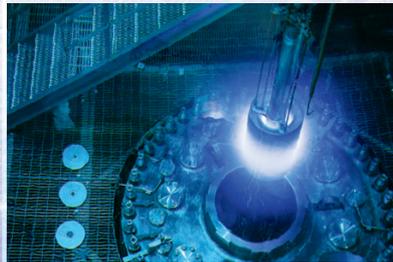
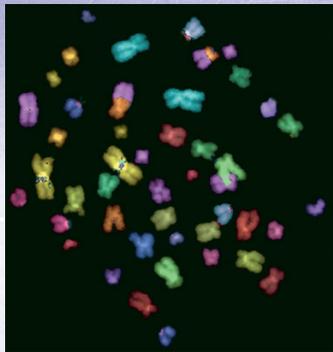


RAPPORT D'ENSEMBLE SUR LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE

2020



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2020

GC(64)/INF/2

Imprimé par l'AIEA en Autriche

Septembre 2020

IAEA/NTR/2020

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 2020* couvre les domaines suivants : applications énergétiques, fission avancée et fusion, applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, technologies des radio-isotopes et des rayonnements, santé humaine et techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture.

Un projet de rapport a été examiné par le Conseil des gouverneurs à sa réunion de mars 2020 (document GOV/2020/4). La présente version finale a été établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.

Table des matières

Synthèse	1
Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2020.....	1
Rapport principal.....	1
A. Applications énergétiques	1
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	1
A.1.1. Pays qui exploitent des centrales nucléaires.....	4
A.1.2. Nouveaux projets dans le cadre de programmes électronucléaires existants	6
A.1.3. Pays primo-accédants	7
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire	8
A.3. Cycle du combustible	10
A.3.1. Partie initiale.....	10
A.3.2. Assurance de l'approvisionnement.....	12
A.3.3. Partie terminale.....	13
A.4. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs.....	14
A.4.1. Déclassement des installations nucléaires	14
A.4.2. Remédiation environnementale	17
A.4.3. Gestion des déchets radioactifs.....	19
B. Fission avancée et fusion.....	23
B.1. Fission avancée.....	23
B.1.1. Réacteurs refroidis par eau	24
B.2. Systèmes à neutrons rapides	26
B.2.1. Réacteurs refroidis par gaz	28
B.2.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires.....	30
B.2.3. Initiatives internationales portant sur des systèmes d'énergie nucléaire innovants.....	33
B.2.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire	33
B.3. Fusion	34
C. Accélérateurs et réacteurs de recherche	36
C.1. Accélérateurs et instruments connexes	36
C.1.1. Une installation à double faisceau ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche sur les matériaux	37
C.1.2. MACHINA – accélérateur mobile pour l'analyse non destructive in-situ du patrimoine culturel.....	37
C.1.3. Imagerie de cellules entières à l'aide de faisceaux d'ions focalisés de l'ordre du mégaelectronvolt	38

C.1.4. Les technologies d'accélération par laser : des applications prometteuses	39
C.2. Réacteurs de recherche	40
D. Technologies des radio-isotopes et des rayonnements	43
D.1. Face au problème du plastique, les techniques nucléaires à la rescousse.....	43
D.2. La thérapie par capture de neutrons par le bore fait son entrée dans les hôpitaux grâce aux avancées majeures des technologies faisant appel aux accélérateurs.....	46
D.2.1. Avancées des sources de neutrons compacts alimentées par accélérateur	46
D.2.2. Radiopharmaceutiques théragnostiques et BNCT	49
D.3. Medical Isotope Browser : un outil qui facilite la découverte de nouveaux circuits de production de radio-isotopes pour lutter contre le cancer et d'autres maladies	49
E. Santé humaine	50
E.1. Une nouvelle méthode basée sur un double traceur isotopique pour l'évaluation de la qualité des protéines chez l'être humain	50
E.1.1. Les protéines et leurs incidences sur la croissance et le développement de l'enfant	50
E.1.2. Qualité des protéines.....	51
E.1.3. Évaluation de la qualité des protéines chez l'être humain par la méthode du double traceur isotopique	51
E.1.4. Marquage intrinsèque des légumineuses à l'oxyde de deutérium pendant la croissance en champ	51
E.1.5. Étude menée chez l'être humain après ingestion de repas-tests à base de légumineuses intrinsèquement marquées	52
E.1.6. Intérêt de la méthode.....	52
E.2. La biodosimétrie en tant qu'outil de diagnostic et de prévision en situation d'urgence nucléaire ou radiologique et en médecine.....	53
E.2.1. La biodosimétrie permet d'établir des rapports entre biomarqueurs et doses.....	53
E.2.2. Méthodes de biodosimétrie standard.....	54
E.2.3. Principales méthodes de biodosimétrie élaborées depuis 2000	54
E.2.4. Orientations futures.....	56
F. Alimentation et agriculture.....	57
F.1. Applications renforcées de la technique de l'insecte stérile dans la lutte contre les insectes ravageurs envahissants (prévention et éradication).....	57
F.1.1. Contexte	57
F.1.2. Des techniques et des stratégies liées à la TIS en amélioration	59
F.1.3. Lutte contre les insectes ravageurs envahissants : prévention et préparation	60
F.2. Les techniques nucléaires au service des systèmes de traçabilité des aliments	61
F.2.1. Contexte	61
F.2.2. Techniques nucléaires	62
F.2.3. Bases de données.....	65
F.3. Application des techniques nucléaires à la surveillance des gaz à effet de serre pour atténuer l'impact des changements climatiques	66
F.3.1. Contexte	66
F.3.2. Technologie au ¹³ C : vers une application élargie sur le terrain.....	67

F.3.3. Application de la technique de traçage à l'azote 15 pour la mesure de l'oxyde nitreux (N ₂ O) et la détermination des sources de N ₂ O	68
F.3.4. Mesure de l'ammoniac (NH ₃) : des nouveautés sur le terrain.....	69
F.3.5. Perspectives.....	70

Synthèse

1. À la fin de 2019, la capacité totale des 443 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans le monde (figure A-1) était de 392,1 GWe. En 2019, 13 réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt, six ont été raccordés au réseau, 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 54 réacteurs en construction et 61 des 74 réacteurs couplés au réseau depuis 2005.

Répartition par région des 443 réacteurs en exploitation

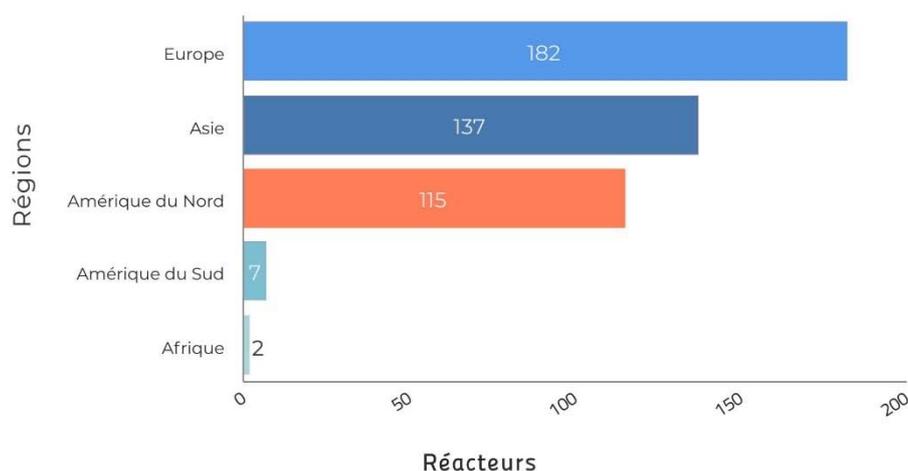


FIG. A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en exploitation en 2019

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

2. Trente pays utilisent actuellement l'énergie d'origine nucléaire et 28 envisagent ou planifient d'inclure l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique, ou y travaillent activement. Quatre pays primo-accédants ont mis en chantier leurs premières centrales nucléaires, la construction de deux d'entre elles étant en passe d'être achevée, et plusieurs autres, après avoir décidé de se doter d'un programme électronucléaire, en sont à un stade avancé de la préparation de l'infrastructure appropriée.

3. Dans ses projections de 2019 concernant la capacité électronucléaire mondiale, l'Agence donne une estimation nuancée de la contribution future de l'électronucléaire à la production d'électricité mondiale, qui varie, notamment, selon que de nouvelles capacités substantielles peuvent être ajoutées pour compenser l'éventuelle mise à l'arrêt définitif de réacteurs. Dans les projections basses, la capacité nucléaire installée nette diminue progressivement d'ici à 2030 avant de remonter pour atteindre 371 GWe en 2050. D'après les projections hautes, elle s'établirait à 496 GWe à l'horizon 2030 et à 715 GWe à l'horizon 2050, soit des hausses respectives de 25 % et de 80 % par rapport à son niveau actuel. L'électronucléaire représenterait environ 6 % de la production d'électricité mondiale à la moitié du siècle dans l'estimation basse et approximativement 12 % dans l'estimation haute, contre environ 10 % en 2019.

Les principales raisons qui amènent de nombreux pays à envisager d'entreprendre un programme électronucléaire ou de développer leur programme actuel sont les avantages qu'offre cette source d'énergie en ce qui concerne l'atténuation des changements climatiques, la sécurité énergétique et les politiques environnementales et socio-économiques. À l'occasion de la Conférence internationale sur les changements climatiques et le rôle de l'électronucléaire, organisée par l'AIEA en octobre 2019 en coopération avec l'Agence pour l'énergie nucléaire, les participants ont mis en avant le fait que l'électronucléaire avait une contribution essentielle à apporter à la réalisation des objectifs climatiques en accélérant la transition vers un système énergétique à faible émission de carbone.

4. Selon les prévisions, la production mondiale d'uranium en 2019 devait être comparable à celle de 2018, soit de l'ordre de 53 500 tonnes. La faiblesse persistante des prix a entraîné une forte réduction des activités de prospection d'uranium puisque de nouveaux projets sont restés en suspens et plusieurs mines et installations de traitement qui étaient en activité sont restées en régime d'entretien et de maintenance. Les capacités mondiales de conversion, d'enrichissement et de fabrication de combustible étaient plus que suffisantes pour répondre à la demande existante et à celle prévue pour les années à venir.

5. En octobre 2019, l'Agence a réceptionné un envoi d'uranium faiblement enrichi (UFE) dans une installation conçue à cet effet au Kazakhstan, ce qui a marqué officiellement la création de sa banque d'UFE, qui vise à donner aux pays des assurances quant à l'approvisionnement en combustible nucléaire.

6. 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.

7. 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. La Finlande construit actuellement une installation prévue à cet effet, la Suède attend la décision finale concernant sa demande d'autorisation, et la France finit de mettre au point la demande d'autorisation pour sa propre installation. Des projets de stockage en puits de sources radioactives scellées retirées du service sont mis en œuvre dans plusieurs pays, notamment au Ghana et en Malaisie, où l'Agence appuie des projets pilotes. Des installations de stockage définitif sont en service pour toutes les autres catégories de déchets radioactifs dans le monde entier.

8. Les réacteurs nucléaires avancés et leurs applications, qui sont considérés comme de nature à contribuer à la transition généralisée vers des systèmes énergétiques plus durables, moins chers et plus fiables, connaissent un essor dans toutes les régions du monde. Ces technologies, au nombre desquelles figurent les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP), sont aptes à s'intégrer dans les futurs systèmes énergétiques décarbonés, qui seront segmentés en plusieurs grands créneaux occupés, en parts variables, par diverses sources d'énergie renouvelables.

9. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications non énergétiques telles que le dessalement, la production d'hydrogène, le chauffage et le refroidissement urbains, de même que pour plusieurs applications industrielles grandes consommatrices d'énergie, suscite un intérêt croissant. Les RFMP conviennent particulièrement à ce type d'applications, regroupées sous le concept de « cogénération », qui peuvent compenser une grande partie des coûts de la production d'énergie d'origine nucléaire.

10. Les travaux ont considérablement avancé sur le site de construction de l'ITER : plus de 73 % des travaux de génie civil sont désormais achevés. L'ITER devrait commencer à être exploité à plein régime aux alentours de 2035. Un large éventail de programmes de recherche-développement sur la fusion sont également en cours dans plusieurs États Membres. À cet égard, la construction du tokamak supraconducteur JT-60SA à Naka (Japon), fruit d'une collaboration internationale entre l'Europe et le Japon, constitue une étape importante.

11. Les 250 réacteurs de recherche en exploitation dans 54 pays continuent d'apporter une contribution stratégique aux secteurs de la médecine, de l'industrie, de l'éducation et de l'électronucléaire. Au total, neuf de tels réacteurs sont en construction dans six pays et 14 sont prévus dans 11 pays. Les réacteurs de recherche sont des installations nationales qui jouent un rôle essentiel pour le développement d'une infrastructure et de programmes voués à la science et à la technologie nucléaires. En 2019, un organisme de recherche a obtenu le statut de Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche : il s'agit de l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique.

12. 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 2019, les préparatifs de la réexpédition du combustible à l'UHE du réacteur de recherche IVG.1M du Kazakhstan vers la Fédération de Russie ont commencé, après la conversion de ce réacteur pour l'utilisation de combustible à l'UFE. Les préparatifs de la dilution par mélange du combustible à l'UHE du réacteur de recherche IGR au Kazakhstan ont aussi commencé afin d'en faire descendre le taux d'enrichissement sous les 20 %. À la fin 2019, quelque 1 600 kg de combustible à l'UHE neuf et usé avaient été retirés de réacteurs de recherche dans le cadre du programme de renvoi du combustible à l'UHE provenant des États-Unis, quelque 2 875 kg de combustible à l'UHE avaient été retirés ou fait l'objet d'une évacuation confirmée dans le cadre du « Gap Remove Program », et quelque 2 300 kg de combustible à l'UHE avaient été retirés dans le cadre du programme de renvoi du combustible à l'UHE d'origine russe.

13. Les technologies des rayonnements respectent les principes fondamentaux de la « chimie verte » et offrent de multiples possibilités en matière de traitement de matériaux comme les polymères, également appelés « plastiques », par la formation ou la rupture contrôlées de liaisons chimiques. L'efficacité des technologies des rayonnements a été pleinement démontrée dans le domaine de la chimie des polymères, notamment en ce qui concerne l'approche novatrice de modification des propriétés des polymères et la création de matériaux et de composés polymères inédits, ainsi que dans le domaine du recyclage des déchets de polymères. On observe un intérêt croissant pour ces technologies et, de plus en plus, les États Membres demandent qu'elles soient adaptées pour aider à relever, à l'échelle mondiale, le défi que constitue le recyclage des déchets plastiques.

14. La thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT) est une technique neutronique qui permet une irradiation sélective au niveau des cellules tumorales. Elle est particulièrement adaptée au traitement des cancers du cerveau, de la tête, du cou et de la peau. S'appuyant sur la réaction qui se produit entre un neutron et le bore pour agir de manière ciblée en détruisant uniquement les cellules cancéreuses, la BNCT pourrait offrir une approche radicalement différente de la radiothérapie classique et promet de devenir une option viable pour le traitement du cancer. Beaucoup de progrès ont été faits dans le domaine de la BNCT dans les différents centres participants à travers le monde. Ainsi, outre les avancées notables réalisées dans l'optimisation des composés du bore et dans le contrôle de leur accumulation dans les cellules tumorales, on a aussi mis au point des systèmes 3D pour le calcul des doses. On observe un regain d'intérêt pour le sujet grâce à une percée technologique majeure dans la production de neutrons au moyen d'un accélérateur compact, qui ouvre la voie à l'installation de ce type de dispositifs dans les hôpitaux et les centres de recherche sur le cancer.

15. La qualité des protéines est très importante pour ce qui est de satisfaire les besoins nutritionnels des populations dans les pays en développement, en particulier durant la grossesse et la petite enfance. Les acides aminés constituent un ingrédient clé d'une croissance en bonne santé pendant les premières années de la vie. Une nouvelle méthode très peu invasive, qui repose sur l'utilisation du deutérium et du carbone 13, mesure la digestibilité réelle des acides aminés essentiels et permet d'évaluer la qualité des protéines contenues dans l'alimentation humaine. Cette approche permettra de déterminer quelles sont les sources de protéines végétales de bonne qualité pour la consommation humaine, en particulier dans les légumineuses, et servira de point de départ à la formulation des recommandations de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture sur la qualité de ces protéines.

