources minérales, telles que le pétrole, a également entraîné une forte accumulation de matières radioactives naturelles. D'autres sites ont été contaminés à la suite d'accidents nucléaires et/ou radiologiques et d'essais d'armes nucléaires. À titre d'exemple, les dépôts de résidus représentent à eux seuls plus de 50 sites et le volume de résidus et de stériles dépasse les 800 millions de tonnes rien qu'en Asie centrale. Ces sites pourraient donc exposer des personnes du public à des rayonnements ionisants ayant des effets nocifs sur la santé.

120. Les instruments portatifs de pointe, l'accès libre aux systèmes d'information géographique et la mise au point d'outils de modélisation géostatistique offrent de multiples moyens de réaliser des études in situ pour une série de scénarios et de compartiments environnementaux. Les techniques de mesure in situ ont atteint un niveau élevé d'efficacité analytique et présentent de nombreux avantages par rapport à d'autres techniques plus traditionnelles, notamment la détermination rapide des concentrations de polluants et des niveaux d'activité des polluants, le recensement des zones sensibles, la réduction des coûts des études et la détermination rapide de la répartition spatiale des polluants. La prise de mesures in situ peut aussi améliorer les stratégies d'échantillonnage pour la réalisation d'analyses de laboratoire très précises, si nécessaire.

121. En 2018, l'Agence a notamment organisé dans ce domaine, à la demande des États Membres, une démonstration sur le terrain d'une cartographie radiologique à l'appui de la libération du site du Centre de technologie des rayonnements FOTON en Ouzbékistan après stockage définitif des déchets radioactifs, une démonstration des capacités des systèmes de cartographie radiologique par drone pour des mesures effectuées sur place en cas de situation d'urgence nucléaire au Brésil, et un appui à un cours national sur les mesures radiologiques et les techniques et les méthodes de mesures in situ au Mexique (figure C-4).

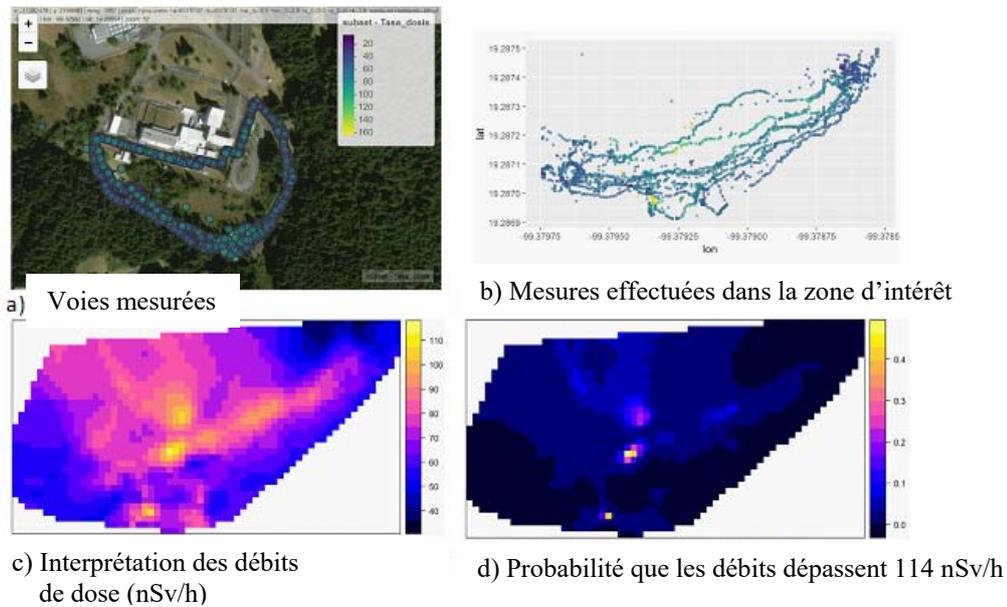


FIG. C-4. Exemple des résultats d'un exercice de mesure sur le terrain mené dans le cadre d'un cours national organisé dans le cadre du projet de CT MEX7011. Les voies mesurées sont représentées dans les cartes, tout comme l'interpolation des débits de dose dans la zone étudiée ainsi que la probabilité que les débits dépassent un niveau donné. (Source : AIEA)

## C.2. Réacteurs de recherche

122. 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.

Tableau C-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde<sup>7</sup>.

Type d'application <sup>a</sup>	Nombre de réacteurs de recherche concernés <sup>b</sup>	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Formation théorique/pratique	163	53
Analyse par activation neutronique	119	53
Production de radio-isotopes	84	44
Neutronographie	72	40
Irradiation de matériaux/de combustible	68	29
Diffusion neutronique	47	31
Géochronologie	25	22
Transmutation (dopage de silicium)	23	20
Transmutation (pierres précieuses)	19	15
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	14	12
Autres <sup>c</sup>	119	36

<sup>7</sup> Données extraites de la base de l'Agence sur les réacteurs de recherche : <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.

- <sup>a</sup> La publication de l'Agence intitulée *Applications of Research Reactors* (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, Vienna, 2014) décrit ces applications de manière plus détaillée.
- <sup>b</sup> Sur les 239 réacteurs de recherche en question (226 en service et 13 provisoirement à l'arrêt), au 31 décembre 2018.
- <sup>c</sup> Étalonnage et essais d'instruments, expériences de blindage, mesures de données nucléaires, visites destinées au public et séminaires.

123. Il ressort de la base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche qu'à ce jour, sur les 841 réacteurs de recherche qui ont été construits dans 67 pays, 252 sont en service dans 55 pays. La Fédération de Russie possède le plus grand nombre de réacteurs de recherche en service (59), suivie des États-Unis d'Amérique (50), de la Chine (17) et du Japon (9). Il y a dans le monde 66 réacteurs de recherche fonctionnant à des puissances de 5 MW ou supérieures et produisant donc des flux de neutrons élevés supportant des produits et services à haute capacité.

124. Les réacteurs de recherche sont indispensables pour fournir des radio-isotopes à la médecine et à l'industrie, des faisceaux de neutrons à la recherche sur les matériaux et aux essais non destructifs, des services d'analyse et d'irradiation aux secteurs public et privé ainsi que des services destinés à l'étude du patrimoine culturel et de l'environnement. L'AIEA encourage les exploitants de réacteurs de recherche à élaborer ou à actualiser des plans stratégiques pour l'utilisation de leurs installations. Au cours des trois dernières années, 38 installations ont soumis des plans stratégiques à l'Agence pour obtenir d'autres conseils sur leur utilisation durable et efficiente.

125. La moitié des réacteurs de recherche en service ont plus de 40 ans d'âge. Si leur cycle de vie peut dépasser 60 ans, il est primordial de mettre rapidement en place des programmes adéquats de gestion du vieillissement, de rénovation et de modernisation. Le financement de ces installations a tendance à tarir et la planification de la relève s'avère limitée ; c'est pourquoi des systèmes de gestion rationnels et des programmes d'exploitation et de gestion de la durée de vie deviendront indispensables pour que les réacteurs de recherche puissent remplir leurs missions de manière rentable. Cela étant, des missions d'examen par des pairs pour l'évaluation de l'exploitation et de la maintenance des réacteurs de recherche ont été menées au Bangladesh, en Ouzbékistan, au Portugal et en République démocratique du Congo. Sur les 56 réacteurs de recherche ayant été définitivement mis à l'arrêt dans 22 États Membres, plusieurs devraient commencer à être déclassés dans un futur proche. En juin 2018, les propriétaires du réacteur à eau bouillante de Halden en Norvège ont mis définitivement à l'arrêt ce dernier, éliminant ainsi une importante installation d'essai pour la recherche sur les combustibles et les matières. En mars, le réacteur NRU (National Research Universal Reactor) du Canada, un important producteur de radio-isotopes médicaux, a lui aussi été définitivement mis à l'arrêt, après 61 ans d'exploitation.

126. Des nouveaux réacteurs de recherche sont en cours de construction en Arabie saoudite, en Argentine, en Fédération de Russie, en France, en Inde, en République de Corée et en Ukraine. Plusieurs États Membres ont des plans officiels de construction, à savoir le Bélarus, la Belgique, la Bolivie, les États-Unis, le Nigeria, les Pays-Bas, le Tadjikistan (achèvement du réacteur Argus-FTI), la Thaïlande, le Viet Nam et la Zambie. D'autres, comme l'Afrique du Sud, l'Azerbaïdjan, le Bangladesh, l'Éthiopie, le Ghana, le Kenya, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Niger, les Philippines, la République-Unie de Tanzanie, le Sénégal, le Soudan et la Tunisie, envisagent de construire de nouvelles installations. L'Agence a mené au Nigeria et au Viet Nam ses deux premières missions d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire pour les réacteurs de recherche (INIR-RR), service visant à fournir une évaluation par des pairs ainsi qu'un appui et des conseils aux États Membres se lançant dans un projet de réacteur de recherche. La Zambie a quant à elle accueilli une mission préparatoire INIR-RR. En septembre 2018, un réacteur de recherche de type piscine de 2 MW, construit à Trombay (Inde) sur le site Nord du Centre de recherche atomique Bhabha, a été mis en service.

127. Les États Membres qui prévoient de renforcer ou de préserver leur capacité nucléaire nationale dans le cadre de leurs programmes en science et technologie, dont l'électronucléaire, continuent de

manifester un intérêt pour l'accès aux réacteurs de recherche. Ainsi, l'Agence a consolidé et développé en 2018 ses instruments et outils : le réacteur-laboratoire par Internet, un outil de formation à distance principalement destiné au milieu universitaire (des séances ont été diffusées en 2018 pour l'Afrique, l'Europe, l'Amérique latine et les Caraïbes) ; les écoles régionales sur les réacteurs de recherche, offrant une formation de base ; l'Initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale (EERRI) proposant des cours pratiques avancés à l'intention surtout des jeunes professionnels ; et le Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche qui a un programme de formation avancé destiné plus particulièrement à des professionnels, jeunes et moins jeunes, actuellement mis en œuvre par six installations en Belgique, aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie et en France.

128. L'Institut national des sciences et techniques nucléaires, en France, a lancé une nouvelle plateforme multimodale en réalité virtuelle augmentée aux fins de l'enseignement et de la formation concernant la physique des réacteurs et leur exploitation.