16. Les méthodes de biodosimétrie permettent d'identifier et de quantifier plus facilement les expositions aux rayonnements chez l'être humain. La biodosimétrie rétrospective aide même à obtenir des informations sur une exposition à des rayonnements datant de plusieurs années. Les méthodes de biodosimétrie ont récemment été introduites en radio-oncologie et en médecine nucléaire, ainsi qu'en radiologie diagnostique et interventionnelle.

17. Un nouvel outil en ligne a été mis au point pour prévoir directement le rendement de la production d'un radio-isotope médical donné à partir des informations communiquées par l'utilisateur. Baptisé « Medical Isotope Browser », il peut être utilisé par des chercheurs en médecine ainsi que par les acteurs de l'industrie radiopharmaceutique pour mettre au jour des circuits de production de radio-isotopes encore inconnus. Il s'agit d'une avancée qui contribuera largement à la lutte contre le cancer et d'autres maladies. La production de radio-isotopes médicaux à des fins thérapeutiques ou diagnostiques repose sur des processus très complexes faisant intervenir des réactions nucléaires, processus auxquels seuls les physiciens nucléaires ont accès au moyen de mesures et de théories sur les réactions nucléaires. Grâce à Medical Isotope Browser, ces informations fondamentales sont désormais mises à la disposition d'un grand nombre de non-spécialistes via une interface utilisateur graphique consacrée à la production d'isotopes.

18. La prévalence d'espèces envahissantes s'accroît, contribuant à l'appauvrissement de la biodiversité dans le monde. La technique de l'insecte stérile (TIS), appliquée en tant qu'élément important d'une méthode de gestion intégrée des ravageurs à l'échelle d'une zone, peut empêcher l'établissement d'une population envahissante, la circonscrire ou l'éradiquer sans laisser une empreinte écologique. L'amélioration des techniques et des protocoles d'élevage en masse, de stérilisation et de lâcher d'insectes stériles a permis d'accroître sensiblement la rentabilité de la gestion intégrée des ravageurs à l'échelle d'une zone comportant un volet TIS. Cela a permis d'étendre cette dernière à d'autres insectes ravageurs importants, notamment à des insectes ravageurs envahissants bien connus qui s'attaquent aux plantes, aux animaux et à la santé humaine. Selon des analyses, il est beaucoup moins onéreux de se préparer à intervenir rapidement avant l'implantation d'un ravageur que d'entreprendre ultérieurement des campagnes d'éradication.

19. De nombreux aliments se vendent à des prix majorés en raison de la mention, sur leurs étiquettes, d'une « valeur ajoutée » liée à leur origine géographique, à leur méthode de production ou à des caractéristiques distinctives. Les produits du terroir peuvent s'inscrire dans un cercle vertueux de qualité durable fondé sur la préservation des ressources locales, et leurs étiquettes peuvent notamment mettre en évidence des particularités d'ordre agricole, artisanal, déontologique et nutritionnel qui leur donnent une valeur ajoutée. Afin de protéger les consommateurs contre la fraude alimentaire et d'éventuels problèmes involontaires de sécurité sanitaire des aliments, il convient de faire appel à des méthodes d'analyse pour vérifier la véracité des allégations relatives à cette valeur ajoutée et ainsi renforcer les systèmes de traçabilité. Plusieurs techniques nucléaires, isotopiques et connexes ont fait leurs preuves pour ce qui est de vérifier les nombreuses mentions apposées sur les étiquettes des produits alimentaires en vue d'en vanter les mérites. Elles pourraient s'avérer d'une très grande utilité pour les systèmes de traçabilité qui assurent la protection et la promotion des aliments assortis d'étiquettes mettant en avant

leur valeur ajoutée. Leur adoption généralisée par les États Membres permettra, à terme, de protéger les consommateurs et les producteurs à la réputation bien établie, de garantir le respect des réglementations et des codes de déontologie, de stimuler les marchés locaux et de limiter les obstacles au commerce international.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2020

Rapport principal

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

20. Au 31 décembre 2019, il y avait 443 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, représentant une capacité totale de 392,1 GWe¹ (tableau A-1) ; 83 % d'entre eux étaient modérés et refroidis par eau ordinaire, 11 % étaient modérés et refroidis par eau lourde, 3 % étaient refroidis par eau ordinaire et modérés au graphite et 3 % étaient refroidis par gaz (figure A-2). Trois étaient 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.

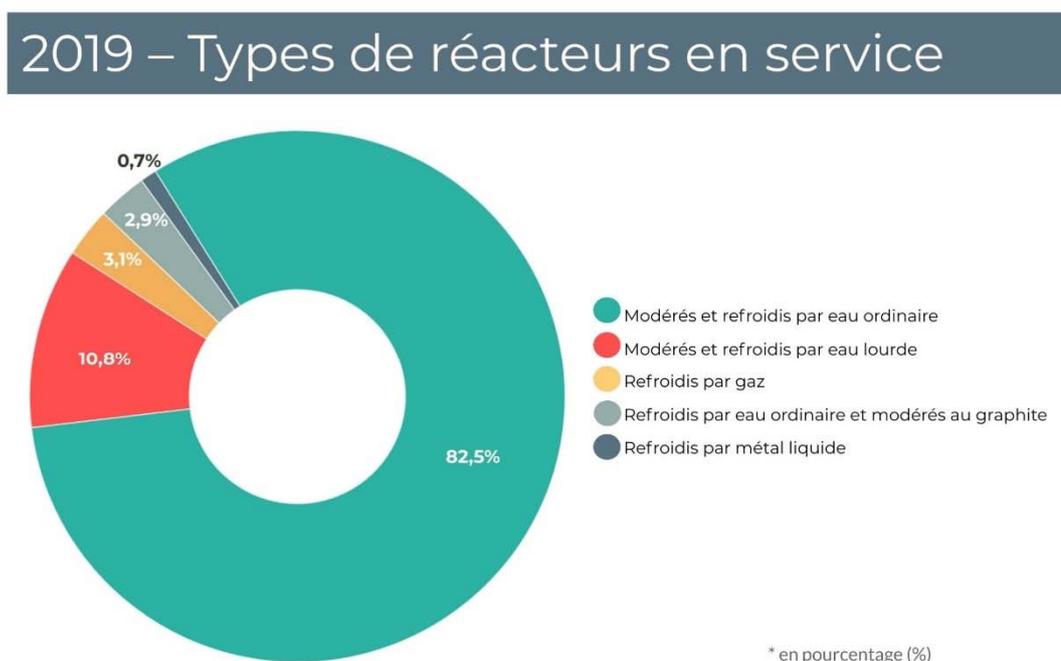


FIG. A-2. Réacteurs nucléaires de puissance, par type.

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

21. En 2019, six nouveaux réacteurs à eau sous pression (REP) ont été couplés au réseau, augmentant de 5 174 MWe la capacité totale dans le monde pendant cette année : deux en Chine [Taishan-2 (1 660 MWe) et Yangjiang-6 (1 000 MWe)], un en République de Corée [Shin-Kori-4 (1 340 MWe)] et trois en Fédération de Russie [Novovoronezh 2-2 (1 114 MWe), Akademik Lomonosov-1 (30 MWe) et Akademik Lomonosov-2 (30 MWe)]. Treize réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt :

¹ Un GWe (gigawatt électrique) correspond à un milliard de watts d'énergie électrique.

Philippsburg-2 en Allemagne, Chinshan-2 à Taïwan (Chine), Pilgrim-1 et Three Mile Island-1 aux États-Unis d'Amérique, Bilibino-1 en Fédération de Russie, Genkai-2 et Fukushima Daini 1 à 4 au Japon, Wolsong-1 en République de Corée, Ringhals-2 en Suède, et Muehleberg en Suisse.

22. Au 31 décembre 2019, 54 réacteurs étaient en construction. Zhangzhou-1 et Taipingling-1 (Chine), Bushehr-2 (République islamique d'Iran), Kursk 2-2 (Fédération de Russie) et Hinkley Point C-2 (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-3), où 35 réacteurs sont en construction. C'est également en Asie que se trouvent 61 des 74 nouveaux réacteurs couplés au réseau depuis 2005.

Nombre de réacteurs en construction, par région

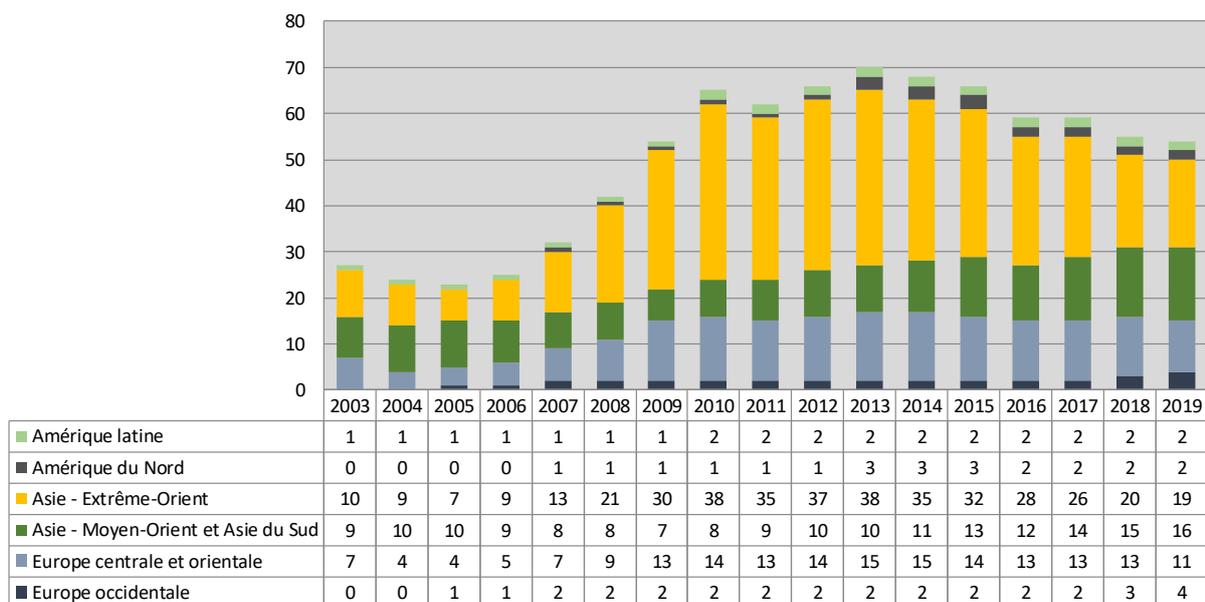


FIG. A-3. Nombre de réacteurs en construction, par région.

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

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde
(au 31 décembre 2019)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2019		Expérience d'exploitation totale en 2019	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			13,6	6,7	70	3
ALLEMAGNE	6	8 113					846	7
ARGENTINE	3	1 641	1	25	7,9	5,9	88	2
ARMÉNIE	1	375			2,0	27,8	45	8
BANGLADESH			2	2 160				
BÉLARUS			2	2 220				
BELGIQUE	7	5 930			41,4	47,6	303	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 340	15,2	2,7	57	3
BULGARIE	2	2 006			15,9	37,5	167	3
CANADA	19	13 554			94,9	14,9	769	6
CHINE	48	45 518	11	10 564	330,1	4,9	370	1
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	24	23 172	4	5 360	138,8	26,2	572	2
ÉMIRATS ARABES UNIS			4	5 380				
ESPAGNE	7	7 121			55,9	21,4	343	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	96	98 152	2	2 234	809,4	19,7	4 505	8
FÉDÉRATION DE RUSSIE	38	28 437	4	4 525	195,5	19,7	1 334	5
FINLANDE	4	2 794	1	1 600	22,9	34,7	163	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	382,4	70,6	2 280	4
HONGRIE	4	1 902			15,4	49,2	138	2
INDE	22	6 255	7	4 824	40,7	3,2	526	11
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915	1	974	5,9	1,8	8	4
JAPON	33	31 679	2	2 653	65,7	7,5	1 899	6
KAZAKHSTAN							25	10
MEXIQUE	2	1 552			10,9	4,5	55	11
PAKISTAN	5	1 318	2	2 028	9	6,6	82	5
PAYS-BAS	1	482			3,7	3,1	75	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 932			28,6	35,2	170	10
ROUMANIE	2	1 300			10,4	18,5	35	11
ROYAUME-UNI	15	8 923	2	3 260	51,0	15,6	1 619	7
SLOVAQUIE	4	1 814	2	880	14,3	53,9	172	7
SLOVÉNIE	1	688			5,5	37,0	38	3
SUÈDE	7	7 740			64,4	34,0	467	0
SUISSE	4	2 960			25,4	23,9	224	11
TURQUIE			1	1 114	s.o.	s.o.		
UKRAINE	15	13 107	2	2 070	78,1	53,9	518	6
Total b,c,d	443	392 098	54	57 441	2 586,2		18 329	10

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

b. La quantité totale d'électricité nucléaire fournie en 2019 ne comprend pas les données de sept tranches de l'Allemagne, qui n'avaient pas été communiquées à la date de la publication.

c. Le nombre total inclut 4 tranches en service (3 844 MWe) et 2 en construction (2 600 MWe) à Taïwan (Chine).

d. L'expérience d'exploitation totale tient compte de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois) et en Lituanie (43 ans et 6 mois) ainsi que de centrales en service et à l'arrêt à Taïwan (Chine) (224 ans et 1 mois).

A.1.1. Pays qui exploitent des centrales nucléaires

23. À la fin de 2019, plus de 66 % des 443 réacteurs nucléaires de puissance en service, représentant une capacité nette de 256,3 GWe, étaient exploités depuis plus de 30 ans. Ceux en service depuis plus de 40 ans représentaient 17 % de la capacité mondiale. Des programmes d'exploitation à long terme et de gestion du vieillissement sont mis en œuvre pour un nombre croissant de centrales nucléaires.

En 2019, 71 réacteurs nucléaires de puissance dans le monde (14 en Asie et 57 en Europe) ont produit 2 146,72 gigawatts-heure (GW·h) d'équivalent électrique de la chaleur pour appuyer les applications non électriques de l'énergie nucléaire : 10 ont facilité les applications liées au dessalement (48,01 GW·h), 56 celles liées au chauffage urbain (1 870,6 GW·h) et 32 celles liées à la chaleur industrielle (1 248,01 GW·h).

24. Deux réacteurs à neutrons rapides sont en service en Fédération de Russie. Beloyarsk 3, qui a une capacité nette de 560 MWe, a fourni 140 777 GW·h d'électricité depuis qu'il a été couplé au réseau en 1980, et Beloyarsk 4, qui a une capacité nette de 820 MWe, a généré 13 066 GW·h d'électricité depuis sa mise en exploitation commerciale en 2016.

25. En Afrique, Eskom a entamé la révision de ses réacteurs de la centrale de Koeberg en Afrique du Sud en vue d'étendre leur durée de vie utile d'au moins 20 ans.

26. En Asie, la Chine a commencé à utiliser à des fins de cogénération deux réacteurs de type AP100 récemment mis en service. À Taïwan (Chine), un amendement supprimant l'obligation pour toutes les centrales nucléaires de cesser leurs activités en 2025 a été adopté, conformément aux résultats d'un référendum tenu en novembre 2018. En Inde, la centrale nucléaire de Kakrapar a été redémarrée après que le circuit de refroidissement et les tubes d'alimentation eurent été remplacés.

27. Le Japon continue de se consacrer avant tout à la remédiation du site de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi et au redémarrage des centrales à l'arrêt. Neuf réacteurs (REP) qui avaient été mis à l'arrêt à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi ont été redémarrés. Tout en priorisant la sûreté, le Plan stratégique sur l'énergie (2018) prévoit que l'électronucléaire sera une source importante de charge de base pour la constitution d'un « bouquet énergétique optimal » d'ici à 2030 et représentera une option pour la décarbonisation d'ici à 2050.

28. En Europe, la France a reporté de 10 ans la réduction prévue de son parc nucléaire et entamé les travaux de mise à niveau et de maintenance du réacteur Tricastin-1 de 900 MWe qui pourraient permettre de l'exploiter pendant dix autres années. La Programmation pluriannuelle de l'énergie publiée début 2019 prévoit toutefois une réduction de 50 % de la part du nucléaire dans le bouquet énergétique du pays d'ici à 2035, grâce à la mise à l'arrêt de 14 réacteurs, ce qui entraînera une diminution de capacité de 12 600 MWe. En Belgique, le béton du réacteur de Doel-3 a été réparé, et la Roumanie a entamé un programme de modernisation de la centrale nucléaire de Cernavodă. La prolongation de la durée de vie des tranches 1 et 2 de la centrale nucléaire de Forsmark, en Suède, a été approuvée, et un projet visant à prolonger de 10 ans la durée de vie utile du réacteur Ukraine-3, en Ukraine, est en cours.

29. En Amérique latine, la capacité de la centrale nucléaire d'Embalse, en Argentine, a été augmentée de 1,33 %, et sa durée de vie utile prolongée de 30 ans.

30. En Amérique du Nord, le Canada a investi considérablement dans des projets de prolongation de la durée de vie, et le redémarrage de Darlington-2 est prévu en 2020. Aux États-Unis d'Amérique, la durée de vie utile de la plupart des réacteurs a été étendue à 60 ans. La Commission de la réglementation

nucléaire (NRC) a approuvé la demande de Florida Power & Light de prolonger de 20 années supplémentaires l'exploitation des tranches 3 et 4 de la centrale nucléaire de Turkey Point, acceptant ainsi pour la première fois que la durée de vie utile de réacteurs passe de 60 à 80 ans.

31. Les centrales nucléaires continuent de gagner en fiabilité. La figure A-4 indique le nombre d'arrêts d'urgence ou arrêts non programmés effectués manuellement ou automatiquement pour 7 000 heures d'exploitation d'une tranche (environ un an).

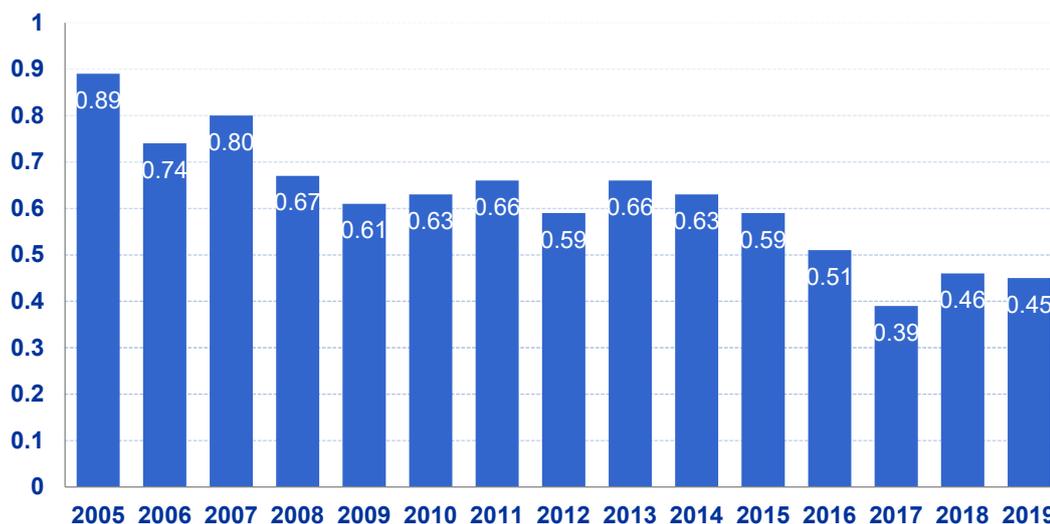


FIG. A-4. Taux moyen d'arrêts d'urgence : nombre d'arrêts non programmés, automatiques ou manuels, pour 7 000 heures d'exploitation d'une tranche.
(Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA www.iaea.org/pris)

A.1.2. Nouveaux projets dans le cadre de programmes électronucléaires existants

32. Sur les 30 États Membres qui exploitent des centrales nucléaires, 15 s'emploient à construire de nouveaux réacteurs nucléaires de puissance, soit 45 projets de réacteurs en cours d'une capacité nette totale de 46 567 MWe. La figure A-5 montre le nombre de tranches en construction et la capacité nette totale correspondante pour chacun de ces pays.

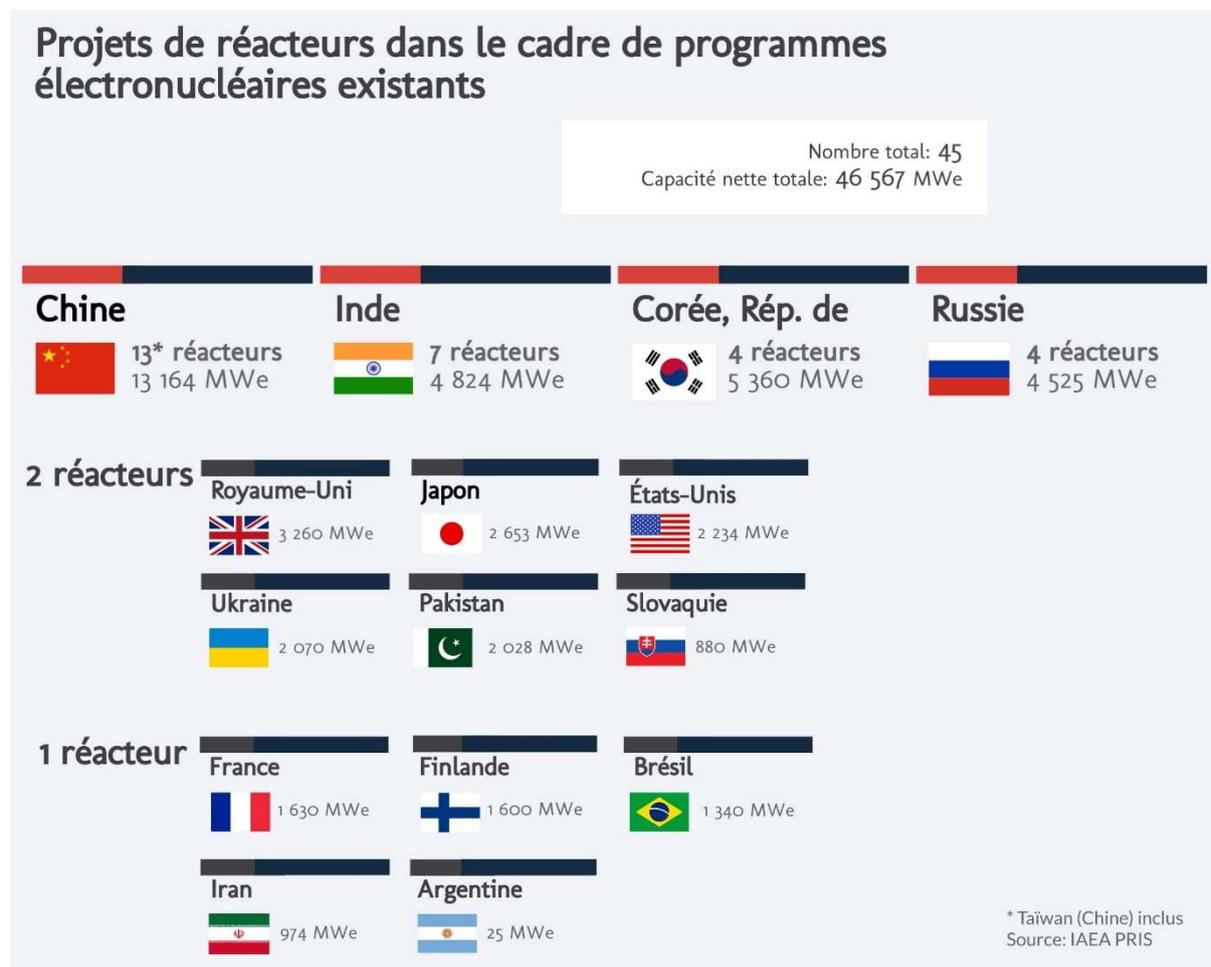


FIG. A-5. Quinze États Membres menant un programme électronucléaire construisent des réacteurs supplémentaires.

33. En 2019, la Chine a couplé un deuxième réacteur EPR (Taishan-2) au réseau ainsi qu'un réacteur APCR-1000 (Yangjiang-6), ce qui porte à 48 le nombre total de ses réacteurs nucléaires de puissance en exploitation. Avec les quatre réacteurs en service à Taïwan (Chine), la capacité nucléaire totale du pays s'élève à 49 362 MWe. Dans le même temps, la Finlande et la France ont annoncé leur intention de coupler leurs réacteurs EPR au réseau en juillet 2020 et à la fin de 2022, respectivement. Au Royaume-Uni, la première coulée de béton du radier d'Hinkley Point C a été effectuée.

34. En juin 2019, en Fédération de Russie, Rosenergoatom a reçu l'autorisation d'exploiter la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov jusqu'en 2029 et, en décembre, les réacteurs ont été couplés au réseau (pour plus d'informations, voir le paragraphe 152).

35. L'Inde, qui a 22 réacteurs en service et sept en construction, devrait mettre en service 21 nouveaux réacteurs nucléaires de puissance, d'une capacité de production totale de 15 700 MWe, d'ici à 2031.

A.1.3. Pays primo-accédants

36. Sur les 28 États Membres qui ont exprimé leur intérêt pour l'électronucléaire, 18 ont entamé des études sur l'infrastructure électronucléaire, quatre ont déjà pris une décision et commencé à mettre en place une capacité institutionnelle et l'infrastructure nécessaire en vue de la passation d'un marché pour une centrale nucléaire et du financement de celle-ci, un (l'Égypte) a signé un contrat et prépare la mise en chantier, deux (le Bangladesh et la Turquie) ont commencé les travaux de construction, et deux (le Bélarus et les Émirats arabes unis) ont presque achevé la construction de leur première centrale.

37. Aux Émirats arabes unis, la construction des quatre réacteurs de la centrale de Barakah est presque terminée, et l'autorisation d'exploiter les deux premières tranches devrait être accordée sous peu. Le chargement en combustible de la tranche 1 devrait intervenir au premier trimestre de 2020 et un an plus tard dans la tranche 2. Une mission de suivi EPREV (Examen de la préparation aux situations d'urgence) a été menée en septembre 2019.

38. Au Bélarus, la première centrale nucléaire est en cours de construction à Ostrovets. Le chargement en combustible de la première tranche devrait intervenir au premier trimestre de 2020, sous réserve de l'autorisation de l'organisme de réglementation, et la mise en service de la deuxième devrait avoir lieu en 2021. Le Bélarus a accueilli une mission ISSAS (Service consultatif de l'AIEA sur les systèmes nationaux de comptabilité et de contrôle des matières nucléaires) et une mission pré-OSART (Équipe d'examen préliminaire de la sûreté d'exploitation) en août 2019 et a demandé une mission INIR (Examen intégré de l'infrastructure nucléaire) - Phase 3, qui sera effectuée en février 2020.

39. Au Bangladesh, la construction de la centrale nucléaire de Rooppur est en cours, et les tranches 1 et 2 devraient être mises en service en 2023 et 2024, respectivement. Les études de sites pour la construction d'une deuxième centrale nucléaire sont en cours. Une mission IRRS (Service intégré d'examen de la réglementation) est prévue en 2020 ainsi que des missions IPPAS (Service consultatif international sur la protection physique) et ISSAS en 2021.

40. En Turquie, la construction de la première tranche de la centrale nucléaire d'Akkuyu, qui devrait entrer en service en 2023, s'est poursuivie, et l'autorisation de construire la deuxième a été délivrée. Une mission IPPAS est prévue en 2020 et une mission IRRS envisagée pour 2021.

41. En Égypte, la licence d'implantation de la centrale nucléaire à quatre tranches d'El Dabaa ayant été délivrée en mars 2019, les travaux devraient commencer mi-2020, sous réserve de l'autorisation de l'organisme de réglementation. La première tranche devrait être mise en service en 2026 et les suivantes d'ici à 2028. L'Égypte a accueilli une mission SEED (Site et conception basée sur les événements externes) en janvier 2019 et une mission INIR - Phase 2 en octobre-novembre 2019.

42. L'Arabie saoudite a poursuivi les préparatifs de la construction en parallèle d'un petit réacteur modulaire (PRM) et de deux grandes centrales nucléaires. La caractérisation du site de ces dernières est en cours. La caractérisation du site de ces dernières est en cours et la construction du réacteur avancé modulaire intégré (SMART) devrait commencer en 2023, la mise en service étant prévue en 2028.

43. La Jordanie a poursuivi les évaluations technologiques afin de sélectionner des PRM adéquats. Une centrale de 200 à 400 MWe utilisant la technologie de PRM sélectionnée doit être mise en service d'ici 2030. La construction d'une grande centrale nucléaire est prévue à plus long terme (après 2030).

44. Le Nigeria entend construire quatre réacteurs et prévoit officiellement de mettre en service le premier en 2027. La décision de reprendre l'étude de pré-faisabilité avant d'achever l'étude de faisabilité pourrait entraîner un report supplémentaire de cette date.

45. En Pologne, il a été décidé, à l'issue de consultations publiques, de mettre en œuvre le programme électronucléaire, et il est prévu de commencer la construction d'une centrale en 2020. La mise en service de la première tranche devrait avoir lieu en 2033.

46. L'Agence continue d'aider les États Membres à comprendre les engagements et les obligations liés à l'établissement de l'infrastructure électronucléaire nécessaire selon l'approche par étapes, qui favorise la mise au point de programmes électronucléaires sûrs, sécurisés et durables.

En 2019, les plans de travail intégrés et les profils nationaux d'infrastructure nucléaire des huit États Membres suivants ont été mis à jour dans le cadre de projets de coopération technique nationaux : Arabie saoudite (janvier), Turquie (janvier), Jordanie (février), Bélarus (mars), Pologne (mars), Philippines (novembre), Kenya (décembre) et Bangladesh (décembre). Avec la conduite d'une mission INIR - Phase 2 en Égypte et d'une mission INIR de suivi - Phase 1 au Ghana, le nombre de ces missions effectuées depuis 2009 est passé à 29 (dans 21 États Membres). De plus, près de 490 personnes originaires de 52 pays entreprenant ou développant un programme électronucléaire ont participé à 31 formations interrégionales organisées dans le cadre du projet de coopération technique INT2018 « Appui à la prise de décisions en connaissance de cause et à la création de capacités en vue du lancement et de la mise en œuvre de programmes électronucléaires » (figure A-6).

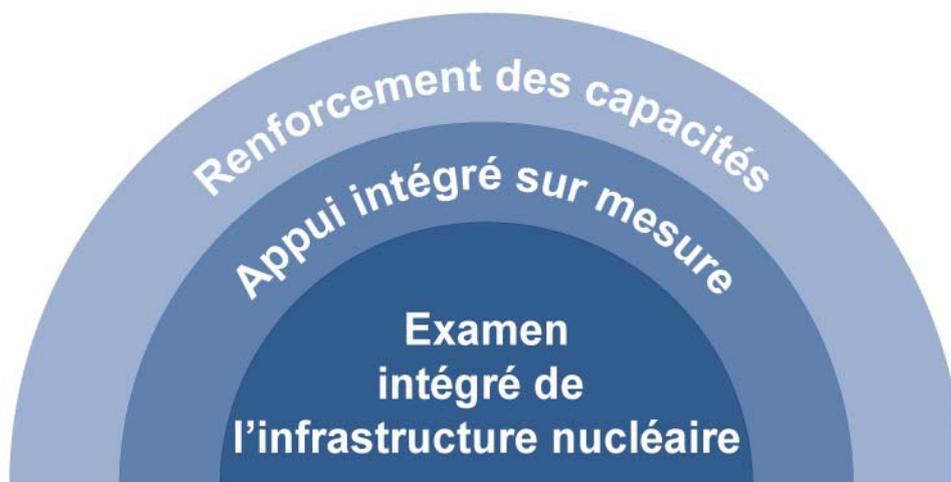


FIG. A-6. L'appui intégré de l'AIEA aux pays qui entreprennent de nouveaux programmes nucléaires contribue à préparer le terrain pour l'établissement d'une première centrale nucléaire au moyen de missions d'examen par des pairs, d'activités sur mesure visant à combler les lacunes et de création de capacités.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

47. Dans ses projections de 2019 (figure A-7), établies en consultation avec des experts régionaux et en tenant compte des dernières informations sur les politiques et les conditions du marché, l'Agence donne une estimation nuancée de la contribution future de l'électronucléaire à la production d'électricité mondiale, qui varie, notamment, selon que de nouvelles capacités substantielles peuvent être ajoutées pour compenser l'éventuelle mise à l'arrêt définitif de réacteurs. Dans la projection basse, la capacité nucléaire installée nette diminue progressivement d'ici à 2030 avant de remonter pour atteindre 371 GWe en 2050. Dans la projection haute, elle augmente jusqu'à atteindre 496 GWe d'ici à 2030 et 715 GWe d'ici à 2050, soit une hausse de 25 % d'ici à 2030 et de 80 % d'ici à 2050. L'électronucléaire constituerait 6 % de la capacité de production d'électricité mondiale en 2050 dans la projection basse et 12 % dans la projection haute, contre environ 10 % aujourd'hui.