129. La sûreté, la fiabilité et la rentabilité continues de la gestion et de l'entreposage du combustible nucléaire usé provenant de réacteurs de recherche représentent un défi pour plusieurs États Membres, tout comme l'identification de solutions durables pour la partie terminale du cycle du combustible nucléaire, lesquelles doivent satisfaire aux prescriptions et contraintes en matière de non-prolifération, de politique nationale, d'économie et d'environnement et pouvoir répondre aux problèmes techniques. De nombreux pays possédant un ou plusieurs réacteurs de recherche et ayant un petit programme nucléaire voire aucun sont confrontés au problème du stockage définitif de quantités relativement faibles de combustible nucléaire usé. Ils pourraient être tenus de prendre une décision quant au futur de leurs réacteurs de recherche, compte tenu de la durée limitée des programmes internationaux de reprise du combustible nucléaire usé provenant de réacteurs de recherche. L'AIEA coordonne à cet effet une action collective visant à élaborer des modèles d'appui à la décision pour aider les États Membres à choisir la solution la plus adaptée à leur situation.

130. À ce jour, 99 réacteurs de recherche et quatre installations de production d'isotopes médicaux qui fonctionnaient à l'uranium hautement enrichi (UHE) ont été transformés pour pouvoir fonctionner à l'UFE, ou leur mise à l'arrêt a été confirmée. En novembre 2018, le réacteur source de neutrons miniature (RSNM) au Nigeria a été converti à l'utilisation d'UFE à la place d'UHE et son combustible irradié à l'UHE a été réexpédié en Chine en décembre. Jusqu'à présent, plus de 4 415 kg de combustible à l'UHE neuf et usé ont été retirés ou stockés définitivement dans le cadre du programme de renvoi du combustible à l'UHE aux États-Unis, et environ 2 280 kg dans le cadre du programme de renvoi du combustible d'origine russe.

131. En janvier 2018, Curium, un important fournisseur de solutions en médecine nucléaire, a mené à bien le passage à la fabrication de cibles uniquement à partir d'UFE, grâce à quoi environ 75 % du molybdène 99 vendu dans le monde aujourd'hui est produit sans UHE. Les brèves pannes rencontrées en 2018 par certaines installations d'irradiation et de traitement de cibles de molybdène 99 dans le monde ont entraîné ici et là quelques ruptures d'approvisionnement. Les fluctuations de la production ont en partie été compensées par les efforts déployés par les organismes chargés de la gestion de la chaîne d'approvisionnement et de grands producteurs internationaux, ainsi que par les mesures d'atténuation efficaces prises par les professionnels de la santé. NorthStar Medical Radioisotopes (États-Unis) a commencé à produire du molybdène 99 sans UHE en 2018.

132. En octobre 2018, le Gouvernement fédéral belge a décidé de verser une contribution financière considérable (pour l'exercice 2019-2020) pour la mise au point d'une technologie novatrice faisant appel aux accélérateurs afin de produire du molybdène 99 sans UHE. Il a également décidé, en septembre 2018, de soutenir la mise au point du réacteur de recherche polyvalent et hybride pour des applications de haute technologie (MYRRHA) par un investissement conséquent (pour la

période 2019-2037). MYRRHA est un système à accélérateur qui sera utilisé principalement pour effectuer des recherches sur la transmutation, mettre au point la prochaine génération de radio-isotopes médicaux et étudier des matériaux avancés.

### C.2.1. Nouvelles technologies de modérateurs permettant de produire des neutrons froids

133. Les modérateurs froids produisent des neutrons de très basse énergie au moyen de substances maintenues à une température cryogénique soigneusement choisie. Ces neutrons sont particulièrement utiles aux études sur la science des matériaux. Parmi les projets novateurs visant à produire des faisceaux de neutrons froids figurent la mise au point de modérateurs solides sous forme de pastilles, comme celui utilisé dans le réacteur de recherche pulsé IBR-2 de l'Institut commun de recherche nucléaire (JINR) de Dubna. Les modérateurs froids solides sont généralement faits de méthane, et la radiolyse de ce composé chimique génère de l'hydrogène gazeux qui induit un gonflement susceptible d'endommager la cuve du modérateur. Les petites pastilles produites par l'installation du JINR de Dubna (figure C-5) sont toutefois composées d'hydrocarbures plus résistantes aux rayonnements et sont envoyées de manière ininterrompue dans la cuve du modérateur et facilement retirées à la fin de leur vie utile, ce qui réduit le risque de dommages matériels. Cette méthode innovante est appliquée aussi bien à des sources de neutrons basées sur des réacteurs de recherche qu'à celles alimentées par des accélérateurs. En outre, un projet de recherche coordonné de l'Agence achevé en 2018 a permis de faire plusieurs constatations importantes concernant les modèles innovants, le prototypage et les essais à échelle réelle de ce type de modérateurs avancés.

134. L'autre grande nouveauté a été la mise au point de modérateurs froids liquides, grâce à l'isolation d'un spin nucléaire de l'hydrogène liquide au moyen de catalyseurs (c.-à-d. le parahydrogène). Dans ce type de modèles, les neutrons froids utiles peuvent parcourir des distances relativement longues sans aucune autre interaction, ce qui permet la construction de modérateurs froids de faibles dimensions (en forme de barres ou de galettes), autour desquels les instruments de diffusion neutronique peuvent être placés de manière plus efficace.

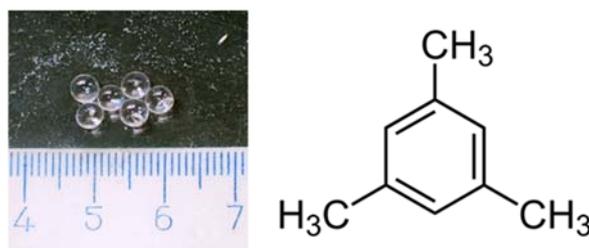


FIG. C-5. Image de pastilles fabriquées au JINR de Dubna et utilisées pour modérer les neutrons rapides (à gauche), et représentation schématique de leur structure moléculaire.  
(Publiée avec l'aimable autorisation du JINR de Dubna)

## D. Technologies des rayonnements

### D.1. Tomographie par rayons cosmiques : une sonde venant des étoiles

135. La radiographie muonique est une toute nouvelle technique qui fait appel aux muons cosmiques du fond de rayonnement naturel. Les muons terrestres des rayons cosmiques naissent lorsque des rayons cosmiques primaires de haute énergie entrent en contact avec l'atmosphère de la Terre, produisant des muons énergétiques. Ils possèdent les mêmes propriétés que les électrons mais ont une masse bien plus importante que ces derniers. Les muons cosmiques émettent à peu près 10 000 fois plus d'énergie qu'un rayon X habituel et libèrent de l'énergie par ionisation essentiellement. Ils peuvent en outre pénétrer des structures très imposantes. Chargés électriquement, ils laissent des traces d'ionisation à mesure qu'ils perdent de l'énergie en traversant la matière. Ainsi, on peut les détecter à l'aide de détecteurs à scintillation et de détecteurs à ionisation et mesurer leurs trajectoires.

136. Le principal avantage de cette technique, qui repose sur la diffusion ou l'absorption muonique, est qu'elle permet de mesurer les variations de densité des matières de numéro atomique élevé au sein d'un volume fermé (même s'il est encastré), de manière intacte, sans recourir à aucune source radioactive. La radiographie muonique nécessite au moins deux matrices de détection permettant de définir les trajectoires des muons cosmiques détectés et on utilise souvent trois ou quatre matrices de détection pour une meilleure résolution et une plus grande efficacité. Les petits objets peuvent être visualisés en reconstruisant les trajectoires des muons avant et après l'entrée en contact. Pour les objets plus grands, une image bidimensionnelle est formée en comparant le flux avec une mesure de contrôle. La radiographie par muons ne se limite pas nécessairement à la constitution d'images bidimensionnelles ; les informations fournies par plusieurs détecteurs analysant le même volume peuvent être combinées pour former une image tridimensionnelle en faisant tourner la cible ou les détecteurs qui l'entourent.

137. Divers domaines d'application sont visés dans le monde entier, notamment la mesure de l'épaisseur du magma d'un volcan à une profondeur d'un kilomètre, ou encore la détection de cavités non découvertes dans une pyramide d'Égypte<sup>8</sup> ainsi que de structures souterraines dans la ville de Naples (Italie)<sup>9</sup>. Les résultats de ces applications indiquent que les muons peuvent servir de nouvel outil d'étude des structures civiles telles que les bâtiments, les ponts et les tunnels. Le nombre de publications sur ce sujet a considérablement augmenté ces dernières années.

#### D.1.1. Applications

138. Les domaines d'application de cette technique d'imagerie, qui continuent de se multiplier, incluent les géosciences, la sûreté et la sécurité nucléaires, le génie civil et l'archéologie. Dans ces domaines, on trouve des applications combinant le blindage, la résolution et les échelles de temps pour lesquelles la tomographie muonique est une méthode d'imagerie appropriée. La figure D-1 illustre diverses applications de cette technique.

---

<sup>8</sup> Morishima, K. et al., Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, *Nature* 552, 386-390 (2017).

<sup>9</sup> Saracino, G. et al., Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), *Scientific Reports* 7:1181 (2017).

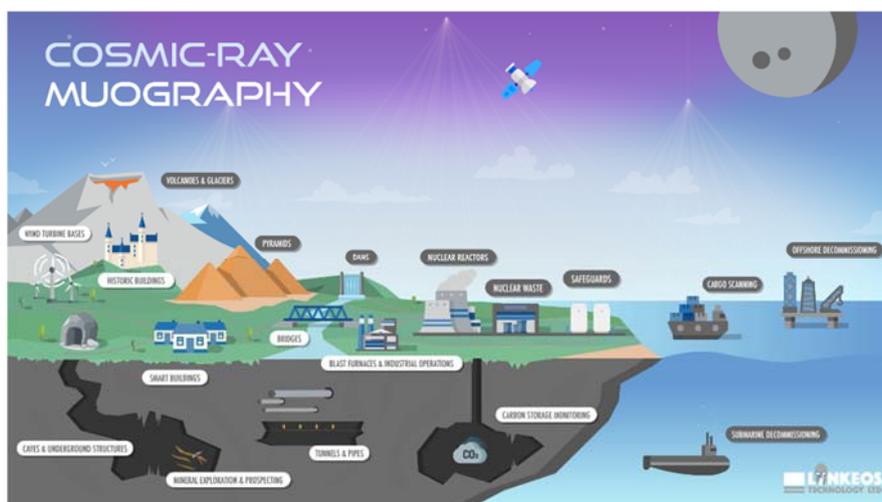


FIG. D-1. Schéma infographique illustrant les diverses applications de la tomographie muonique.  
(Source : Lynkeos Technology Ltd., Royaume-Uni)

139. En géosciences, cette technique est le plus souvent utilisée pour obtenir une image de l'intérieur des volcans. Elle a notamment été employée par des volcanologues en France, en Italie et au Japon<sup>10, 11, 12</sup>. À l'aide de cette technique, il est possible de prévoir des éruptions volcaniques et de permettre ainsi de se préparer ainsi que d'atténuer le plus possible les effets des catastrophes naturelles. La figure D-2 montre la première image en haute définition du volcan Sakurajima (Japon) obtenue par radiographie muonique.