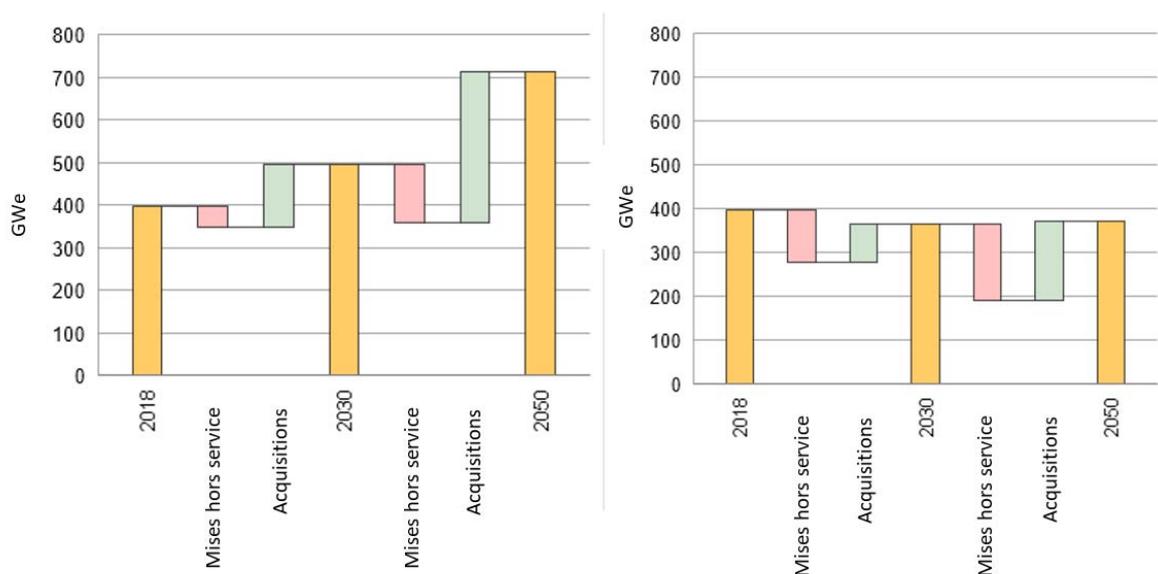


FIG. A-7. Projections haute (à gauche) et basse (à droite) de la capacité nucléaire mondiale.
(Source : Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050,
IAEA Reference Data Series No. 1, 2018)

48. L'écart important entre les projections est dû aux incertitudes concernant le remplacement du grand nombre de réacteurs devant être retirés du service vers 2030 et après, en particulier en Amérique du Nord et en Europe. Les incertitudes sont toutefois moins nombreuses dans les projections de 2019 que dans celles des années précédentes compte tenu des annonces récentes concernant l'avenir du parc existant dans certaines régions et les projets d'expansion à long terme. De nouvelles capacités substantielles pourraient être nécessaires pour compenser l'éventuelle mise à l'arrêt définitif de réacteurs en raison de leur âge, de leur manque de compétitivité ou d'autres facteurs.

49. Combiné à d'autres technologies sobres en carbone, l'électronucléaire peut satisfaire la demande croissante d'énergie électrique et non électrique jusqu'en 2050 dans le cadre d'une transition énergétique durable. Au total, 90 % et 60 % des scénarios d'atténuation des changements climatiques les plus rigoureux donnent une estimation de la production d'électricité d'origine nucléaire en 2050 supérieure aux dernières projections basse et haute de l'Agence, respectivement.

Dans leurs scénarios énergétiques mondiaux, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et l'Agence internationale de l'énergie, les gouvernements, les entreprises et les organisations non gouvernementales envisagent que l'électronucléaire contribue davantage à l'atténuation des changements climatiques afin d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Cette idée apparaît également dans les conclusions de la [Conférence internationale sur les changements climatiques et le rôle de l'électronucléaire](#) organisée par l'Agence en octobre 2019, en coopération avec l'OCDE/AEN.

50. Comparativement aux politiques et aux tendances commerciales actuelles prises en compte dans les projections de l'Agence et aux objectifs d'atténuation modestes définis dans les contributions déterminées au niveau national que les pays ont soumises au titre de l'Accord de Paris, les scénarios montrent qu'il faudra redoubler d'efforts pour exploiter pleinement le potentiel considérable de l'électronucléaire en matière d'atténuation afin d'atteindre les objectifs climatiques mondiaux ambitieux.

A.3. Cycle du combustible

A.3.1. Partie initiale

Ressources et production d'uranium

Les prix au comptant de l'uranium sont restés bas en 2019, se situant généralement entre 52 et 57 \$/kgU. Ils restent relativement stables depuis 2018 (entre 47 et 59 \$/kgU) et ont diminué depuis 2013, ce qui a entraîné une forte réduction des programmes de prospection.

51. De nouveaux projets relatifs à l'uranium au stade de la planification ou du développement sont restés en suspens, et plusieurs mines et installations de traitement qui étaient en activité sont restées en régime d'entretien et de maintenance en raison des faibles prix au comptant de l'uranium. La production mondiale des mines en activité en 2019 devrait être similaire à celle de 2018, soit 53 498 tonnes d'uranium (tU), ce qui représente une diminution de près de 15 % depuis 2016.

52. Le Kazakhstan est resté le premier producteur d'uranium au monde. En 2019, huit mines de lixiviation in situ étaient en exploitation, leur production totale devant varier entre 22 000 et 23 000 tU (légèrement plus que les 21 705 tU de 2018). Au Canada, deuxième producteur mondial, la mine de Cigar Lake et l'usine de McClean Lake associée étaient les deux seules installations de production d'uranium en activité en 2019, avec une production devant s'établir à près de 7 000 tU ; deux autres mines et deux autres usines étaient en régime d'entretien et de maintenance pour une durée indéterminée en raison des faibles prix de l'uranium. En Australie, la production de la mine d'uranium Ranger a diminué en 2019 (entre 1 400 et 1 800 tU produites à partir des stocks, d'après les estimations), au fur et à mesure que les activités de déclassement et de remédiation se poursuivaient. La mine de cuivre Olympic Dam a produit de l'uranium (environ 3 000 tU en 2019) comme sous-produit et la mine de lixiviation in situ de Four Mile devrait avoir produit quelque 1 200 tU en 2019. Au total, entre 5 600 et 5 800 tU auraient été produites en Australie en 2019 (légèrement moins que les 6 517 tU de 2018, en raison de la baisse de production de la mine Ranger).

53. En Afrique, on trouve des mines d'uranium en activité en Namibie et au Niger. La Namibie en a quatre : deux en exploitation (Rössing et Husab, avec une production estimée à 2 220 et 3 028 tU, respectivement, en 2019) et deux en régime d'entretien et de maintenance en raison des faibles prix de l'uranium (Langer Heinrich et Trekkopje). Toutefois, une étude de préfaisabilité a été publiée fin 2019 en vue du redémarrage de la mine de Langer Heinrich dans un délai de 12 mois. Le Niger a deux mines d'uranium en exploitation, Somair et Cominak, dont la production en 2019 devrait être la même qu'en 2018 (1 769 tU pour Somair et 1 115 tU pour Cominak). La production totale d'uranium en Afrique est estimée à 8 100 tU en 2019.

54. La politique nationale de la Chine est d'assurer un approvisionnement en uranium abondant pour développer durablement l'électronucléaire à moyen et long terme. La Chine exploite actuellement sept mines d'uranium dont la production annuelle cumulée s'élève à 1 650 tU. En outre, le pays mène plusieurs projets de développement minier à l'étranger, principalement au Kazakhstan, en Namibie et au Niger.

55. Les études de faisabilité concernant la récupération d'uranium au centre de la Jordanie se poursuivent, et une usine expérimentale (basée sur la technologie de lixiviation en tas) sera mise en service sur le site concerné en 2020. Un projet d'usine de production de concentré d'uranium à Salamanque (Espagne) était également en cours d'évaluation.

Conversion et enrichissement

56. La capacité actuelle de conversion et d'enrichissement est plus que suffisante pour satisfaire la demande mondiale, bien que le marché soit segmenté et que la production soit essentiellement le fait d'un petit nombre de fournisseurs. À l'heure actuelle, cinq producteurs répondent à la plus grande partie de la demande mondiale d'hexafluorure d'uranium (UF_6), avec une capacité nominale de 62 000 tU par an mais une capacité utilisée de seulement 56 % (environ 34 500 tU produites) en 2019 (figure A-8). L'offre mondiale d'uranium enrichi provient essentiellement d'usines d'enrichissement commerciales et de sources secondaires, notamment d'uranium enrichi produit préalablement ou de résidus réenrichis. Les capacités d'enrichissement se situent essentiellement en Europe et en Fédération de Russie (Orano, URENCO et la corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom »), mais la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) commence à offrir des services d'enrichissement en Chine et prévoit d'étendre ces services à d'autres pays à l'avenir.

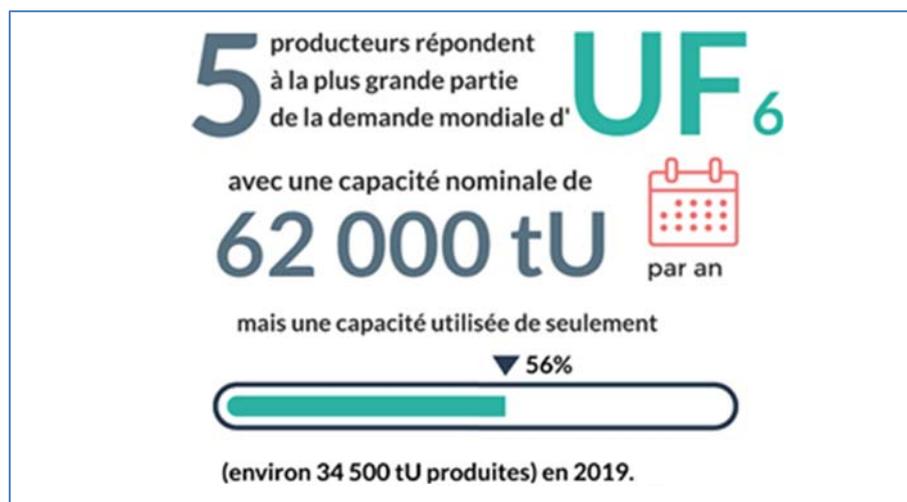


FIG. A-8. Capacité mondiale de conversion et d'enrichissement en 2019.

Fabrication de combustible

57. Pour se conformer à la stratégie de diversification des approvisionnements en combustible nucléaire de l'Agence d'approvisionnement EURATOM, la centrale nucléaire de Kozloduy (Bulgarie) a annoncé en février 2019 avoir conclu un contrat de 3,1 millions de leva (1,8 million d'e dollars) avec la branche suédoise de Westinghouse Electric pour que celle-ci étudie la possibilité d'utiliser du combustible amélioré dans les deux réacteurs de la centrale (5 et 6) et d'obtenir l'autorisation nécessaire à cette fin. La compagnie d'électricité tchèque ČEZ a déclaré en avril 2019 qu'elle allait charger dans la tranche 1 de la centrale de Temelin à des fins expérimentales un lot de six assemblages combustibles mis au point par la branche suédoise de Westinghouse Electric. La société de combustible russe TVEL (qui appartient à ROSATOM) est le principal fournisseur de combustible nucléaire des centrales de Kozloduy et de Temelin, qu'elle approvisionne régulièrement en combustible avancé de plus longue durée (TVSA-12 et TVSA-T.mod.2).

58. En février 2019, Westinghouse Electric a annoncé le lancement d'une nouvelle génération d'assemblages combustibles pour réacteur à eau bouillante (REB) (nom commercial : Triton11 ; nom technique : 11x11 BWR) conçus pour réduire sensiblement le coût du cycle du combustible et améliorer la fiabilité et la sûreté d'exploitation. Les nouveaux assemblages seront d'abord testés dans les tranches 1 et 2 de la centrale d'Olkiluoto (Finlande), dotée de REB ABB-III de 900 MWe.

59. En mars 2019, la CNNC a achevé le test d'irradiation de longue durée d'un assemblage combustible chinois pour REP et commencé la production en masse d'assemblages China Fuel 3 [à son

usine principale de fabrication de combustible pour REP à Yibin, dans la province du Sichuan (Chine), à partir de pastilles de combustible provenant de l'usine métallurgique d'Ulba (Kazakhstan)] pour le REP Hualong 1 (HPR1000), de conception chinoise.

60. Fabriqués par TVEL, deux assemblages combustibles expérimentaux avancés alliant quatre combinaisons différentes de pastilles de combustible (dioxyde d'uranium et alliage uranium-molybdène offrant une densité et une conductivité thermique accrues) et de matériaux de gainage (zirconium à revêtement de chrome ou alliages chrome-nickel) ont été chargés dans le réacteur de recherche MIR de l'Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires de Dimitrovgrad (Fédération de Russie) en janvier 2019 et testés durant 2019.

61. En avril 2019, Southern Nuclear et Framatome ont annoncé que les premiers assemblages combustibles résistants aux accidents, constitués de pastilles de combustible dopées au chrome et d'un matériau de gainage en alliage de zirconium revêtu de chrome, avaient été chargés dans la tranche 2 de la centrale Vogtle, dans l'État de Géorgie (États-Unis d'Amérique), pendant l'arrêt pour rechargement effectué au printemps. En octobre 2019, l'entreprise BWX Technologies a annoncé qu'elle s'apprêtait à reprendre la production de combustible TRISO à l'oxycarbure d'uranium sur son site de Lynchburg, dans l'État de Virginie (États-Unis d'Amérique).

62. En janvier 2019, TVEL a signé avec le Département indien de l'énergie atomique un contrat d'approvisionnement des réacteurs à eau bouillante de la centrale nucléaire de Tarapur en pastilles de combustible à l'uranium (50 tonnes de pastilles de combustible avaient été livrées en novembre 2019). En juillet 2019, TVEL a également signé un contrat avec Suneng Nuclear Power Corporation et China Nuclear Energy Industry Corporation, deux filiales de la CNNC, pour l'approvisionnement en combustible nucléaire des tranches 7 et 8 de la centrale de Tianwan, dans la province du Jiangsu (Chine). Toujours en juillet 2019, TVEL a livré d'importantes quantités de combustible nucléaire au réacteur à neutrons rapides expérimental de la Chine. En août 2019, TVEL a été désignée comme l'unique fournisseur de combustible pour les deux réacteurs de la centrale de Rooppur (Bangladesh), pour toute la durée de vie des réacteurs.

63. Le premier lot industriel de combustible à mélange d'oxydes comprenant 18 assemblages combustibles produits au Combinat chimique et minier de Zheleznogorsk (Fédération de Russie) a été reçu et chargé dans le réacteur à neutrons rapides BN-800 de la centrale nucléaire de Beloyarsk en août 2019. Les tests en réacteur d'un mélange régénéré de combustible (mélange retraité d'uranium et de plutonium) destiné aux réacteurs de puissance refroidis et modérés par eau (VVER) et d'un combustible composé de nitrate mixte d'uranium et de plutonium destiné aux réacteurs à neutrons rapides étaient également en cours en Fédération de Russie.

64. En septembre 2019, la compagnie nationale ukrainienne d'électricité nucléaire Energoatom et l'entreprise Westinghouse ont signé un accord préliminaire prévoyant la fabrication par cette dernière de combustible pour les réacteurs VVER-440 ukrainiens. En septembre 2019 également, des assemblages d'essai de barres de Westinghouse EnCore ont été chargés dans la tranche 2 de la centrale de Byron, exploitée par Exelon, au cours d'un arrêt pour rechargement planifié. Fabriquées au Laboratoire national de l'Idaho (États-Unis d'Amérique), ces barres se composent de pastilles de Westinghouse ADOPT de forte densité (dioxyde d'uranium dopé au chrome et à l'alumine, pour un meilleur rendement du combustible) et de pastilles de siliciure d'uranium (pour une sûreté accrue et un meilleur rendement de la centrale) enrobées d'une gaine de zirconium revêtu de chrome (pour une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion).

A.3.2. Assurance de l'approvisionnement

65. 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 l'installation de cette banque d'UFE dans l'usine métallurgique d'Ulba, à Ust-Kamenogorsk (Kazakhstan).

66. Cette banque créée au Kazakhstan (figure A-9) est devenue opérationnelle le 17 octobre 2019, lors de la réception à l'installation d'entreposage d'UFE de l'AIEA des 32 cylindres 30B pleins prévus dans le contrat d'approvisionnement conclu avec Orano Cycle. De plus, 28 cylindres 30B pleins prévus dans le contrat d'approvisionnement avec Kazatomprom ont été réceptionnés le 10 décembre 2019.



FIG. A-9. L'installation d'entreposage d'UFE de l'AIEA au Kazakhstan et des conteneurs d'UFE.
(Photo : Ministère kazakh des affaires étrangères)

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

Transport du combustible usé

68. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a validé le colis de transport HI-STAR 100MB de Holtec International en août 2019. Ce modèle a été conçu à partir d'un modèle existant qui a été amélioré pour permettre le transport de combustible dont le taux de combustion était plus élevé et le temps de refroidissement plus court. Les transferts de combustible usé à la centrale de San Onofre, qui avaient été suspendus en août 2018, ont repris en mai 2019. La NRC a approuvé la reprise des activités après avoir achevé son enquête sur un incident survenu lors du placement d'un conteneur de combustible usé dans la casemate d'entreposage.

69. En août, le Gouvernement du Bélarus a officiellement approuvé une stratégie de gestion du combustible usé pour la nouvelle centrale nucléaire du pays. Cette stratégie prévoit notamment l'envoi du combustible usé de la centrale nucléaire pour retraitement en Fédération de Russie et le retour des déchets radioactifs au Bélarus pour stockage définitif.

70. En Fédération de Russie, au chantier naval Nerpa, le transfert des assemblages de combustible nucléaire usé détériorés a commencé entre le Lepse, base technique flottante, et Mourmansk. À terme, il sera transporté à la centrale Mayak pour y être retraité dans le cadre d'un programme géré par la Banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD).

Entreposage du combustible usé

71. À ce jour, environ 400 000 tonnes de combustible nucléaire usé sous forme de métaux lourds ont été extraites des centrales nucléaires, dont approximativement 30 % ont été retraitées. 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. En 2019, plus de 6 630 assemblages de combustible usé RBMK-1000 des centrales de Leningrad et de Kursk ont été transférés et entreposés à sec au Combinat chimique et minier.

72. Au Japon, des photographies des débris de combustible dans l'enveloppe de confinement primaire du réacteur n° 2 de la centrale de Fukushima Daiichi ont été publiées en février. Après cette observation photographique, une étude plus approfondie a été effectuée au moyen d'un robot piloté à distance ; doté de capacités de manipulation, celui-ci a pu prélever des échantillons de débris à cinq emplacements différents à des fins de caractérisation et d'analyse. Les opérations visant à retirer 566 assemblages de combustible usé du réacteur n° 3 ont débuté en avril 2019, après que l'étage de service du réacteur eut été déblayé. Les assemblages seront transportés à la piscine commune, sur le site.

73. Au Royaume-Uni, un programme quinquennal de réemballage des anciens conteneurs de plutonium entreposés à Sellafield a débuté en août 2019 avec l'ouverture du premier conteneur et son réemballage dans un suremballage moderne plus robuste. Le déchargement du combustible des réacteurs Magnox a été achevé, et les derniers transferts de combustible usé des sites de Wylfa et de Calder Hall ont été effectués en septembre. Le combustible usé a été transporté à Sellafield, où il sera entreposé avant d'être retraité. Les travaux visant à retirer les derniers éléments fertiles du réacteur à neutrons rapides de Dounreay sont à moitié terminés. Il a fallu utiliser des outils télécommandés spécialisés pour retirer les éléments coincés qui avaient été laissés en place à la fermeture du réacteur, en 1977.

74. En Ukraine, les préparatifs de la mise en service de l'installation d'entreposage temporaire du combustible usé de Tchernobyl (destinée au traitement et à l'entreposage du combustible usé provenant des tranches 1, 2 et 3 de la centrale) se sont achevés en septembre 2019. L'installation entrera pleinement en service une fois que l'exploitant (la centrale nucléaire de Tchernobyl) aura obtenu une licence d'exploitation spécifique de l'organisme de réglementation.

Retraitement du combustible usé

75. Depuis la fermeture de l'usine de retraitement de combustible THORP au Royaume-Uni, la capacité mondiale annuelle de retraitement du combustible usé provenant des installations commerciales se situe aux alentours de 4 000 tonnes (elle pourrait augmenter une fois que l'usine de retraitement de Rokkasho sera à nouveau pleinement opérationnelle).

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

A.4.1. Déclassement des installations nucléaires

76. Au 31 décembre 2019, 186 réacteurs de puissance dans le monde étaient à l'arrêt ou en cours de déclassement. Dix-sept d'entre eux étaient entièrement déclassés et d'autres, plus nombreux, sont aux derniers stades du processus. Plus de 150 installations du cycle du combustible avaient été définitivement mises à l'arrêt ou étaient en cours de déclassement, et près de 130 avaient été déclassées (figure A-10).

Réacteurs de puissance



ont été mis à l'arrêt ou sont en cours de déclasserement.

17

sont entièrement déclassés.

Installations du cycle du combustible



ont été définitivement mises à l'arrêt ou sont en cours de déclasserement.



sont déclassés.

FIG. A-10. État du déclasserement dans le monde en 2019.

77. Au 31 décembre 2019, plus de 560 réacteurs de recherche et assemblages critiques avaient été définitivement mis à l'arrêt : environ 440 étaient entièrement déclassés, près de 70 réacteurs de recherche étaient en cours de déclasserement, et environ 60 étaient en attente de déclasserement.

78. En septembre 2019, le Centre commun de recherche de la Commission européenne a signé un accord avec Sogin, l'entreprise publique italienne responsable du déclasserement et de la gestion des déchets radioactifs, concernant le démantèlement du réacteur de recherche ISPRA-1.

79. La mise en place de techniques de déclasserement éprouvées et les travaux de recherche-développement favorisent l'amélioration continue, principalement dans les pays exécutant un programme électronucléaire important. La plateforme auto-ascendante conçue pour faciliter la démolition de la cheminée d'extraction d'une ancienne usine de retraitement à Sellafield est un exemple de technique innovante utilisée à bon escient (figure A-11).

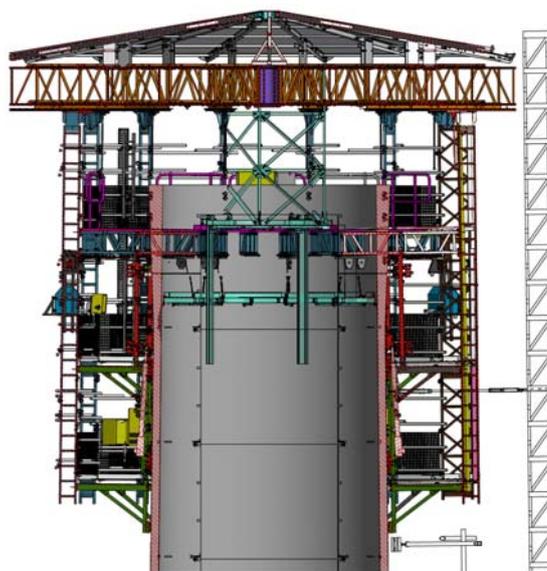


FIG. A-11. Plateforme auto-ascendante conçue pour faciliter la démolition de la cheminée d'extraction d'une ancienne usine de retraitement à Sellafield. (Photo : Sellafield Ltd)

80. La Bulgarie, la Lituanie, la Slovaquie et l'Ukraine continuent de progresser dans la mise en œuvre des projets de déclasserment de centrales nucléaires financés par la Banque européenne pour la reconstruction et le développement. Par exemple, à la centrale de Bohunice V-1, les générateurs de vapeur ont été retirés de la salle des réacteurs et transportés dans la salle des turbines pour y être découpés (figure A-12) et, à la centrale d'Ignalina, le projet de démantèlement du réacteur de grande puissance à tubes de force et d'entreposage de graphite a été lancé.



FIG. A-12. Enlèvement du dernier des 12 générateurs de vapeur de 145 tonnes de la centrale nucléaire de Bohunice V-1 déclassée, en Slovaquie. (Photo : Société de l'énergie nucléaire et du déclasserment JAVYS)

81. Le projet d'analyse en partenariat de la recherche au service du déclasserment « SHARE » (Stakeholder-based Analysis of Research for Decommissioning) proposé par plusieurs pays membres de l'Union européenne a été approuvé par la Commission européenne et a débuté mi-juin 2019. Il a pour objectif d'établir un plan d'action non exclusif pour la recherche dans des domaines techniques et non techniques avant la fin de l'année 2021, de sorte que les parties prenantes puissent conjointement améliorer la sûreté, réduire les coûts et atténuer autant que possible l'impact environnemental des activités de déclasserment des installations nucléaires.

82. L'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) a publié un plan d'action relatif à la partie terminale (Back-end Roadmap), dans lequel elle expose sa politique à long terme concernant le déclasserment de ses installations et le traitement et le stockage définitif des déchets radioactifs associés. Ce plan fera l'objet d'une mission du Service d'examen intégré portant sur la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, le déclasserment et la remédiation (ARTEMIS) en 2020.

83. En septembre 2019, l'Organisme japonais chargé de faciliter la réparation des dommages nucléaires et le déclasserment a publié le plan stratégique technique 2019 pour le déclasserment de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de Tokyo Electric Power Company, dans lequel il formule des recommandations concernant la détermination des méthodes de récupération des débris de combustible du réacteur n° 2, le premier à être déblayé. Les travaux de déclasserment du site de la centrale de

Fukushima Daichii se poursuivent, avec notamment les sondages internes du réacteur n° 2 et le retrait du combustible de la piscine d'entreposage du réacteur n° 3.

A.4.2. Remédiation environnementale

84. L'organisme d'exploitation Magnox a bien avancé dans la remédiation de l'ancienne usine de traitement des effluents liquides sur le site de Harwell (Royaume-Uni), d'une superficie de 4,2 hectares (figure A-13). Les travaux ont commencé en février 2018 et, fin octobre 2019, 54 000 tonnes de matières avaient été extraites, analysées et envoyées aux installations de stockage définitif hors-site appropriées. Tous les déchets extraits sont emballés dans des sacs de 0,9 mètre cube qui sont ensuite tous analysés par spectrométrie gamma à haute résolution. La remédiation devrait être achevée avant l'été 2020, et la levée des contrôles réglementaires et la restauration du site en 2021. À l'issue des travaux, le site sera remis à la disposition du propriétaire et réutilisé dans le cadre du projet de développement du campus de Harwell.



FIG. A-13. Images aériennes prises par drone montrant l'avancée des travaux de remédiation de l'usine de traitement des effluents liquides sur le site de Harwell (Royaume-Uni).
(Photos : Magnox Ltd)

85. En février 2019, l'exploitant de la mine d'uranium Ranger (figure A-14), Energy Resources of Australia, a achevé l'étude de faisabilité sur la fermeture de la mine, qui contient un programme de réhabilitation détaillé et une estimation des coûts associés (830 millions de dollars australiens). Des travaux de réhabilitation sont menés progressivement depuis 2012 et des progrès majeurs ont déjà été accomplis, comme le remplissage du puits n° 1 avec des résidus et des stériles, le déclassement d'une rampe d'exploration souterraine, l'extraction des résidus de l'installation d'entreposage des résidus pour les placer dans le puits n° 3, la construction et l'exploitation d'un concentrateur de saumure destiné à transformer l'eau de traitement et les premiers travaux de revégétalisation. Conformément aux autorisations obtenues, les activités d'extraction et de traitement doivent cesser au plus tard fin janvier 2021 et la réhabilitation doit être achevée avant fin janvier 2026. Un des principaux objectifs de cette dernière est de réconcilier l'écosystème du site avec celui du Parc national de Kakadu environnant afin qu'il puisse y être intégré un jour ou l'autre.



FIG. A-14. Mine d'uranium Ranger. (Photo : Energy Resources of Australia)

86. Aux États-Unis d'Amérique, l'Agence de protection de l'environnement a presque terminé les travaux de remédiation liés à une particularité marquante du site de l'usine de Mississippi Phosphates Corporation. Pour quelque 72 millions de dollars des É.-U., un système de couverture unique au monde a été installé au-dessus de la pile de gypse ouest d'une superficie d'environ 9 hectares. Ce système a pour élément principal le polyéthylène linéaire à basse densité, qui limitera l'infiltration de l'eau de pluie et réduira le lessivage des contaminants radiologiques et chimiques sur la pile. Il permet de fermer définitivement le site tout en réduisant autant que possible les risques pour la population et l'environnement. L'ancienne usine de production de phosphate de diammonium, inaugurée dans les années 1950, qui y était implantée a cessé ses activités en 2014 pour cause de faillite, et plus de 2,6 milliards de litres d'eau contaminée à l'acide et deux piles, sorte de monticules constitués de boues de phosphogypse et de gypse, sont restés sur place.

87. En décembre 2019, l'Italie a fait d'importants progrès dans la remédiation du site de Trisaia, terminant le retrait d'une structure en béton armé contenant des déchets radioactifs. Construite à la fin des années 1960, cette structure verticale en forme de prisme, de quelque 130 tonnes et 54 mètres cubes, se trouvait 6,5 mètres sous terre.

88. Le projet de déclassement de la piscine de refroidissement de la centrale de Tchernobyl a été achevé en 2019. Avant son lancement en 2014, plusieurs études radiologiques et écologiques ainsi qu'une étude de faisabilité et une évaluation de l'impact environnemental facilitées par l'Agence avaient été réalisées. Il en était ressorti qu'il était recommandé d'arrêter l'approvisionnement en eau des piscines de refroidissement pour que leur niveau puisse baisser et qu'un contrôle écologique et radiologique puisse être exercé pendant cette opération afin de garantir la sûreté permanente des personnes et de l'environnement. Les données relatives à ce contrôle ont montré que, dans l'ensemble, les changements écologiques et la redistribution des contaminants radiologiques s'étaient produits comme prévu dans l'étude de faisabilité. Le déclassement a fortement réduit les coûts opérationnels liés à la piscine de refroidissement et les risques d'inondation de la zone voisine. L'état écologique du site continue de s'améliorer d'année en année, et la santé et la sûreté continuent d'être assurées grâce aux restrictions en place dans la zone d'exclusion (figure A-15).