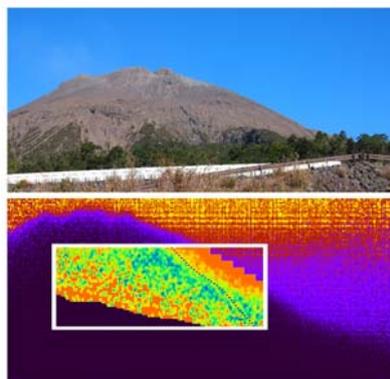


FIG. D-2 Radiographie réussie d'un volcan en éruption. L'image du bas (encadré) montre l'intérieur du volcan (résolution : 10 m x 10 m). (Photo : Oláh et al.<sup>9</sup>, Université de Tokyo, Japon)

140. La mise au point de systèmes de tomographie muonique à des fins industrielles représente aujourd'hui un défi pour la communauté scientifique. Les équipements industriels tels que les hauts fourneaux et les fours rotatifs peuvent être soumis à une usure interne qu'il n'est pas facile de mesurer à l'aide des techniques actuellement disponibles. Ces installations sont cependant suffisamment grandes

<sup>10</sup> D'Alessandro, R., Volcanoes in Italy and the role of muon radiography, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

<sup>11</sup> Oláh, L., Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt. Sakurajima, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

<sup>12</sup> Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Ohminato, T., and Varga, D., High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, Scientific Reports 8 3207 (2018) 1-13.

pour recourir aux techniques d'imagerie par transmission et par diffusion, qui peuvent toutes les deux servir à mesurer l'usure. La tomographie muonique peut donc contribuer à établir un diagnostic, rendant les processus de production des entreprises plus efficaces en termes d'économie d'énergie et de coûts. Elle est également employée en génie civil pour contrôler des bâtiments historiques, des structures imposantes comme des ponts et des turbines éoliennes et, parfois, des structures de plateformes pétrolières. Après le récent effondrement d'un pont à Gênes (Italie), les applications de génie civil pourraient connaître un développement plus rapide.

141. La radiographie par muons offre d'autres applications importantes dans le domaine de la sûreté et de la sécurité nucléaires. Le fait même que les matières et déchets radioactifs soient entreposés dans des conteneurs blindés assurant le confinement des rayonnements signifie qu'on ne peut pas utiliser des rayonnements similaires pour obtenir une image du contenu. La radiographie muonique permet d'établir une distinction entre le combustible nucléaire et d'autres métaux, capacité essentielle pour les applications dans le domaine de la sécurité nucléaire, en particulier le contrôle des chargements à des fins de sécurité nationale<sup>13</sup>, mais aussi pour les applications liées aux garanties, telles que le contrôle des châteaux d'entreposage à sec et la caractérisation des déchets radioactifs à géométrie complexe hérités du passé<sup>14, 15</sup>.

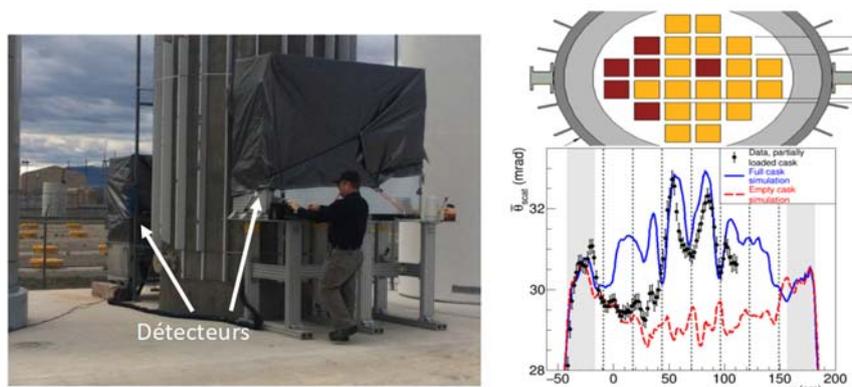


FIG. D-3 Photographie de détecteurs de muons placés sur deux côtés d'un château d'entreposage MC-1 partiellement chargé (à gauche). Schéma montrant l'emplacement des grappes de combustible manquantes (rouge) et chargées (jaune) (en haut à droite). Signal expérimental (noir) comparé aux simulations de Monte Carlo d'un château complètement chargé (bleu) et d'un château vide (rouge) (en bas à droite). (Photo : Christopher Morris, Laboratoire national de Los Alamos, États-Unis)

142. La recherche de matières nucléaires particulières à l'intérieur de conteneurs a peut-être été l'une des premières applications de la tomographie muonique. La visualisation du contenu des conteneurs de déchets nucléaires et l'assurance de la qualité des processus de traitement des déchets nucléaires constituent d'autres applications importantes de cette technique dans le domaine de la sûreté nucléaire<sup>16</sup>. Un démonstrateur a récemment été mis en place sur le site de Sellafield au Royaume-Uni. Enfin, les muons cosmiques peuvent aussi servir à sonder l'intérieur des réacteurs nucléaires mêmes. Au Japon, une équipe de chercheurs s'emploie à obtenir des images du corium dans les réacteurs de Fukushima Daiichi, en s'appuyant sur des simulations qui indiquent que cela devrait être possible<sup>17</sup>.

<sup>13</sup> Durham, J. M., *et al.*, Verification of Spent Nuclear Fuel in Sealed Dry Storage Casks via Measurements of Cosmic-Ray Muon Scattering, *Phys. Rev. Applied* 9 044013 (2018).

<sup>14</sup> Morris, C. L., *et al.*, Application of muon tomography to fuel cask monitoring, *Phil. Trans. R. Soc.*, Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

<sup>15</sup> Yang, G., *et al.*, Novel muon imaging techniques, *Phil. Trans. R. Soc.*, Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

<sup>16</sup> Mahon, D., *et al.*, First-of-a-Kind Muography for Nuclear Waste Characterisation, *Phil. Trans. R. Soc.*, Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

<sup>17</sup> Miyadera, H., *et al.*, Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons, *AIP Advances* 3 052133 (2013).

143. La radiographie par muons trouvera probablement sa place parmi les autres techniques d'imagerie, notamment grâce aux avantages qu'elle présente, à savoir qu'elle ne laisse aucune dose de rayonnement autre que celle du fond naturel de rayonnement et permet de pénétrer des objets épais ainsi que de mesurer la densité des matières et de déterminer leur numéro atomique. Le principal inconvénient de cette technique concerne le temps d'exposition long nécessaire pour de nombreuses applications.

## **E. Santé humaine**

### **E.1. Services d'étalonnage pour les procédures modernes de mammographie par rayons X**

#### **E.1.1. Contexte**

144. La mammographie est une technique d'imagerie du sein qui fait appel à des rayons X à faible dose pour dépister et diagnostiquer le cancer du sein. Elle est utilisée dans le cadre de programmes de dépistage basés sur la population pour détecter le cancer du sein à un stade précoce, exposant ainsi de nombreuses femmes aux rayonnements durant le processus. Il est important que la dose de rayonnement utilisée pour ces examens soit mesurée avec précision afin de réduire les risques le plus possible et de maximiser les avantages. Selon l'Organisation mondiale de la Santé, l'assurance de la qualité est une condition essentielle à l'efficacité des services d'imagerie par mammographie. Grâce à des tests d'assurance de la qualité, la dose et la qualité de rayonnement (spectres de rayonnement) du mammographe peuvent être adaptées de façon à améliorer la qualité d'image, tout en administrant la dose la plus faible possible.

145. Une dosimétrie précise joue un rôle important dans le processus d'optimisation. Le matériel de dosimétrie utilisé pour ces mesures doit être étalonné dans un laboratoire d'étalonnage reconnu. L'étalonnage doit être conforme au Système international d'unités afin que les doses mesurées dans différents établissements soient toutes conformes à un même étalon international et, partant, facilement comparables. Cette responsabilité incombe en principe à un laboratoire secondaire d'étalonnage en dosimétrie (LSED), qui fournit des services d'étalonnage traçables aux hôpitaux.

#### **E.1.2. Qualités de rayonnement**

146. Des tubes à rayons X classiques équipés d'une anode et d'un filtre en molybdène étaient traditionnellement utilisés pour la mammographie sur film avec écran. Cette qualité de rayonnement sert d'étalon pour la dosimétrie clinique et les étalonnages. Les mammographes modernes emploient une plus large gamme de qualités de rayonnement, obtenues grâce à différentes combinaisons anode-filtre et à différents réglages de la tension du tube. Les systèmes de mammographie numérique utilisent souvent des tubes à rayons X constitués d'une anode en tungstène, ce qui permet, sur le plan clinique, d'obtenir une meilleure qualité d'image tout en exposant le patient à une dose de rayonnements plus faible.

147. Les qualités de rayonnement utilisées dans les LSED sont normalisées et actuellement basées sur des combinaisons anode-filtre en molybdène. La difficulté est de couvrir toute la gamme de qualités de rayonnement utilisées dans le cadre clinique en vue d'obtenir des mesures précises dans toutes les situations cliniques. On utilise des tubes à rayons X équipés d'une anode en molybdène pour l'étalonnage des mammographes uniquement, et une anode en tungstène pour les autres systèmes d'imagerie par les rayons X en radiologie diagnostique et les services d'étalonnage connexes, ce qui

peut constituer une contrainte économique pour les LSED qui doivent se doter d'un système à rayons X équipé d'une anode en molybdène rien que pour l'étalonnage des mammographes.