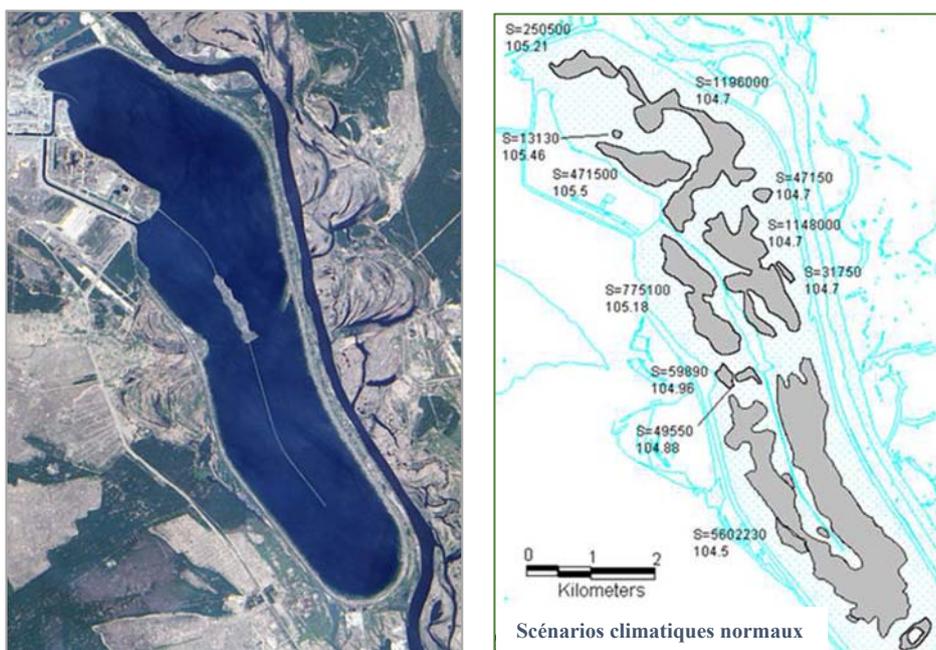


FIG. A-15. À gauche : photo aérienne de la piscine de refroidissement de la centrale de Tchernobyl avant le déclassement. À droite : simulation informatique montrant les zones d'eau restantes après le déclassement. (Photo : centrale de Tchernobyl)

A.4.3. Gestion des déchets radioactifs

Gestion des sources radioactives scellées retirées du service

Les options de gestion des sources radioactives scellées retirées du service (DSRS) en fin de vie, dont le stockage conjoint avec d'autres déchets dans des installations appropriées, sont étudiées activement. Des projets de stockage en puits sont mis en œuvre dans plusieurs pays, notamment au Ghana et en Malaisie. En Malaisie, le projet a été approuvé par l'organisme de réglementation de l'Agence nucléaire nationale en juillet 2019.

89. L'atelier mobile pour le conditionnement des DSRS des catégories inférieures (3 à 5) a été mis en service en juin 2019 en prévision du projet de stockage et expédié en Malaisie en septembre 2019. Le forage des puits devrait commencer début 2020.

90. En 2019, le Ghana a achevé la caractérisation et le conditionnement de DSRS des catégories 3 à 5, qui ont été transportées dans une installation d'entreposage centralisée en attendant d'être placées dans le système de stockage en puits sur un site de la Commission ghanéenne de l'énergie atomique.

91. Plusieurs opérations consistant à enlever des DSRS des locaux des utilisateurs et à les entreposer dans des conditions sûres et sécurisées ont été menées avec succès en 2019. La dernière DSRS de catégorie 1 restant en Macédoine du Nord a été retirée, et deux DSRS (catégories 1 et 2) ont été enlevées en Albanie.

92. L'enlèvement de sources de catégories 1 et 2 a commencé dans plusieurs autres États Membres, notamment à Chypre, en Croatie, en Jordanie, au Népal, au Nicaragua, en Slovénie et en Tunisie.

93. Les opérations de conditionnement des DSRS ont été achevées à Curaçao, et des formations théoriques et pratiques appropriées concernant la gestion des DSRS ont été dispensées au personnel local.

94. Des inventaires nationaux répertoriant les DSRS, en plus des sources scellées en utilisation, ont été établis et/ou mis à jour à Grenade, en Haïti, en Papouasie-Nouvelle-Guinée et à Saint-Vincent-et-les-Grenadines ainsi qu'à Curaçao.

95. Plusieurs États Membres, dont la Barbade, le Guyana, le Kenya et la Malaisie, ont renforcé leurs capacités de recherche et de récupération des sources orphelines grâce à des formations nationales et régionales.

96. Une vaste opération de mise à jour informatique du Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes est menée actuellement sur la base des contributions des États Membres et des parties prenantes internes. En 2019, les activités ont consisté à donner davantage de détails sur les sources et les dispositifs.

Gestion avant stockage définitif

97. Le projet avancé de traitement des déchets mixtes (Advanced Mixed Waste Treatment Project), mené sur le site du Laboratoire national de l'Idaho du Ministère de l'énergie américain (DOE) depuis 2003, s'est achevé avec succès en novembre 2019. Plus de 65 000 m³ de déchets transuraniens de moyenne activité provenant du laboratoire et de 15 autres sites du DOE ont été transformés au moyen de technologies d'extraction, de caractérisation et de traitement traditionnelles et de pointe, comme la robotique, en vue de leur stockage définitif à l'installation pilote de confinement des déchets (WIPP), au Nouveau-Mexique (États-Unis d'Amérique).

98. En juillet 2019, l'usine de transformation des déchets liquides de la centrale nucléaire de Tchernobyl est entrée en activité. Au mois de septembre 2019, 120 colis de déchets y avaient été préparés en vue de leur stockage définitif. La capacité nominale de l'usine est de 42 colis de 200 litres chacun par jour. Les 120 premiers colis ont été transférés sur le site Victor, où ils seront stockés définitivement.

99. En Finlande, la première pierre de l'usine d'encapsulation du combustible nucléaire usé a été posée, et la mise en chantier a commencé en septembre 2019. L'usine, qui préparera le combustible nucléaire usé au stockage définitif, est essentielle à la mise en œuvre du programme de stockage définitif finlandais et elle est en lien avec l'installation de stockage géologique, qui est en construction à Olkiluoto (Finlande) (figure A-16).



*FIG. A-16. Construction de l'usine d'encapsulation du combustible nucléaire usé de Posiva.
(Photo : Posiva)*

100. En Géorgie, un site a été proposé pour la construction d'une installation d'entreposage provisoire et d'une installation de traitement destinées à gérer les déchets hérités des activités menées dans le pays dans les années 1950 à 1980, notamment les sources et matières radioactives et les autres objets contaminés par des substances radioactives. L'Union européenne a financé la conception des installations et l'Autorité suédoise de sûreté radiologique, en collaboration avec l'Agence suédoise de coopération internationale au développement (ASDI), coordonne les procédures d'achat internationales à l'appui du projet et fournit une assistance au gouvernement géorgien. En République de Moldova, un projet de gestion des déchets radioactifs d'une installation de type Radon est en cours. Un plan détaillé et les documents techniques s'y rapportant sont actuellement mis au point pour faciliter la récupération et la gestion des déchets ainsi que la décontamination de l'installation.

101. En septembre 2019, le Royaume-Uni a publié une stratégie intégrée pour la gestion de tous les déchets radioactifs des 17 sites de l'Autorité du déclassement nucléaire, qui couvre à la fois les centrales nucléaires, les installations de retraitement du combustible usé, les établissements de recherche et les sites de stockage définitif. Par ailleurs, la décontamination des bunkers contenant des matières contaminées au plutonium sur le site du dépôt des déchets radioactifs de faible activité a été achevée, après six ans de travaux. Les matières contaminées ont été réemballées et transportées dans des installations d'entreposage sûres à Sellafield (Royaume-Uni).

Stockage définitif

102. En 2019, des installations de stockage définitif des déchets de faible ou moyenne activité (DFMA) étaient en service dans de nombreux États Membres. Il s'agissait d'installations de stockage en tranchées des déchets de très faible activité (p. ex., Espagne, France, Suède) ou des déchets de faible activité (DFA) dans des régions arides (p. ex., Afrique du Sud, États-Unis d'Amérique), d'installations de stockage des DFA en surface ou à faible profondeur (p. ex., Chine, Espagne, Fédération de Russie, France, Inde, Japon, République tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie) et d'installations de stockage géologique des DFMA en structures artificielles à diverses profondeurs (p. ex., Allemagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, Hongrie, Norvège, République de Corée, République tchèque).

103. En outre, des capacités de stockage définitif des DFA sont en construction à l'installation de stockage nationale sur le site de Radiana, près de la centrale nucléaire de Kozloduy (Bulgarie), et sur le

site du dépôt de déchets nucléaires d'Anarak (République islamique d'Iran). La phase 1 de la construction de l'installation de stockage nationale devrait être achevée fin juillet 2021 et les opérations de stockage devraient commencer après la mise en service, en 2023 (figure A-17). En République islamique d'Iran, les installations d'appui opérationnel sont en chantier et devraient être terminées en 2022, la mise en service étant prévue en 2025.



FIG. A-17. Chantier de l'installation de stockage nationale sur le site de Radiana, près de la centrale nucléaire de Kozloduy. On peut voir le bâtiment administratif (à gauche), le bâtiment de réception et d'entreposage tampon des déchets (à droite) ainsi que la fondation en loess-ciment de la plateforme de stockage n° 1 (tout à droite).

104. En Lituanie, l'appel d'offres pour la construction d'une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur à la centrale nucléaire d'Ignalina a été publié en mars 2019, pour une mise en chantier prévue en 2020. En Belgique, la demande d'autorisation pour l'installation de Dessel a été soumise en février 2019.

105. En septembre 2019, les négociations entre la Croatie et la Slovénie concernant un éventuel dépôt commun de DFA ont conduit à la décision de construire et d'exploiter deux dépôts nationaux distincts. La Slovénie poursuivra l'élaboration de la demande d'autorisation de construction du dépôt de Vrbina, près de la centrale nucléaire de Krško, et la Croatie se consacrera à la mise en place d'un dépôt en casemates en béton à Čerkezovac.

106. L'étude technique d'un dépôt de DFA situé à El Tuwaitha (Iraq) et l'évaluation de la sûreté associée ont été achevées pendant l'été 2019 et soumises au Ministère iraquien de la science et de la technologie (l'exploitant) et au Ministère de l'environnement. L'étude technique a été financée par la Commission européenne.

107. Au Pakistan, un site a été sélectionné sur le plateau Pothohar pour la construction d'une installation de stockage des DFA en surface ou à faible profondeur, et les premiers travaux de conception ont commencé.

108. En Allemagne, les travaux de construction au dépôt de déchets de moyenne activité (DMA) de Konrad se poursuivent, et l'excavation du puits n° 2 de la station de transfert des déchets s'est achevée en juin 2019.

109. Des progrès considérables continuent d'être accomplis dans le stockage définitif des déchets de haute activité (DHA) dans plusieurs États Membres. La Finlande construit une installation de stockage en formations géologiques profondes, la Suède attend la décision finale concernant sa demande

d'autorisation, et la France finit de mettre au point sa demande d'autorisation pour l'installation Cigéo. En Finlande, des contrats ont été signés pour la construction des deux premiers tunnels de transport des déchets et des cinq premiers tunnels où les capsules de combustible nucléaire usé seront stockées. Les travaux devraient démarrer au début de l'année 2020 et durer deux ans et demi. L'organisme de réglementation a approuvé les informations supplémentaires transmises par la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) en réponse aux questions soulevées par le tribunal pour la terre et l'environnement dans le cadre de la procédure d'autorisation d'un dépôt en formations géologiques profondes. La décision finale appartient au Gouvernement suédois. En France, la construction du dépôt de DHA en formations géologiques profondes (Cigéo) dans l'argilite du CallovoOxfordien progresse, et la demande d'autorisation devrait être soumise en 2020.

110. D'autres États Membres ont aussi réalisé de grandes avancées programmatiques en ce qui concerne le stockage définitif des DHA. En Chine, l'autorisation finale de la construction d'un laboratoire de recherche souterrain dans la région de Beishan, dans le désert de Gobi (milieu granitique), a été délivrée le 6 mai 2019. Le laboratoire, qui sera construit à 560 mètres de profondeur, aura pour mission de déterminer si la roche granitique locale peut accueillir un dépôt de DHA en formations géologiques profondes, et d'autres États Membres intéressés pourront, sur demande, y mener des travaux ou participer aux recherches. De plus, les activités de sélection d'un site pour la construction d'un éventuel dépôt en couches argileuses en Chine progressent. Le premier projet a été achevé fin 2018 et accepté par l'Autorité chinoise de l'énergie atomique en octobre 2019. Deux sites potentiels ont été retenus en vue d'études plus approfondies.

111. Au Royaume-Uni, le nouveau programme de choix du site pour un dépôt de DHA en formations géologiques profondes a été lancé en Angleterre (décembre 2018) et au Pays de Galles (janvier 2019). Radioactive Waste Management (RWM) Ltd. (l'exploitant) s'entretient activement avec les collectivités potentiellement intéressées et avec le grand public pour sensibiliser les citoyens, répondre à leurs questions et discuter de la mise en place d'une installation de stockage géologique. Il a procédé à un examen de haut niveau des données géologiques relatives à la sûreté d'une installation de stockage géologique afin d'éclairer les premières discussions.

112. Aux États-Unis d'Amérique, le Bureau du DOE à Carlsbad et Nuclear Waste Partnership ont attribué un contrat pour la construction d'un nouveau puits de service à l'installation pilote de confinement des déchets (WIPP). Le nouveau puits est un élément central des initiatives visant à rétablir la pleine capacité du dépôt de DFMA de Carlsbad, au Nouveau-Mexique, qui a été rouvert le 9 janvier 2017 et a réceptionné un premier chargement le 10 avril 2017.

B. Fission avancée et fusion

B.1. Fission avancée

113. Les réacteurs nucléaires avancés et leurs applications connaissent un essor dans toutes les régions du monde, étant considérés comme de nature à contribuer à la conversion généralisée à des systèmes énergétiques plus durables, moins chers et plus fiables. En outre, ils sont plus aptes à s'intégrer dans les futurs systèmes énergétiques décarbonés, qui seront segmentés en plusieurs grands créneaux occupés, en parts variables, par diverses sources de production d'électricité. Plus particulièrement, la technologie des RFMP semble riche de promesses, car elle permet de satisfaire les besoins en électricité propre en charge de base, tout en étant suffisamment évolutive pour être conciliable avec diverses énergies renouvelables et répondre à la demande. Ces réacteurs sont aussi particulièrement adaptés pour des applications non énergétiques de l'électronucléaire telles que le dessalement, la production d'hydrogène,

le chauffage et le refroidissement urbains, de même que pour plusieurs applications industrielles grandes consommatrices d'énergie.

B.1.1. Réacteurs refroidis par eau

114. Plusieurs modèles de réacteurs refroidis par eau dotés de technologies évolutives et innovantes sont aujourd'hui en cours de construction, de mise en service ou d'exploitation dans le monde. Nombre des enseignements tirés au cours des 50 années d'exploitation de ces réacteurs continuent d'être appliqués. Parmi les dernières avancées enregistrées pour ce type de réacteurs, on peut citer les améliorations apportées aux modèles existants et la mise au point de nouveaux modèles, l'objectif étant toujours de renforcer la sûreté, d'utiliser plus efficacement les ressources et d'accroître la rentabilité. Dans la plupart des concepts évolutifs, les systèmes de sûreté intègrent des fonctionnalités passives qui ne nécessitent pas d'alimentation électrique, disposent de réserves d'eau accrues et permettent dès lors un fonctionnement pendant plusieurs jours, au lieu de quelques heures, dans des conditions de fonctionnement imprévues (perte totale et prolongée des alimentations électriques, par exemple). Un autre point important de l'évolution des réacteurs refroidis par eau concerne la conception, la mise à l'essai et la construction en usine de petits réacteurs modulaires à eau sous pression (REP) intégrés (voir la section B.2.2).

115. L'Argentine prévoit l'implantation d'un réacteur à eau lourde (REL) CANDU 6 et envisage de se doter d'un REP de type HPR1000. Elle compte également développer toutes les capacités de production de combustible. Des possibilités de partenariats sont à l'étude pour le redémarrage et l'achèvement de la construction de la centrale Angra 3 du Brésil, dont l'exploitation commerciale devrait commencer d'ici à 2026.

116. Au Canada, la rénovation des centrales de Darlington et de Bruce, en Ontario, devrait être menée à terme d'ici à 2032, grâce à des investissements à hauteur de 26 milliards de dollars canadiens, et la centrale nucléaire de Pickering devrait être mise à l'arrêt d'ici à 2025. L'Argentine, la Chine, la Roumanie et le Royaume-Uni envisagent la construction de nouveaux réacteurs CANDU.