### **E.1.3. Dosimètres**

148. Des chambres d'ionisation sont habituellement utilisées pour la dosimétrie médicale. La réponse de ces chambres d'ionisation n'est généralement pas fortement dépendante de l'énergie du faisceau incident. Elles peuvent donc être utilisées aux fins de la dosimétrie d'une vaste gamme de qualités de faisceaux de rayonnement (énergies). La couche de demi-atténuation (CDA) est la valeur utilisée pour déterminer la qualité du faisceau de rayonnement. Les coefficients d'étalonnage des chambres d'ionisation peuvent donc être déterminés pour certaines qualités de rayonnement, et les coefficients pour les autres énergies peuvent être calculés par interpolation entre les différentes valeurs de la CDA. Ainsi, il est possible de procéder à une dosimétrie précise de toute la gamme de qualités de rayonnement utilisées en mammographie qui sont disponibles dans les hôpitaux.

149. Les dosimètres à semi-conducteurs sont de plus en plus utilisés en milieu clinique et remplacent progressivement les chambres d'ionisation ; plus compacts, ils sont faciles à manipuler et peuvent servir à mesurer plusieurs autres valeurs (p. ex. CDA, tension du tube) en une seule exposition. Leur réponse est toutefois plus fortement dépendante de l'énergie du faisceau que celle des chambres d'ionisation. Par conséquent, de multiples méthodes de compensation interne basées sur la qualité de rayonnement sont élaborées par les fabricants en vue de corriger cet effet. Nombre d'utilisateurs ne comprennent cependant pas pleinement comment apporter ces corrections, ce qui complique davantage la dosimétrie et l'étalonnage des dosimètres utilisés en mammographie.

### **E.1.4. Étalonnages**

150. Le matériel de dosimétrie devrait être régulièrement étalonné dans des LSED. Au cours d'une procédure d'étalonnage, la réponse d'un dosimètre est comparée aux étalons nationaux de référence et un coefficient d'étalonnage pour le dosimètre est déterminé. En règle générale, les LSED ne peuvent pas effectuer les étalonnages pour toutes les qualités de faisceaux possibles qui sont utilisées en milieu clinique.

151. S'agissant de l'étalonnage des chambres d'ionisation, la variation de la qualité de rayonnement ne pose pas de problème, car leur réponse est faiblement dépendante de l'énergie du faisceau. Ceci n'est toutefois pas le cas des dosimètres à semi-conducteurs, qui présentent une plus forte dépendance énergétique.

### **E.1.5. Autres avancées**

152. Le laboratoire de dosimétrie de l'AIEA fournit aux membres du réseau AIEA/OMS de LSED l'accès à toute la gamme de qualités de rayonnement pouvant être requises pour la dosimétrie en mammographie. Plusieurs types de dosimètres ont été étalonnés dans ce laboratoire. Sur la base des résultats (figure E-1) obtenus au laboratoire de dosimétrie de l'AIEA, il a été constaté que certains nouveaux dosimètres à semi-conducteurs compensaient très bien les variations de qualité des rayonnements (en corrigeant la valeur affichée). Ils peuvent donc être utilisés aux fins de la mesure de la dose pour la vaste gamme de qualités de rayonnement utilisées en milieu clinique.

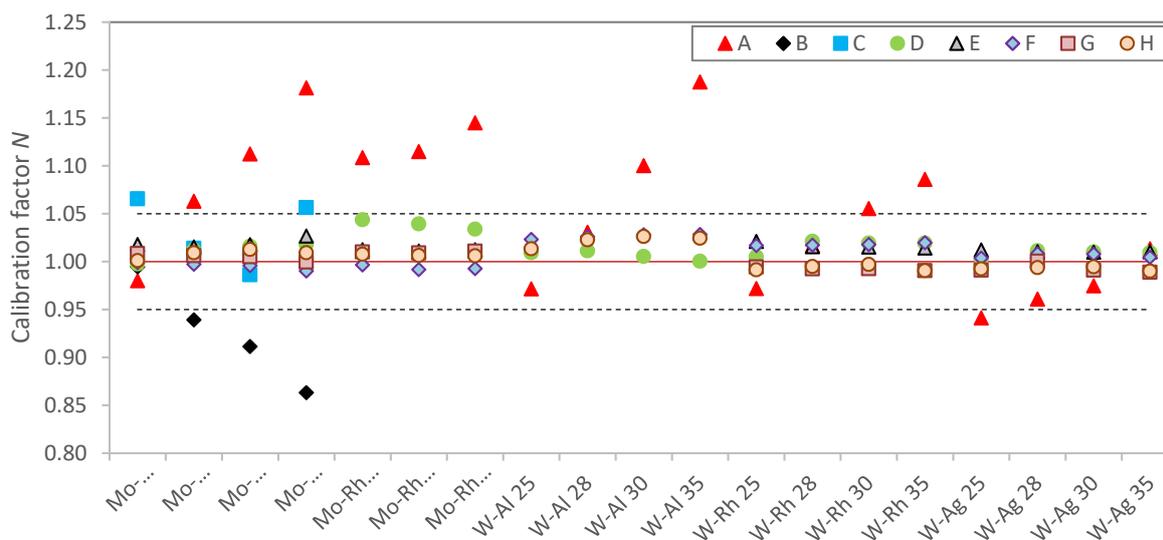


FIG. E-1. Facteur d'étalonnage  $N$  (mGy/mGy) mesuré au laboratoire de dosimétrie de l'AIEA pour huit dosimètres à semi-conducteurs (A–H) en fonction de la qualité de rayonnement.

153. Toutefois, les LSED dans les États Membres ne disposent pas nécessairement de toutes les qualités de rayonnement disponibles pour l'étalonnage des dosimètres employés en mammographie. Les fabricants de semi-conducteurs sont donc encouragés à mettre au point une méthode normalisée, qui pourrait être utilisée pour l'étalonnage de leurs dosimètres dans des conditions normalisées.

154. L'emploi de machines équipées d'une anode/d'un filtre en molybdène pour la production d'une série standard de qualités de rayonnement aux fins de l'étalonnage des dosimètres employés en mammographie ne reflète pas la tendance actuelle en milieu clinique. Il convient donc d'élaborer de nouvelles qualités de rayonnement standard avec une anode en tungstène. Les dosimètres à semi-conducteurs devraient comporter un mode d'étalonnage dans lequel ces qualités de rayonnement standard pourraient être utilisées de manière à ce que l'efficacité du dosimètre pour toutes les qualités de rayonnement cliniques puisse être vérifiée et confirmée. Un tel mode permettrait d'éviter des erreurs de dosimétrie et contribuerait à la qualité du diagnostic ou du dépistage du cancer du sein dans le monde.

## E.2. Chirurgie radioguidée appliquée aux cancers gynécologiques

### E.2.1. Contexte

155. Le cancer est une des principales causes de mortalité dans le monde. Pour les tumeurs malignes de la vulve, du corps ou du col de l'utérus, la chirurgie radioguidée est associée à une diminution de la morbidité à court et à long termes par rapport à l'ablation d'un nœud lymphoïde.

156. Le ganglion lymphatique sentinelle (GLS) est le premier nœud lymphoïde régional qui draine directement la lympho de la tumeur primaire. Par conséquent, les GLS sont les premiers nœuds recevant des cellules métastatiques essaimées par voie lymphatique. La localisation et la biopsie des GLS sont devenues des techniques de chirurgie courantes (cancer du sein et mélanome), qui permettent de limiter l'intervention chirurgicale.

157. La détection de GLS fournit des informations pronostiques sur le statut ganglionnaire et peut contribuer à éviter la morbidité due à un surtraitement. En outre, comme il n'existe aucune technique d'imagerie qui permette de détecter des métastases microscopiques, la biopsie des GLS est considérée comme la seule méthode fiable d'examen des ganglions lymphatiques et de détection de micro-métastases dans les nœuds lymphoïdes régionaux.

### **E.2.2. Cancer du col de l'utérus**

158. Le cancer du col de l'utérus est le troisième cancer gynécologique le plus fréquent dans les pays avancés, mais il est le plus répandu dans les pays en développement et constitue la première cause de mortalité chez les femmes en âge de procréer. En règle générale, il se propage localement aux organes pelviens voisins, mais peut aussi se répandre dans les nœuds lymphatiques loco-régionaux ; dans de rares cas, des métastases hémotogènes ont été observées dans les poumons, le foie, les os et le cerveau. L'utilité de la détection des GLS pour le cancer du col de l'utérus a été étudiée auprès d'un grand nombre de femmes (507) ainsi que dans le cadre d'examen de 831 patients. Un taux de détection de 93,5 % et de 96 %, une valeur prédictive négative élevée (94 % et 97 %) et un taux de faux négatifs de 8 % ont été obtenus en combinant les deux techniques disponibles. Le taux de détection et la valeur prédictive négative plus élevés pour les tumeurs de taille inférieure à 2 cm (94 % contre 84 % et 99 % contre 89 %) représentent des résultats importants.

### **E.2.3. Cancer du corps de l'utérus**

159. Le cancer du corps de l'utérus (ou cancer de l'endomètre) est la tumeur maligne la plus fréquente de l'appareil génital féminin dans les pays avancés. Une atteinte des ganglions pelviens ou lombo-aortiques est associée à un pronostic plus défavorable, avec un taux de survie à cinq ans de 44 à 52 %. La norme de soin pour les patientes atteintes de cancers endométrioïdes à haut risque (G3, invasion du myomètre >50 %) ou pour celles présentant des types histologiques à haut risque (carcinomes à cellules claires, carcinomes séropapillaires, carcinosarcomes) est la stadification chirurgicale, avec réalisation d'une lymphadénectomie pelvienne et lombo-aortique. En ce qui concerne le cancer de l'endomètre à faible risque, l'incidence d'invasion ganglionnaire est très faible et il n'existe toujours pas de consensus clair quant à sa prise en charge. Chez certaines patientes, un bas grade histologique peut être modifié et augmenté après un examen pathologique de la totalité de l'échantillon tumoral. Dans ces cas, une stadification chirurgicale initiale aurait été utile.