117. La Chine reste le pays qui met en œuvre le programme national de développement des réacteurs avancés à eau ordinaire le plus ambitieux. Le gouvernement a relancé le processus d'approbation de nouvelles centrales et envisage de mettre en œuvre un régime de tarification du carbone. Toutes les nouvelles centrales seront opérées de manière entièrement numérique, y compris pour ce qui est du contrôle-commande et des systèmes de protection des réacteurs. Les neuf tranches de la centrale de Qinshan maintiennent un facteur de capacité d'environ 90 % depuis 2013. En ce qui concerne les REL en Chine, l'accent est mis sur l'exploitation à long terme et les questions liées à la prolongation de la durée de vie des tubes de force, ainsi que sur les préparatifs en vue du remplacement de ces derniers.

118. D'après les projections, l'Inde serait à l'origine de 25 % de l'augmentation de la demande mondiale d'énergie d'ici à 2040. Le parc actuel sera développé grâce à l'implantation de REL indiens de 700 MWe et de technologies de REP importées. Le Centre de recherche atomique Bhabha met au point un REP avancé à quatre boucles d'environ 900 MWe (le réacteur à eau ordinaire sous pression indien) ainsi que les installations d'essai spécialement conçues à cet effet. La chaîne logistique de fabrication de l'Inde s'est améliorée.

119. Au Pakistan, une nouvelle demande de renouvellement d'autorisation concernant le REL de la centrale nucléaire de Karachi a été soumise pour la période 2019-2024.

120. Ayant réorienté sa politique énergétique nationale, la République de Corée envisage de réduire progressivement le recours au nucléaire et ne prévoit aucune nouvelle centrale. Néanmoins, la Compagnie d'électricité de Corée entreprend de mettre au point des REP pour l'exportation, ajoutant à son réacteur APR1400 un REP avancé d'un GWe et un REP innovant de 1 250 MWe entièrement passif,

baptisé iPOWER. Les activités de R-D relatives aux REL concernent principalement l'exploitation à long terme, la gestion de la durée de vie du canal de combustible et le remplacement des tubes de force, ainsi que les lignes directrices pour la gestion des accidents graves. Les tranches 2, 3 et 4 de la centrale de Wolsong pourraient bien devenir les premiers réacteurs CANDU 6 dans lesquels la durée de vie nominale des tubes de force sera prolongée grâce à la gestion de la durée de vie du canal de combustible.

121. En Roumanie, la rénovation de la tranche 1 de la centrale de Cernavodă devrait commencer en 2026, une fois que la durée de vie des tubes de force aura été prolongée au-delà des 210 000 heures de leur durée de vie nominale.

122. La Fédération de Russie a continué de se concentrer sur les moyens d'allonger la durée de vie de ses 20 VVER en service et d'augmenter leur capacité de l'ordre de 4 à 10 %. Les prolongations de la durée de vie relèvent de facteurs techniques et économiques et devraient se traduire par un gain de 11 à 30 ans. Trente-six réacteurs VVER ont été commandés à Rosatom de par le monde ; ils en sont actuellement à différents stades de négociation, de planification et de construction.

123. Aux États-Unis d'Amérique, les 98 réacteurs nucléaires exploités dans 60 centrales nucléaires de 30 États fournissent environ un cinquième de l'électricité totale produite annuellement dans le pays. Leur âge moyen est d'environ 38 ans. L'exploitation commerciale du plus ancien réacteur nucléaire de puissance en service, la tranche 1 de Nine Mile Point, dans l'État de New York, a commencé en décembre 1969. Le réacteur le plus récent, raccordé en 2016, est la tranche 2 de Watts Bar. Les deux nouveaux réacteurs en construction – les tranches 3 et 4 de Vogtle (Géorgie), toutes deux basées sur la technologie Westinghouse AP1000 – devraient entrer en service entre 2021 et 2022.

124. Le Canada, la Chine, la Fédération de Russie, le Japon et l'Union européenne sont signataires de l'arrangement-système prévoyant la participation à des activités conjointes de R-D visant à mettre au point des concepts de réacteurs refroidis par eau supercritique (RESC) (figures B-1 et B-2). Le principal objectif recherché avec ce type de réacteur est de produire de l'électricité de manière efficace, économique et sûre. La majorité des centrales qui en seront dotées sont conçues pour produire plus de 1 000 MWe d'électricité à des pressions de fonctionnement d'environ 25 MPa et des températures en sortie de réacteur comprises entre 500 et 625 °C. Par conséquent, les RESC pourraient produire de l'électricité avec une efficacité thermique de 43 à 48 %, bien supérieure à celles du parc actuel de réacteurs nucléaires. La température élevée en sortie du cœur des RESC facilite la cogénération, notamment la production d'hydrogène, le chauffage et la production de vapeur.

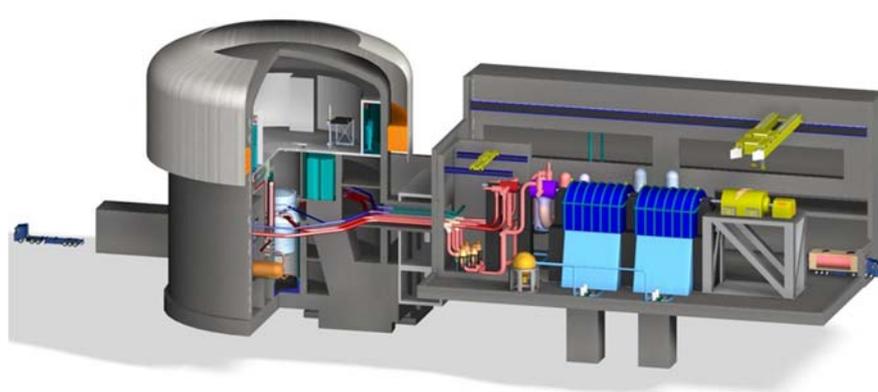


FIG. B-1. Modèle de RESC canadien : bâtiments du réacteur et des turbines. (Source : AIEA)

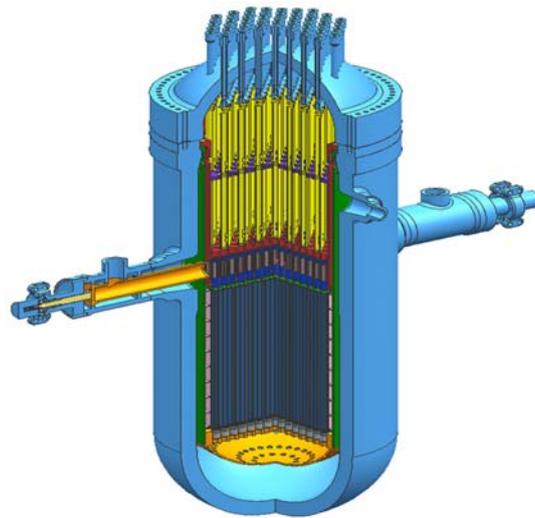


FIG. B-2. Schéma du cœur du modèle chinois de RESC. (Source : AIEA)

B.2. Systèmes à neutrons rapides

125. Le premier réacteur de ce type à produire de l'électricité en 1951, aux États-Unis d'Amérique, a été le surgénérateur expérimental I. Ce réacteur de 100 kWe était refroidi à l'aide d'un alliage sodium-potassium de métal liquide. Depuis lors, la technologie de réacteur à neutrons rapides la plus aboutie, le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), s'est développée dans le monde entier, les tranches expérimentales, prototypes, modèles de démonstration et tranches commerciales exploités notamment en Allemagne, en Chine, aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie, en France, en Inde, au Japon et au Royaume-Uni totalisant plus de 400 années-réacteur d'expérience d'exploitation. Plusieurs modèles innovants de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (Génération IV), de réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb et à l'eutectique plomb-bismuth (RNR-Pb) et de réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNR-G) sont en cours d'élaboration aux niveaux national et international. Le réacteur rapide à sels fondus est aussi mis au point en tant qu'option à long terme.

126. En République populaire de Chine, le RNR-Na innovant de démonstration CFR-600 est en cours de conception et de construction, sa mise en service étant prévue pour 2025. Plusieurs instituts mettent au point des RFMP refroidis au plomb et au plomb-bismuth, y compris des systèmes hybrides (ADS). Qixing (Venus) III, le premier réacteur sous-critique de puissance nulle de la Chine, qui utilise un alliage plomb-bismuth, a divergé pour la première fois le 9 octobre 2019 (figure B-3). Cet ADS de puissance nulle servira à des recherches sur la transformation de déchets radioactifs à longue période en déchets à courte période.



FIG. B-3. Le réacteur Qixing (Venus) III diverge pour la première fois.
(Photo : Institut chinois de l'énergie atomique)

127. L'Inde a atteint l'étape finale de la construction du prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe prévu dans le cadre de son programme électronucléaire en trois phases : le réacteur, qui en est à un stade avancé des opérations de mise en service, devrait diverger pour la première fois en 2020. Ce prototype succèdera à un petit réacteur d'essai de 12 MWe construit par le Centre de recherche atomique Indira Gandhi en 1985. Deux autres réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides sont prévus pour le même site à Kalpakkam.

128. Depuis 1980, la Fédération de Russie exploite le BN-600, prototype industriel de RNR-Na. Un autre RNR-Na d'une puissance de 880 MWe, le BN-800, est exploité commercialement depuis 2016. En août 2019, les essais hydrauliques de la cuve du réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides (MBIR) (figure B-4), qui doit remplacer le réacteur expérimental BOR-60 en 2024, ont été menés à bien. Le réacteur refroidi au plomb BREST-OD-300 et le réacteur refroidi au plomb-bismuth SVBR-100 sont au stade de la procédure d'autorisation.



FIG. B-4. Installation du MBIR.

129. Le Gouvernement français a décidé de prolonger son programme de R-D sur la technologie de RNR-Na et de reporter les plans de construction de son prototype de RNR-Na de Génération IV (Astrid). La Belgique a décidé de construire MYRRHA, réacteur refroidi au plomb-bismuth, qui peut fonctionner en mode sous-critique et critique en tant qu'ADS ; la première installation devrait être mise en service d'ici la fin de l'année 2024. La conception du réacteur avancé refroidi au plomb suédois (SEALER) de 55 MWe (figure B-5) destiné à la centrale SEALER-UK a été soumise au Ministère britannique de l'économie, de l'énergie et de la stratégie industrielle pour examen. Parmi les autres modèles de réacteurs à neutrons rapides en cours d'élaboration en Europe, on peut citer ALFRED, le RNR-Pb européen avancé de démonstration de Génération IV aux caractéristiques de type PRM, que la Roumanie a proposé de construire à Mioveni, et ALLEGRO, un RNR-G expérimental.

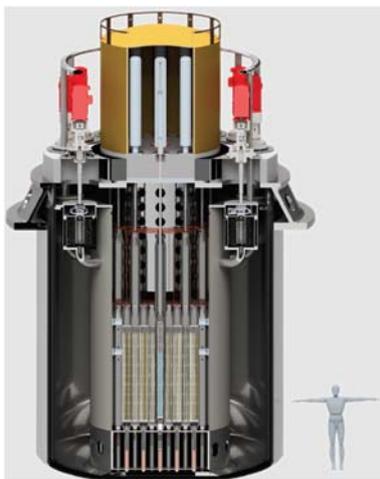


FIG. B-5. Modèle de RNR-Pb de 55 MWe destiné à la centrale SEALER-UK.

130. Aux États-Unis d'Amérique, TerraPower a achevé l'étude de conception du cœur du réacteur à onde progressive de type « breed-and-burn ». Westinghouse élabore actuellement un petit réacteur modulaire innovant de 450 MWe refroidi au plomb. En février 2019, le Ministère de l'énergie des États-Unis a annoncé qu'il prévoyait de construire un réacteur d'essai polyvalent qui sera employé dans le cadre d'études sur l'irradiation par des flux neutroniques de très haute énergie.

131. L'AIEA aide ses États Membres à développer la technologie de réacteurs à neutrons rapides en organisant et en menant des projets de recherche coordonnée (PRC), des ateliers et des études thématiques. En particulier, deux PRC essentiels pour l'évolution de la technologie des réacteurs à neutrons rapides sont actuellement mis en œuvre : le premier porte sur la référenciation des calculs neutroniques des essais de démarrage du réacteur rapide expérimental chinois et le second sur une analyse multiphysique d'une expérience sur la perte de débit sans protection à l'installation d'essai à neutrons rapides des États-Unis.

B.2.1. Réacteurs refroidis par gaz

132. Bien qu'ils existent depuis de nombreuses années, les seuls réacteurs refroidis par gaz encore exploités commercialement sont les 14 modèles avancés du Royaume-Uni. Certains d'entre eux devraient rester en service jusqu'au début des années 2030, mais leur durée de vie utile est limitée, principalement en raison du comportement du graphite nucléaire.

133. Les réacteurs refroidis par gaz actuellement mis au point en vue d'une implantation à court terme sont tous de petits réacteurs modulaires à haute température refroidis par gaz (RHTRG). Ces modèles qui sont dotés de caractéristiques de sûreté intrinsèque permettent de se passer des systèmes de sauvegarde les plus actifs, le confinement de la radioactivité étant assuré par l'enrobage du combustible à particules. Ils utilisent de l'hélium en tant que caloporteur et du graphite comme modérateur et fonctionnent à des températures plus élevées (au moins 700 °C) que les centrales nucléaires actuelles, ce qui rend leur production d'électricité plus économique et pourrait leur permettre d'alimenter une part importante du marché de la chaleur industrielle.

134. Au Canada, plusieurs activités préalables à l'autorisation de PRM sont en cours pour quatre modèles de RHTRG. La Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a reçu la première demande d'autorisation pour un petit RHTRG modulaire. La demande déposée par Global First Power, appuyée par Ontario Power Generation et Ultra Safe Nuclear Corporation, porte sur l'implantation d'une centrale dotée d'un micro-réacteur modulaire de type RHTRG à Chalk River, en Ontario.

135. En Chine, l'exploitation commerciale du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM) devrait commencer en 2020. Cette centrale de démonstration en taille réelle de 210 MWe comprend deux tranches couplées à une seule turbine. Pour l'avenir, la même configuration de réacteurs et de générateurs de vapeur (six unités) sera couplée à une seule turbine de 650 MWe dans le PM600, modèle commercial de réacteur à haute température ; plusieurs études de faisabilité sont à l'étude en vue d'une implantation en Chine. Le projet de renouvellement du réacteur d'essai à haute température HTR-10 a été mené à bien, et des tests supplémentaires de démonstration de la sûreté sont prévus.

136. Au Japon, l'autorisation de redémarrer le réacteur expérimental à haute température de 30 MWth devrait être accordée l'année prochaine. Des démonstrations supplémentaires de la sûreté, le couplage d'une turbine à l'hélium et la démonstration de la production nucléaire d'hydrogène à haute température couplée sont envisagés pour les années à venir. Par ailleurs, le Japon s'emploie activement à déployer à l'international des RFMP utilisant sa technologie des RHTRG dans le cadre de partenariats internationaux.

137. Aux États-Unis d'Amérique, des activités en lien avec la qualification de combustibles (essais d'irradiation et d'échauffement) sont en cours. Elles confirment l'excellente capacité de rétention des produits de fission du combustible TRISO. Les prescriptions de conception générales qui ont été publiées pour les réacteurs avancés et les RHTRG devraient faciliter la mise en place d'un cadre d'autorisation plus approprié dans le pays. Certaines activités de qualification de matériaux se poursuivent, et des installations d'essai devant démontrer les caractéristiques de sûreté passive bénéficient d'un appui. La conception du modèle à lit de boulets XE-100 de 75 MWe et les activités préalables à son autorisation sont toujours en cours.

138. De nombreux pays primo-accédants envisagent de se doter de RHTRG. L'Arabie saoudite a incorporé l'implantation de RHTRG dans son projet national relatif à l'énergie atomique aux fins de la mise en œuvre d'applications reposant sur la chaleur industrielle dans le secteur pétrochimique. La Jordanie a inclus les RHTRG dans ses études de faisabilité concernant le déploiement de RFMP pour la production d'électricité, le dessalement et la chaleur industrielle, et la Pologne envisage toujours de se doter de RHTRG pour des applications reposant sur la chaleur industrielle. En Indonésie, la construction du réacteur de puissance expérimental à lit de boulets de 10 MWth a été abandonnée, mais les travaux de R-D se poursuivent et un projet visant à mettre au point avec la Chine un réacteur de taille industrielle est en cours.