160. Le diagnostic d'invasion ganglionnaire peut conduire à une modification de la prise en charge et au recours à un traitement adjuvant. Par ailleurs, il est important de souligner que la majorité des patientes atteintes d'un cancer de l'endomètres de l'utérus présentent un risque chirurgical élevé en raison d'une obésité et de facteurs de comorbidité connexes. Dans ce contexte, le concept de GLS peut réduire considérablement la morbidité postopératoire si l'on évite de pratiquer une lymphadénectomie systématique, même chez les patientes à haut risque tumoral. La détection des GLS permet non seulement de réaliser une stadification chirurgicale sans accroître le nombre de complications pouvant découler d'une lymphadénectomie complète, mais augmente aussi la sensibilité de la stadification, grâce à des examens immuno-chimiques de certains nœuds lymphoïdes. Bien que plusieurs études aient été menées sur la détection des GLS pour le cancer du corps de l'utérus, il n'y a pas encore suffisamment de preuves scientifiques pour valider cette méthode.

### **E.2.4. Cancer des ovaires**

161. L'incidence des nœuds lymphatiques positifs chez les femmes ayant un cancer des ovaires de stade précoce est faible (5,1 % à 15 %). Une lymphadénectomie pelvienne et lombo-aortique nécessite une intervention chirurgicale plus longue et donne lieu à une hausse de la morbidité. La détection des GLS devrait être envisagée pour ce type de cancer.

### **E.2.5. Tendances futures**

162. L'avancée la plus importante dans le domaine des cancers gynécologiques est la mise au point d'instruments peropératoires, tels que la caméra gamma portable. Cet appareil permet d'obtenir une image peropératoire en vue de localiser les GLS avant leur résection. Une fois les GLS enlevées, une

autre image du champ opératoire peut confirmer la réussite de la résection en indiquant une absence d'activité. Cette procédure prend entre 5 (cancer de la vulve et du col de l'utérus) et 15 minutes (cancer du corps de l'utérus), soit une intervention de durée relativement courte durant une procédure chirurgicale complète.

163. Le comportement hypermétabolique des cancers gynécologiques rend possible le diagnostic et la localisation par tomographie à émission de positons (PET) des masses récurrentes. Les maladies récurrentes, facilement diagnostiquées par PET/tomodensitométrie, peuvent se propager massivement le long de la cavité abdominale, ce qui nécessite un traitement par chimiothérapie, ou alors se présenter sous la forme d'un petit foyer tumoral isolé. Dans ces cas particuliers, l'utilisation d'une sonde portative peropératoire de PET permet de guider une chirurgie, de détecter la masse tumorale et de la distinguer du tissu normal ou cicatriciel. La chirurgie guidée par PET est particulièrement utile pour détecter des lésions non palpables ou des lésions recouvertes de tissu fibreux. La principale difficulté technique est l'absorption physiologique élevée dans les tissus environnants (foie, rate, reins, vessie, etc.). En raison de cette forte activité physiologique et de la faible résolution spatiale de certains appareils, cette méthode ne peut pas servir de guide pour l'analyse des marges chirurgicales. L'un des avantages de ce type d'opération est la baisse de la morbidité chirurgicale, grâce à la localisation directe de la lésion au moyen de la sonde et à la réduction de la taille de l'incision. Il est recommandé d'obtenir une image par PET préalablement à l'intervention chirurgicale, afin de localiser les foyers tumoraux et de planifier la résection.

164. En dépit des avantages qu'elle peut présenter, la chirurgie guidée par PET n'est pas encore largement pratiquée. Les principaux problèmes sont les suivants : a) la localisation non spécifique, la sonde pouvant détecter les tissus tumoraux et inflammatoires ; b) les difficultés techniques, décrites ci-dessus, liées à la forte activité physiologique dans la cavité abdominale (ratio minimum recommandé : 1.5:1) et à la taille des sondes, qui ne permet pas les interventions chirurgicales par laparoscopie ; c) l'exposition du personnel aux rayonnements, bien que selon certaines études, le nombre maximum d'heures par an est de 260 heures pour ce type de chirurgie ; et d) des raisons financières.

165. Un nouveau traceur a récemment été testé dans des tumeurs malignes gynécologiques (notamment le cancer du col de l'utérus) ; le nouveau matériel employé pour visualiser ce traceur est équipé d'une caméra multispectrale à fluorescence qui permet la visualisation peropératoire du traceur. Un traceur fluorescent (vert d'indocyanine) est injecté au début de l'opération et observé au cours de l'intervention chirurgicale pelvienne.

## **F. Alimentation et agriculture**

### **F.1. Irradiation dans les domaines alimentaire et phytosanitaire : de nouvelles avancées annoncent un changement de paradigme**

166. Les entreprises du secteur alimentaire rêvent depuis longtemps de pouvoir procéder elles-mêmes à l'irradiation des aliments dans le cadre de leurs activités normales. Pour l'heure, ce traitement est souvent externalisé à des sous-traitants spécialisés qui exploitent de grandes installations, mais la mise au point d'irradiateurs, de systèmes de dosimétrie et d'applications de types nouveaux prépare le terrain pour faire place à une nouvelle approche. La technologie permet de concevoir des générateurs de faisceaux d'électrons et de rayons X plus petits et les récentes avancées enregistrées dans le domaine des irradiateurs à sources pourraient faciliter l'installation de ce type d'appareils sur des chaînes de conditionnement d'aliments ou dans des usines de fabrication de produits alimentaires.

167. L'irradiation des denrées alimentaires consiste à exposer des aliments à un faisceau de rayonnements ionisants. Ce faisceau peut passer à travers l'emballage et les aliments, tout comme les rayons X passent à travers le corps humain lors d'une radio, mais contrairement aux rayons X utilisés en médecine, le but est le dépôt d'énergie afin d'induire des modifications, sans que cela engendre d'augmentation trop importante de la température. Il est ainsi possible de traiter des aliments solides, pré-emballés, voire congelés, au prix d'incidences négatives minimales, sans avoir à sortir les produits de leur emballage. Néanmoins, ce procédé étant long et coûteux, les producteurs doivent avoir de bonnes raisons d'irradier les aliments. Ils n'ont recours à ce type de traitement que quand les modifications induites améliorent ou préservent la qualité des produits. On fait par exemple appel à l'irradiation des aliments pour éliminer les bactéries susceptibles de provoquer des intoxications alimentaires, réduire le nombre d'organismes saprophytes et ainsi faire en sorte que les aliments restent frais plus longtemps, empêcher la germination sans recourir à des produits chimiques (p. ex. pour le gingembre, les ignames, l'ail, les oignons et les pommes de terre) ou soumettre les aliments à un traitement phytosanitaire en vue de prévenir la propagation d'organismes envahissants (mouches, insectes, charançons, acariens et éventuellement limaces, escargots, voire graines indésirables). Cette dernière application revêt une importance particulière pour l'envoi des fruits et légumes frais, dans lesquels peuvent se nicher des nuisibles et qui, à la faveur des échanges internationaux, colonisent de nouveaux milieux et nuisent aux environnements et à l'agriculture locaux. Contrairement aux produits chimiques de fumigation, dont l'utilisation est de plus en plus restreinte pour des raisons sanitaires ou environnementales, l'irradiation ne laisse aucun résidu chimique nocif et n'a que peu d'effets négatifs sur la qualité des aliments.

168. L'irradiation des aliments nécessite de puissantes sources de rayonnements ionisants, qu'il convient de gérer comme il se doit. La plupart des aliments sont traités au moyen de rayons gamma émis par une source de cobalt 60. Ces rayons gamma ont des énergies comprises entre 1,17 et 1,33 MeV et une masse nulle, ce qui leur permet de passer à travers d'importants volumes de produits en vrac (il est par exemple possible d'irradier en une seule exposition des palettes chargées de sacs d'épices). La source de rayonnement diminue d'environ un pour cent par mois (la demi-vie du cobalt-60 est d'approximativement cinq ans), la durée d'exposition doit être légèrement augmentée chaque mois pour que le niveau d'énergie (dose de rayonnements) soit maintenu. Au bout d'un moment, la source doit être remplacée.

169. On irradie certains aliments à l'aide d'un faisceau d'électrons. L'énergie de ce faisceau peut aller jusqu'à 10 MeV ; chacun des électrons est caractérisé par une charge électrique négative et une masse faible, bien qu'appréciable. De ce fait, les faisceaux d'électrons peuvent être allumés quand cela est nécessaire, puis dirigés et focalisés à l'aide de champs magnétiques. Par ailleurs, cela facilite les collisions et interactions avec les atomes des aliments, ce qui permet un transfert rapide d'énergie à des taux élevés et sur une distance relativement courte. Les faisceaux d'électrons ne pénètrent donc qu'à une faible profondeur dans les aliments et peuvent être utilisés pour irradier des aliments emballés sur une épaisseur de plusieurs centimètres.

170. Les aliments à être traités au moyen de l'irradiation par rayons X sont bien moins nombreux. Dans ce procédé, on bombarde une cible de métal avec un faisceau d'électrons afin de convertir l'énergie cinétique des électrons et d'obtenir des rayons X dont l'énergie peut aller généralement jusqu'à 5 MeV, voire 7,5 MeV dans certains pays. Ayant également une masse nulle, les rayons X sont aussi pénétrants que les rayons gamma et permettent donc aussi d'irradier en une seule exposition des palettes entières d'aliments. Néanmoins, ce procédé donne lieu à une importante perte d'énergie, celle-ci s'évacuant sous forme de chaleur lors de la conversion du faisceau d'électrons dans la cible métallique, ce qui fait que seul un faible pourcentage de l'énergie est transformé en rayons X.

171. Les faisceaux d'électrons et les rayons X étant produits par des appareils, il est possible d'obtenir des rayonnements de caractéristiques et d'énergies différentes en modifiant les paramètres des irradiateurs ou la conception. Contrairement au cobalt 60, les sources utilisées pour ces traitements

peuvent être désactivées quand elles ne sont pas utilisées. Par ailleurs, on sait par expérience que ces appareils peuvent être aisément adaptés à mesure que les technologies évoluent.

172. Que l'irradiation soit réalisée à l'aide de radionucléides ou d'irradiateurs à sources, le modèle économique actuel fait généralement entrer en ligne de compte un prestataire de services indépendant qui loue à d'autres ses services d'irradiation. Les installations d'irradiation commerciales sont souvent implantées sur des grands axes commerciaux ou dans d'importants centres de transport, tels que des terminaux de fret desservant ports et aéroports. Les installations elles-mêmes sont pour l'essentiel de grands entrepôts au centre desquels est installé un irradiateur. Depuis le secteur non irradié de l'entrepôt (la zone de réception des marchandises), les aliments entrent dans la chambre d'irradiation où ils sont exposés au faisceau de rayonnements pendant une durée suffisante pour recevoir une dose de rayonnement minimale définie. Après quoi, ils sortent de la chambre pour arriver dans le secteur irradié de l'entrepôt (la zone d'expédition des marchandises). Ils y restent jusqu'à ce qu'il soit certifié qu'ils ont reçu le traitement adéquat, ce qui implique de vérifier la durée d'exposition enregistrée et de consulter les indications de confirmation sur les dosimètres qui ont accompagné les produits tout au long du processus. Une fois cette certification obtenue, les aliments sont expédiés vers les destinations indiquées par le propriétaire.

173. Il est probable qu'on continue de suivre cette procédure établie à l'avenir, mais les nouvelles technologies permettent d'ores et déjà de miniaturiser les irradiateurs et, bien que ces appareils de taille réduite ne soient dotés pour l'instant que de sources de faisceaux de faible énergie, ils sont déjà utilisés dans l'industrie pour stériliser des matériaux d'emballage, du matériel médical et des échantillons biologiques en usine, dans le cadre des procédures de fabrication ordinaires. Il est possible que les petits générateurs de faisceaux d'électrons et de rayons X soient amenés à devenir plus puissants avec le temps et se prêtent donc mieux à l'irradiation des aliments. De telles avancées augurent d'un avenir dans lequel les aliments seront irradiés sur les chaînes de conditionnement, pendant la fabrication ou dès leur récolte dans les exploitations agricoles. Il est temps de poser des bases techniques solides à l'appui de l'irradiation par faisceaux d'électrons et par rayons X dans la perspective de ce changement de paradigme, afin d'ouvrir à terme de nouveaux débouchés commerciaux pour l'irradiation dans les domaines alimentaire et phytosanitaire. L'Agence, en collaboration avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, a pour but d'accélérer la recherche et le développement en vue de favoriser la mise au point de techniques basées sur les faisceaux d'électrons et les rayons X pouvant être mises en pratique, de manière à libérer le potentiel futur de ces techniques pour des traitements nouveaux et améliorés des aliments par irradiation.

174. Des activités de recherche sont actuellement menées aux États-Unis en vue de construire un irradiateur à rayons X portable de faible énergie (160 keV)<sup>18</sup> pouvant générer des rayonnements ionisants destinés à la désinfection des fruits conditionnés en caisses dans le cadre des régimes de quarantaine. En République de Corée, des recherches ont été entreprises pour évaluer les effets des rayons X de faible énergie sur les caractéristiques microbiologiques, physico-chimiques et organoleptiques (couleur, goût, odeur et texture) des aliments. Ce concept repose sur de petits irradiateurs à rayons X destinés à une utilisation en milieu hospitalier, où ils garantiront la sécurité sanitaire de l'alimentation des patients à risque (p. ex. les patients immunodéficients). Des recherches menées en collaboration par le Japon et la Pologne sont en passe de déboucher sur une nouvelle méthode d'irradiation des produits alimentaires et agricoles basée sur la pénétration limitée des électrons dont l'énergie est inférieure à 300 keV. Cette nouvelle application doit permettre l'élimination des bactéries, moisissures et levures de la surface des produits alimentaires. Le traitement a été comparé par rapport à la méthode conventionnelle d'irradiation par faisceaux d'électrons (10 MeV) dans le cadre

---

<sup>18</sup> Follett, P., Kirk, R., A portable cabinet X-ray machine to control insects in exported fruit  
[https://www.cherrygrowers.org.au/assets/PASE\\_Portable\\_X-ray\\_Machine.pdf](https://www.cherrygrowers.org.au/assets/PASE_Portable_X-ray_Machine.pdf)

d'expériences sur des grains de poivre noir et de poivre blanc ainsi que sur des piments de Jamaïque entiers. Le traitement de surface s'est révélé aussi efficace que l'irradiation conventionnelle pour ce qui est de la réduction et de l'élimination des microbes<sup>19</sup>.

175. Des outils d'assistance à l'irradiation à sources sont également en cours d'élaboration. La Chine a mis au point un essai de validation pour un scanner à rayons X devant permettre l'analyse de produits en boîtes avant un radiotraitement. Cette analyse vise à déterminer si l'emballage des aliments est conforme aux spécifications définies pour une irradiation adéquate par faisceaux d'électrons<sup>20</sup>. Un concept analogue est en cours d'élaboration au Viet Nam, mais cette fois ce sont des rayons gamma émis par de petites sources collimatées de cobalt 60 qui sont utilisés pour scanner les produits en boîtes dans le cadre de tests préalables à une irradiation par faisceaux d'électrons. Les deux appareils ont été mis à l'essai dans des installations commerciales de faisceaux d'électrons et il a été établi qu'ils permettaient de mesurer rapidement la masse surfacique (un paramètre essentiel dans l'irradiation par faisceaux d'électrons) et, grâce à différents algorithmes, de prédire avec précision la distribution des doses résultant de l'irradiation par faisceaux d'électrons. L'efficacité de l'irradiation par faisceaux d'électrons peut être rapidement évaluée et une simulation permet de calculer la configuration optimale pour les produits préalablement à leur traitement. Dans le cadre de ses dernières recherches, la Chine teste un système de simulation 3D de la distribution des doses qui pourrait révolutionner la dosimétrie dans le cadre du traitement par irradiation.

176. En 2015, le groupe d'ingénierie alimentaire Bühler a noué un partenariat stratégique avec COMET, un fabricant de petites lampes de faisceaux d'électrons. Ils ont créé ensemble un appareil de décontamination microbienne des aliments séchés utilisant des faisceaux d'électrons de faible énergie<sup>21</sup>. Plusieurs de ces nouveaux appareils sont en cours d'évaluation chez différents industriels de la transformation des épices. Mevex, un fournisseur d'installations de faisceaux d'électrons et de rayons X, a mis au point le « Mevex X-ray Box », un irradiateur à rayons X compact auto-blindé destiné à la recherche ou au traitement commercial à petite échelle de produits de grande valeur, y compris de produits alimentaires et agricoles. L'irradiateur avec son blindage occupe une surface au sol d'environ deux mètres carrés et génère des rayons dont les énergies peuvent aller jusqu'à 2 MeV. Il a été conçu pour générer des doses à haut débit permettant d'irradier des produits d'une hauteur pouvant aller jusqu'à 40 cm, sur une plaque rotative de 40 cm de diamètre. NucTech, un fournisseur de grandes installations de faisceaux d'électrons et de rayons X basé en Chine, poursuit le développement d'un nouvel appareil de mesure de la masse surfacique pouvant être commercialisé. Cet appareil destiné aux installations de faisceaux d'électrons doit permettre l'examen et la validation des produits et si possible la cartographie des doses reçues par les produits avant irradiation, tout en économisant du temps et de l'argent et en améliorant la productivité.

## **F.2. Les technologies nucléaires au service de l'adaptation rapide des cultures et des systèmes de culture face au changement climatique**

177. La sécheresse, les températures extrêmes, les inondations, les carences en éléments nutritifs dans le sol et la toxicité minérale ont des incidences directes sur le rendement des cultures du fait de leurs effets sur la répartition et la croissance des plantes, mais aussi des incidences indirectes par l'influence qu'elles exercent sur la nature et l'intensité de stress biotiques tels que les maladies, les insectes et les

---

<sup>19</sup> Gryczka, U., Migdał, W., Bułka, S., The effectiveness of the microbiological radiation decontamination process of agricultural products with the use of low energy electron beam, *Radiation Physics and Chemistry* 143 (2018) 59-62.

<sup>20</sup> Qin, H., et al., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, *Radiation Physics and Chemistry* 143 (2018), 8-13.

<sup>21</sup> Hertwig, C., Meneses, N., Mathys, A., Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review, *Trends in Food Science & Technology* 77 (2018) 131-142.

mauvaises herbes. Si l'on ne prend pas de mesures d'adaptation appropriées pour préserver la production agricole, le changement climatique réduira le rendement des cultures, accroissant l'insécurité alimentaire et provoquant l'effondrement des systèmes alimentaires, en particulier dans les pays en développement. Il risque également d'entraîner des changements dans la répartition géographique des espèces cultivées.

178. Face aux pertes de récoltes catastrophiques que provoque le changement climatique, il est indispensable de trouver des méthodes de sélection innovantes, qui soient à même de garantir la sécurité alimentaire dans le monde. À l'ère de la post-génomique, l'association des techniques de sélection par mutation, de sélection assistée par marqueurs et de phénotypage à haut débit de diverses plantes constitue un puissant facteur d'adaptation rapide des végétaux au changement climatique. La sélection végétale s'emploie ordinairement à améliorer le rendement des cultures face aux stress abiotiques et biotiques auxquels la production végétale est confrontée à chaque saison de végétation.

### **F.2.1. La sélection par mutation à l'aide de marqueurs pour une mise au point plus rapide de variétés intelligentes face au climat**

179. La sélection des plantes par mutation reste la méthode la plus rapide pour créer de nouvelles variations génétiques aux fins de l'adaptation rapide au changement climatique. Pour accélérer cette adaptation, il est essentiel d'associer la sélection par mutation à un génotypage haut débit de nouvelle génération économique ainsi qu'à un phénotypage haut débit de précision. Ce procédé aide les scientifiques à déterminer la base moléculaire des variations génétiques créées grâce à la sélection par mutation, ce qui permet d'élaborer et d'utiliser des marqueurs moléculaires qui accélèrent la sélection et la mise au point de variétés. Ainsi, grâce aux technologies de marqueurs moléculaires basées sur les études d'association pangénomique et à une identification, une validation et une utilisation mieux ciblées des associations génétiques entre un allèle, une famille multigénique ou une voie génétique spécifique et des performances phénotypiques, la sélection a gagné en rapidité.

180. L'Agence, en collaboration avec la FAO, a aujourd'hui mis en place l'organisation des tâches permettant l'identification rationnelle sur le plan des coûts des mutations induites débouchant sur des phénotypes spécifiques, et elle a commencé à transférer ce système aux États Membres dans le cadre de bourses de formation. Des protocoles de biologie moléculaire ont été élaborés et les ressources informatiques nécessaires à l'analyse des données sont actuellement mises en place. Ce système facilite les approches de la cartographie génétique appuyées par le séquençage de nouvelle génération. L'une des grandes avancées enregistrées en 2018 a été la réalisation, pour la première fois dans les laboratoires de l'Agence, d'une analyse de marqueurs moléculaires, qui a porté sur le caractère qualitatif d'une orge de qualité fourragère (le lemme orange). Les mutations étiologiques de ce caractère ont été identifiées et une méthode d'analyse des marqueurs a été mise au point. L'analyse de génotypage est actuellement testée dans le cadre d'un programme de sélection d'orge portant sur l'introgression du caractère du lemme orange dans une variété d'orge d'hiver fourragère à capuchon. L'analyse permet de prédire correctement le phénotype et s'avère donc utile pour la sélection à l'aide de marqueurs. En outre, une étude pilote portant sur le sorgho à maturité précoce et à tige courte a été lancée, avec pour objectif de cartographier par séquençage de génomes complets les caractères de plusieurs centaines d'individus de populations de sorgho sujets à la ségrégation, puis l'analyse des génotypes contrastés en vue de l'identification des loci génétiques responsables (figures F-1, F-2).

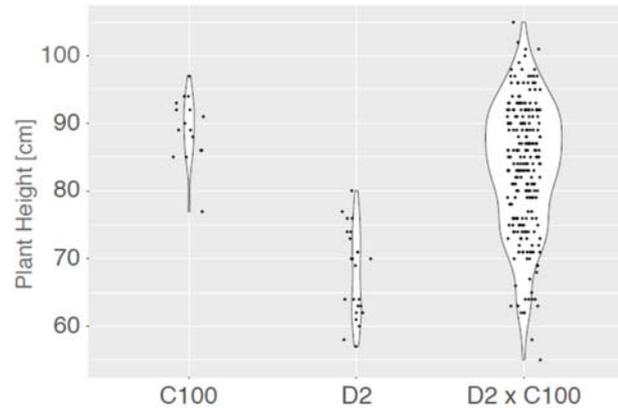


FIG. F-1. Plantes cultivées en champ à Seibersdorf (Autriche) (été 2018) ; le nanisme mutant se sépare selon la loi de ségrégation de Mendel. L'image à droite montre les hauteurs respectives des plantes sauvages, des mutants et des produits de filiation F2.

181. Bien que l'association de la sélection par mutation et de la technologie des marqueurs moléculaires constitue l'objectif à atteindre pour accélérer l'adaptation des cultures au changement climatique, la sélection par mutation continue d'être utilisée seule aux fins de la mise au point de variétés adaptées à des conditions climatiques défavorables. Grâce au transfert de la technologie de sélection par mutation, le Pakistan a récemment pu mettre sur le marché trois variétés mutantes de coton adaptées au stress des hautes températures et offrant un rendement en fibres et une qualité durables. Ces variétés mutantes occupent désormais environ 20 % de la superficie des cultures de coton au Pakistan et cette proportion devrait atteindre 30 à 40 % au cours des deux à trois prochaines années. De même, les agriculteurs zambiens et zimbabwéens ont récemment enregistré une augmentation de 10 à 20 % des rendements du niébé grâce à des variétés issues de la sélection par mutation, lesquelles bénéficient d'une meilleure tolérance à la sécheresse et d'une résistance accrue aux insectes.

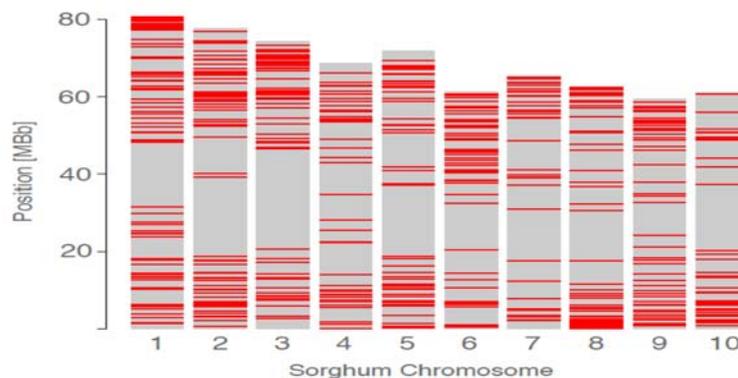


FIG. F-2. Répartition des polymorphismes mononucléotidiques et des petits indels dans les chromosomes du sorgho identifiés grâce au séquençage de génomes complets de six lignées mutantes.

### F.2.2. La tomodensitométrie au service du phénotypage haut débit non invasif des plantes

182. Le manque d'installations prenant en charge la présélection haut débit non invasive de plants entiers ou de tissus végétaux constitue actuellement un obstacle important à l'amélioration des cultures, en particulier au stade de la sélection des variétés les plus performantes. L'imagerie par résonance magnétique nucléaire est une technique de plus en plus populaire pour comprendre les fonctions

vasculaires des plantes, notamment celles du xylème et du phloème, ainsi que l'hydrodynamique de ces fonctions. Une technologie nucléaire connexe, la tomodesitométrie (TDM) par rayons X, est aujourd'hui couramment utilisée dans des applications non médicales, y compris en sciences végétales, et l'on emploie de plus en plus les estimations réalisées grâce à la TDM par rayons X pour prédire les caractéristiques morphologiques et anatomiques des plantes dans le cadre du phénotypage. L'analyse tomodesitométrique par rayons X est par exemple utilisée en science végétale pour examiner les capacités de survie des plantes sous stress hydrique, évaluer la tolérance à l'ombre des végétaux et l'interception de la lumière par les feuilles, et analyser les maladies des racines, le développement du système racinaire et les interactions des racines. Ces technologies ont pour principaux avantages d'être non invasives et de permettre la quantification des processus physiologiques en temps réel. On continue de perfectionner les instruments pour permettre la capture d'images à l'échelle macroscopique et microscopique et l'utilisation du tomodesitomètre à rayons X à haut débit se répand progressivement. En complément des techniques d'imagerie nucléaire à haut débit non invasives, l'organisation des tâches utilisée depuis longtemps pour l'analyse des données génomiques et moléculaires, ainsi que les protocoles de phénotypage actuels, permettront d'accélérer le processus de sélection des plantes par mutation.

### **F.3. Application innovante de techniques isotopiques et nucléaires en nutrition animale**

183. D'ici à 2050, la demande mondiale d'aliments d'origine animale devrait augmenter de 60 à 70 %<sup>22</sup>. Pour mener à bien l'énorme tâche qui consiste à accroître durablement l'offre de lait, de viande, d'œufs et d'autres produits animaux comestibles dans ce laps de temps, le secteur de l'élevage devra intensifier le recours à la technologie dans ses systèmes de production. Il faudra multiplier par deux l'approvisionnement en fourrages et aliments pour animaux et l'accès à de bons pâturages, herbages et terrains de parcours pour répondre à la demande prévue en nutrition animale. La situation est encore aggravée par la surenchère entre aliments pour animaux et ceux destinés à la consommation humaine et par l'impact de la production animale sur l'environnement.

184. Actuellement, la quantité de céréales utilisées pour l'alimentation du bétail s'établit à environ 800 millions de tonnes (un tiers de la production céréalière totale) et, d'ici à 2050, elle devrait dépasser 1,1 milliard de tonnes<sup>23</sup>. En 2006, les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) des activités d'élevage étaient estimées à 7,1 gigatonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an, soit 14,5 % de toutes les émissions de GES d'origine anthropique<sup>24</sup>. Il est nécessaire de mener des travaux innovants de recherche-développement intégrant des techniques nucléaires aux technologies classiques, non seulement pour améliorer les systèmes actuels d'alimentation à l'étable et de pâturage, mais aussi pour diversifier à terme les sources d'aliments et de fourrages afin d'englober les herbages et les parcours inutilisés, les sous-produits industriels, les déchets alimentaires, la production en série d'algues unicellulaires et la production de fourrage en aquaponie, et pour étudier d'autres aliments pour animaux moins connus et inhabituels. Cela aidera à constituer un ensemble de données de qualité et à fournir l'information nécessaire pour étayer les décisions politiques et informer les investisseurs potentiels.

185. Plus de 40 % de la surface terrestre de la planète, à l'exclusion du Groenland et de l'Antarctique, sont couvertes d'herbages qui, s'ils étaient exploités de manière optimale comme source d'alimentation

---

<sup>22</sup> FAO, L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture : Tendances et défis (2017) FAO, Rome  
<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>

<sup>23</sup> Makkar, H. P. S., Review: Feed demand landscape and implications of food-not feed strategy for food security and climate change, *Animal* 12 (2018) 1744-1754.

<sup>24</sup> FAO, Key facts and findings, <http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode>

pour le bétail, profiteraient à des millions d'agriculteurs dans le monde entier<sup>25</sup>. Sous les tropiques, les ruminants sont les principales espèces animales et leur production repose largement sur le pâturage en milieu naturel (figure F-3). On peut recourir à des techniques nucléaires et isotopiques pour constituer un ensemble de données sur la consommation d'aliments, le choix alimentaire des animaux et la teneur en nutriments des herbes et espèces qu'ils broutent. Ces données sont nécessaires pour prendre diverses décisions de gestion, par exemple en ce qui concerne l'optimisation de l'affouragement des différents types d'animaux, la sélection d'espèces végétales appropriées pour le réensemencement des pâturages et des parcours dégradés, et la conception de stratégies de supplémentation appropriées. Une utilisation efficace des herbages offre également la possibilité d'augmenter le piégeage du carbone, la superficie des terres remises en culture et la productivité animale.



*FIG. F-3. L'élevage mixte d'espèces qui pâturent et qui broutent est une pratique courante dans les herbages communautaires du Zimbabwe.*

### **F.3.1. Techniques nucléaires pour l'étude et l'amélioration de la nutrition des animaux au pâturage**

186. Les techniques traditionnelles intervenant dans les essais menés sur l'alimentation in vivo, les analyses in vitro de la digestibilité et les analyses bromatologiques des aliments et fourrages utilisés dans le système d'alimentation à l'étable se sont révélées inefficaces pour l'étude de l'ingestion volontaire d'aliments par les animaux au pâturage et de leur choix alimentaire. Les progrès récemment accomplis dans la mise au point d'outils et de protocoles pour l'application d'une combinaison de techniques nucléaires et conventionnelles innovantes apportent des solutions aux défis que posent l'analyse et l'évaluation de la prise alimentaire, du choix des aliments et de leur digestibilité chez les animaux pâturant sur des pacages hétérogènes.

187. L'Agence collabore avec les États Membres à la mise au point d'outils sur la nutrition des animaux en vue d'une application intégrée d'isotopes stables du carbone 13 de composés spécifiques d'alcane à chaîne linéaire longue et de la spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) pour l'évaluation de la prise alimentaire, du choix et de la composition des aliments et de leur digestibilité chez les ruminants. Cela permet d'optimiser l'apport en nutriments chez le bétail grâce à une supplémentation alimentaire pendant le pâturage, ce qui évite le surpâturage des pacages et des herbages.

### **F.3.2. Contribution des alcanes à chaîne linéaire à l'étude de la consommation, de la digestibilité et du choix des aliments du bétail**

188. Tous les végétaux supérieurs qui constituent la nourriture des animaux sont recouverts en surface d'une couche de cires (alcane à chaîne linéaire ou n-alcane), très variables d'une espèce à l'autre, et l'analyse des données quantitatives disponibles à leur sujet peut aider à différencier les espèces végétales consommées par un animal. Ainsi, les n-alcane sont utilisés comme marqueurs fécaux pour l'évaluation de la digestibilité des végétaux, et une combinaison de ces données avec l'étude des matières fécales

<sup>25</sup> Suttie, J. M., Reynolds, S. G., Batello, C., Grasslands of the World (2005) Rome, FAO  
<http://www.fao.org/docrep/008/y8344e/y8344e05.htm>

permet de calculer la prise alimentaire des animaux. Un n-alcane employé comme marqueur fécal peut provenir de l'alimentation (marqueur interne) ou être administré par voie orale (marqueur externe). S'il permet de différencier de nombreux végétaux dans l'alimentation des ruminants, il ne peut pas faire la distinction entre tous, et plus particulièrement entre les dizaines de plantes qui poussent dans des pacages hétérogènes. L'enrichissement isotopique du carbone de n-alcane permet cependant de distinguer clairement les différentes espèces végétales de pacages hétérogènes. Une application combinée des techniques faisant appel aux n-alcane et au carbone 13 se révèle très efficace pour évaluer la prise alimentaire, la composition des aliments du bétail et leur digestibilité. Les isotopes du carbone de composés spécifiques (carbone 13 et carbone 12) sont analysés par chromatographie en phase gazeuse et spectroscopie de masse isotopique par combustion après saponification, extraction et purification. De plus, une technologie novatrice prometteuse au laser, la spectroscopie par mesure du temps de déclin dans une cavité, a été utilisée avec succès pour déterminer la teneur en carbone 13, fournissant des mesures à plus bref délai et avec une simplicité accrue de préparation des échantillons.

### **F.3.3. Évaluation de la teneur en nutriments, de l'ingestion volontaire et du choix des aliments grâce à l'analyse par SPIR de nutriments résiduels**

189. L'analyse par SPIR consiste à illuminer des échantillons d'aliments ou de fèces avec un spectre large (nombreuses longueurs d'onde ou fréquences) de lumière infrarouge proche, qui peut être absorbé, transmis, réfléchi ou dispersé par ces échantillons. L'illumination se situe généralement dans la gamme de longueurs d'onde de 800 à 2 500 nm. L'intensité lumineuse, qui est fonction de la longueur d'onde, est mesurée avant et après l'interaction avec l'échantillon, et l'on calcule la réflexion de diffusion, combinaison d'absorbance et de diffusion, due à l'échantillon. La SPIR fournit des données qualitatives sur les protéines brutes, les teneurs en fibres, la proportion d'espèces végétales et de composants morphologiques, l'ingestion volontaire et la digestibilité des aliments. L'analyse SPIR a donné des écarts-types de 60 à 85 % plus faibles lorsque des échantillons fractionnés étaient analysés par chimie humide et par SPIR à l'aide de techniques de validation en double aveugle. Il en ressort que les erreurs humaines sont moins nombreuses avec la SPIR et que les données sont plus cohérentes que celles obtenues par chimie humide classique<sup>26</sup>.

190. La SPIR est devenue une technique polyvalente qui ne nécessite aucune préparation des échantillons, réduit les coûts et le temps d'analyse et permet de scanner les échantillons à travers le verre et des matériaux d'emballage.

### **F.3.4. Détermination exacte de la teneur en minéraux de fourrages par fluorescence X à dispersion d'énergie**

191. Si les fourrages constituent l'essentiel de l'alimentation des ruminants, leur teneur en minéraux varie considérablement, ce qui a des répercussions sur la productivité et la santé animales. La fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF) est une technique de spectroscopie non destructive qui rend l'analyse et l'étude de divers minéraux simples, directes et cohérentes. Elle consiste à analyser des échantillons de fourrages séchés et broyés provenant d'un vaste éventail de végétaux frais, de foin ou d'ensilages à une énergie de 20 à 40 keV avec un filtre en aluminium et à étalonner à l'aide d'un logiciel approprié, par exemple Bruker SpectraEDX (Bruker, Hambourg, Allemagne)<sup>27</sup>. Lors de la détermination de la teneur en minéraux courants dans les rations de ruminants (sodium, magnésium, phosphore, soufre, chlore, calcium, potassium, manganèse, fer, cuivre et zinc), le coefficient de détermination se situait entre 0,93 et 0,99, tandis que le coefficient de variation se situait dans une plage acceptable (5 à 14%).

<sup>26</sup> De Ondarza, M. B., Ward, R., Accurate analysis: NIRS versus wet chemistry, *Hoards Dairyman* (February 2013) 129, <http://www.foragelab.com/Media/Accurate%20analysis%20NIRS%20versus%20wet%20chemistry.pdf>

<sup>27</sup> Berzaghi, P., Lotto, A., Mancinelli, M., Benozzo, F., Technical note: Rapid mineral determination in forages by X-ray fluorescence, *Journal of Dairy Science* 101 (2018) 9967-9970.

L'EDXRF peut être appliquée sur le terrain dans divers systèmes de production animale aux fins de la détermination de la teneur en minéraux. Les données recueillies permettront de mettre au point une supplémentation en minéraux destinée à améliorer la santé et la productivité des animaux.

192. L'alimentation est la clé d'une production animale rentable et durable. Elle influence la croissance, la santé, le bien-être, la productivité d'un animal et la qualité de ses produits. Elle représente plus de 70 % du coût des activités d'élevage. Non seulement elle est tributaire des ressources disponibles, mais aussi elle a des incidences directes sur la base de ressources (pâturages, herbages et environnement). Pour répondre à la demande sans cesse croissante d'aliments d'origine animale, il faut améliorer la productivité du bétail et en limiter les impacts sur l'environnement. Pour ce faire, les trois techniques susmentionnées, lorsqu'elles sont validées et appliquées ensemble, peuvent apporter une réponse exhaustive sur les nutriments présents dans les aliments et les fourrages pour animaux, sur leur accessibilité et leur sapidité ainsi que sur leur digestibilité, de façon à favoriser la transformation des apports nutritifs et énergétiques en faveur de la croissance, de la santé et de la productivité des animaux. Les techniques faisant appel au carbone 13 et aux n-alcanes déterminent la nature et la quantité des végétaux qui ont été consommés, l'EDXRF détermine la composition en minéraux de la nourriture et la SPIR permet d'étudier la composition des nutriments résiduels dans les fèces animales. On se sert actuellement de la SPIR pour évaluer la prise alimentaire d'animaux nourris à l'étable, ainsi que la composition et la teneur en nutriments des aliments qu'ils ont ingérés. Pour les animaux au pâturage, on peut la combiner à la technique faisant appel au carbone 13 et à l'EDXRF, et les trois conjuguées pourraient donner une estimation globale des nutriments présents dans la nourriture, de la prise alimentaire et de la composition des aliments (figure F-4). De plus, la SPIR et l'EDXRF sont des techniques mobiles, qui nécessitent un minimum d'entretien, les taux d'erreur humaine au cours de leur utilisation sont inférieurs qu'avec l'analyse par chimie humide et elles ne nécessitent aucune préparation d'échantillon. À l'avenir, le progrès consistera notamment à adopter une approche intégrée combinant ces trois techniques qui permettra de déterminer la qualité et la quantité des aliments consommés.

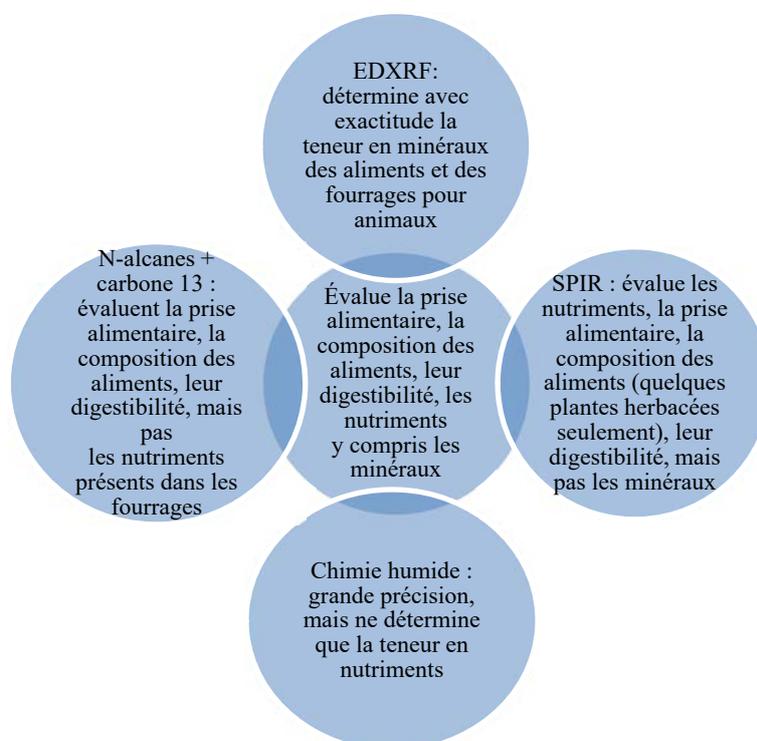


FIG. F-4. La validation de la SPIR au moyen de la technique des n-alcanes et de leurs données sur les isotopes stables du carbone dans l'algorithme mathématique et l'intégration de la fluorescence à rayons X à dispersion d'énergie pour l'analyse des minéraux constituent une solution mobile et exhaustive aux fins de l'analyse des aliments et fourrages pour animaux et de l'évaluation de la nutrition animale.



**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique

[www.iaea.org](http://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](mailto:Official.Mail@iaea.org)

GC(63)/INF/2