139. Des activités relatives au déploiement de RHTRG se poursuivent à la Commission européenne dans le cadre du programme GEMINI+, qui doit prendre fin en 2020. La mise au point de technologies se poursuit en République de Corée et en Fédération de Russie. En Afrique du Sud, les travaux de R-D sur le nouveau modèle AHTR-100 à lit de boulets ont été interrompus.

140. L'Agence développe et gère sa Base de connaissances sur le graphite nucléaire irradié, qui contient des données historiques et des connaissances destinées à faciliter le déploiement futur de réacteurs modérés au graphite.

141. Par ailleurs, les PRC de l'Agence portant sur les incertitudes dans l'analyse des réacteurs, sur l'élaboration de critères de conception de la sûreté pour les RHTRG modulaires et sur l'application de la chaleur des RHTRG pour une extraction de minerai plus propre et durable ont tous les trois été achevés. Les rapports finals les concernant sont en cours d'élaboration.

142. En réponse à l'intérêt croissant des États Membres et à leur demande, l'Agence a mené un petit nombre d'activités portant sur les réacteurs à sels fondus (RSF). Un document sur l'état d'avancement de la technologie de ces réacteurs fondé sur les activités de R-D menées dans les États Membres est en cours d'élaboration. Parmi les questions suscitant un intérêt qui concernent aussi les réacteurs refroidis

par gaz, on peut notamment citer les matériaux résistant aux hautes températures, le comportement du graphite et le combustible à particules (qui est utilisé dans les modèles de réacteurs à sels fondus).

B.2.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires

143. Le développement de la technologie des réacteurs de faible ou moyenne puissance ou des petits réacteurs modulaires (RFMP) en vue d'une implantation immédiate ou à court terme est en progression à l'échelle mondiale. Lors de la Conférence internationale sur les changements climatiques et le rôle de l'électronucléaire, organisée par l'Agence en octobre 2019, les États Membres participants ont indiqué que les RFMP, d'une puissance de 300 MWe en règle générale, pourraient constituer la source d'électricité exempte de CO₂ la plus efficace pour remplacer les centrales à combustibles fossiles vieillissantes. Par ailleurs, compte tenu de l'importance grandissante de l'énergie renouvelable intermittente sur tous les continents, les RFMP sont jugés indispensables pour assurer une exploitation à la fois en charge de base et en régime flexible, en synergie avec les énergies renouvelables, afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

144. En ce qui concerne l'implantation à grande échelle des RFMP, les deux grands défis qui se posent consistent, d'une part, à démontrer que la modularité permettra de baisser, comme promis, les coûts moyens du fait des économies réalisées grâce à la production en série et, d'autre part, à déterminer si la simplification de la conception et la réduction des délais de construction permettront ou non de mettre en place des mécanismes de financement plus simples et plus accessibles. Entre les pays qui détiennent la technologie et les pays primo-accédants dont les économies se développent, il subsiste de gros déséquilibres pour ce qui est de parvenir à une compréhension commune des prescriptions et des critères permettant de définir une conception et une technologie des RFMP qui soient réalisables. C'est pourquoi il est primordial d'établir les principales prescriptions génériques pour les utilisateurs de ces réacteurs en veillant à ce que différentes politiques soient prises en considération.

145. On compte plus de 50 modèles et concepts de RFMP qui sont à différents stades de développement aux fins de diverses applications.

146. La construction de deux nouvelles centrales nucléaires dotées de petits réacteurs modulaires (PRM) s'est achevée en Chine et en Fédération de Russie. Les opérations de mise en service et de démarrage sont en cours pour préparer leur raccordement au réseau électrique en vue d'une possible exploitation commerciale en 2020.

147. En Argentine, le prototype CAREM-25 se trouve à un stade de construction avancé sur le site de la centrale nucléaire Néstor Carlos Kirchner ; le chargement en combustible, la mise en service et le démarrage sont prévus pour septembre 2022. Le prototype est conçu pour atteindre une puissance brute de 100 MWth et 34 MWe. Ce PRM de type REP intégré, qui fonctionnera entièrement sur le principe de la circulation naturelle, sera doté de dispositifs de sûreté passive. Le CAREM-25 a été mis au point au moyen d'une technologie nationale, et au moins 70 % de ses composants et des services s'y rattachant ont été fournis par des entreprises argentines.

148. La feuille de route du Canada en matière de RFMP prévoit de possibles applications pour le remplacement, en réseau et hors réseau, de centrales alimentées par des combustibles fossiles et au diesel, y compris dans les industries pétrolière et minière. À l'heure actuelle, 12 concepteurs ou vendeurs de RFMP travaillent avec la CCSN, et Global First Power a soumis une demande en vue d'obtenir une licence de préparation de site pour un PRM aux laboratoires de Chalk River.

149. En Chine, la construction du HTR-PM, qui produira 210 MWe à partir de deux modules de réacteur reliés à un turbo-alternateur à vapeur, a été achevée et les opérations de mise en service sont en cours. De plus amples renseignements sur le HTR-PM sont communiqués à la section B.2.1. La Chine a par ailleurs mis en chantier le ACP100 dans le district de Changjiang, dans la province de Hainan ;

également appelé Linglong One, ce REP intégré d'une puissance de 125 MWe est conçu comme un petit réacteur de puissance polyvalent. Sa construction devrait durer cinq ans, la mise en service et le démarrage étant prévus pour 2025, avec pour objectif de produire de l'électricité, de la chaleur industrielle et de l'eau dessalée. En ce qui concerne la construction de RFMP immergés faisant appel à la technologie des REP, la Chine travaille actuellement à la conception de technologies pour trois modèles de RFMP flottants, en l'occurrence le ACPR50S, le ACP100S et le CAP-F.

150. Durant la 63^e session ordinaire de la Conférence générale de l'Agence tenue en septembre 2019, un consortium français réunissant le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Électricité de France et TechnicAtome, a annoncé le lancement de NUWARD, projet de PRM de type REP intégré de 170 MWe avec convection forcée et systèmes de sûreté avancés, qui pourrait être déployé à l'étranger au début des années 2030.

151. La République de Corée et l'Arabie saoudite ont conjugué leurs efforts pour mener à bien la conception détaillée du SMART, REP intégré de 110 MWe (365 MWth) détenu conjointement par les deux pays. Le réacteur sera construit en Arabie saoudite et servira à la cogénération d'électricité et d'eau dessalée. La nouvelle conception optimisée a permis d'augmenter la puissance du réacteur tout en y intégrant des dispositifs complets de sûreté passive. Une fois l'étape de la conception achevée, une demande de certification sera soumise en République de Corée, parallèlement à une demande d'octroi d'autorisation en Arabie saoudite.

152. En Fédération de Russie, la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov (figure B-6), équipée d'un PRM KLT-40S compact de type REP, est arrivée à Pevek dans la région de Chukotka à la mi-septembre, après avoir été remorquée sur 4 900 km depuis le port de Murmansk où elle avait été chargée en combustible. La centrale, qui a reçu une licence d'exploitation en juillet 2019 et a été couplée au réseau en décembre 2019, est dotée de deux modules de réacteur KLT-40S de 35 MWe, dont la puissance combinée peut atteindre 70 MWe et 50 gigacalories de chaleur par heure, ce qui est suffisant pour assurer l'approvisionnement en électricité d'une ville d'environ 100 000 habitants. Elle est destinée à remplacer la centrale nucléaire de Bilibino qui a été déclassée ainsi que des centrales au charbon vieillissantes, à la fois pour alimenter un complexe minier et pour fournir de l'électricité à des plateformes pétrolières dans l'Arctique. Elle peut également produire de l'eau dessalée.



FIG. B-6. La centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov. (Photo : Rosatom)

153. En Fédération de Russie, on réfléchit actuellement à la possibilité de faire construire le RITM-200, PRM de type REP intégré de 50 MWe, en République de Sakha (Iakoutie). Ce réacteur était initialement conçu et déployé pour des brise-glaces à propulsion nucléaire, mais la version terrestre, raccordée au réseau, est en cours de développement en vue d'une implantation à court terme.

154. En 2019, le Royaume-Uni a poursuivi ses activités visant à développer la technologie de son PRM, modèle à trois boucles de type REP capable de générer 450 MW d'électricité, en vue de faire approuver sa conception aux fins d'un déploiement au niveau national au cours des années 2030.

155. Aux États-Unis d'Amérique, NuScale a entamé, au cours du premier trimestre de 2017, une procédure d'examen auprès de la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) pour obtenir une certification de conception, ce qui devrait advenir avant la fin de 2022. Le NuScale Power Module (NPM) est un REP intégré à circulation naturelle, qui est doté d'un ensemble complet de dispositifs de sûreté passive. Un NPM de 60 MWe fournit de l'électricité par tranches qui peuvent être combinées jusqu'à une puissance brute maximale de 720 MWe dans une même centrale nucléaire. La taille retenue actuellement comme référence pour une centrale dans le cadre des activités de conception et d'octroi d'autorisation correspond à une configuration à 12 modules, sachant que l'on prévoit de mettre en service une centrale de ce type au milieu des années 2020 au Laboratoire national de l'Idaho.

156. La plupart des PRM refroidis par eau sont des REP de type compact ou intégré ou des REP à boucles. Cependant, le Japon et les États-Unis d'Amérique ont renforcé leurs projets de conception et de développement de la technologie pour le BWRX-300, réacteur à eau bouillante (REB) à circulation naturelle destiné à produire 300 MWe et doté d'une conception simplifiée et de dispositifs de sûreté passive. Ce modèle de PRM de type REB à cycle direct de vapeur est actuellement mis au point sur la base du réacteur à eau bouillante simplifié économique (ESBWR) de 1 520 MWe autorisé par la NRC.

157. Tout au long de l'année 2019, dans plusieurs pays dont le Canada et les États-Unis d'Amérique, on a également observé des avancées en ce qui concerne un sous-ensemble de PRM connus sous le nom de « micro-réacteurs modulaires ». À titre d'exemple, on peut citer le MMR (Micro Modular Reactor), constitué d'un cœur de réacteur à haute température refroidi par gaz et à blocs prismatiques, qui est actuellement conçu pour fournir une puissance de l'ordre de 5 MWe. Une demande d'examen de la conception de ce type de réacteur émanant d'un vendeur a été présentée à la CCSN. Il n'existe pas encore de consensus au niveau mondial quant à la définition des micro-réacteurs modulaires et à leur la

fourchette de puissance. Aux États-Unis d'Amérique, un modèle de REP intégré baptisé SMR-160 fait également l'objet d'une évaluation.

158. En 2019, l'Agence a entrepris un nouveau projet visant à prêter un appui aux États Membres qui se montrent intéressés par les systèmes énergétiques hybrides décarbonés, qui intègrent diverses sources d'énergie renouvelables, des RFMP, des systèmes de stockage d'énergie et des applications non électriques.

B.2.3. Initiatives internationales portant sur des systèmes d'énergie nucléaire innovants

159. Mis en place par l'Agence en 2000, le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) réunit des concepteurs de technologies, des fournisseurs et des clients afin de leur permettre d'examiner les mesures internationales et nationales à prendre pour apporter aux réacteurs nucléaires et aux cycles du combustible les innovations voulues pour pérenniser l'électronucléaire. L'INPRO, qui compte actuellement 42 membres, à savoir 41 États Membres de l'Agence ainsi que la Commission européenne, constitue une tribune internationale qui leur permet de débattre de questions les intéressant et de la coordination de leurs politiques, tout en donnant l'occasion aux détenteurs et utilisateurs de technologie de collaborer et de faire connaître leurs besoins et leurs intérêts dans les domaines concernés.

160. Les documents portant sur les outils de modélisation, d'analyse et de formulation de feuilles de route pour des scénarios de systèmes d'énergie nucléaire, élaborés en vue de promouvoir une vision mondiale du développement durable de l'énergie nucléaire au XXI^e siècle, sont actuellement aux derniers stades de la publication. Des ateliers et des formations axés sur l'utilisation de ces outils ont été organisés au Mexique et en Fédération de Russie en 2019 et un autre événement de ce type est prévu en Thaïlande en 2020. Par ailleurs, un Forum de dialogue INPRO sur les possibilités offertes et les difficultés posées par les petits réacteurs modulaires s'est tenu en République de Corée en 2019. Ces forums sont pour l'INPRO un moyen de collaborer avec les États Membres sur les enjeux protéiformes de la viabilité des systèmes d'énergie nucléaire.

B.2.4. Applications non électriques de l'énergie nucléaire

Que ce soit en vue de la cogénération ou dans le cadre de l'intégration avec d'autres sources d'énergie renouvelables, l'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications non électriques peut s'étendre à un large éventail de secteurs : dessalement de l'eau de mer, transport (par exemple, production d'hydrogène pour les véhicules à pile à combustible), secteur résidentiel (chauffage et refroidissement urbains) et secteur industriel (pétrochimie, sidérurgie et production de combustibles synthétiques), pour n'en citer que quelques-uns.

161. En 2019, 74 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans le monde (15 en Asie et 59 en Europe) ont produit 2 122,92 GW·h d'équivalent électrique de la chaleur pour appuyer les applications non électriques de l'énergie nucléaire : 11 ont facilité les applications liées au dessalement (31,4 GW·h), 58 celles liées au chauffage urbain (1 979,27 GW·h) et 33 celles liées à la chaleur industrielle (1 313,86 GW·h). L'intérêt pour les applications non électriques de l'énergie nucléaire continue de croître à travers le monde. L'utilisation de l'énergie nucléaire dans ces secteurs offre une approche durable pour garantir la sécurité énergétique et lutter contre les changements climatiques. La récupération et l'utilisation de la chaleur résiduelle des centrales nucléaires (c'est-à-dire la chaleur rejetée par leurs condenseurs) pour des applications non électriques peut se traduire par une augmentation globale de leur efficacité thermique et peut réduire l'impact environnemental de cette

chaleur lorsque celle-ci est rejetée dans des cours d'eau ou autres étendues d'eau. La cogénération à partir de la chaleur résiduelle récupérée peut compenser une grande partie des coûts de la production électronucléaire. Par exemple, la chaleur résiduelle rejetée par les RHTRG pourrait être utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, ce qui se traduirait par des économies par rapport au prix de l'eau produite dans des usines de dessalement alimentées par des centrales fonctionnant au gaz ou au mazout. Les centrales nucléaires peuvent également permettre de produire de la chaleur industrielle ou de la vapeur en quantité suffisante avec un bon rapport coût-efficacité. Ces sources d'énergie peuvent servir à plusieurs autres applications, notamment au chauffage et au refroidissement urbains.

162. En Chine, il a été annoncé en novembre 2019 que Haiyang était la première ville du pays à être approvisionnée en chaleur industrielle provenant des deux réacteurs AP1000 de sa centrale nucléaire. Selon la Compagnie électronucléaire de Shandong (SDNPC), propriétaire de la centrale nucléaire de Haiyang, le projet sera étendu à l'ensemble de la ville de Haiyang d'ici à 2021. La SDNPC estime que les deux réacteurs pourront répondre à la demande future en chauffage urbain de logements correspondant à une superficie pouvant aller jusqu'à 200 millions de mètres carrés, ce qui permettrait d'économiser 6,6 millions de tonnes de charbon par an. Actuellement, il existe des solutions technologiques qui permettent de transporter d'importantes quantités de chaleur (de l'ordre du GW) sur de longues distances (environ 100 km) moyennant des pertes de chaleur minimales.

163. Le dessalement de l'eau de mer à partir de la chaleur rejetée par les condenseurs des centrales nucléaires ou extraite sous forme de vapeur industrielle de qualité médiocre des derniers étages d'une turbine à basse pression et transmise à un système de dessalement par distillation à effets multiples est considéré comme une solution viable lorsqu'on examine les projets de centrales nucléaires. Cette technique permet de répondre aux besoins en eau d'une centrale tout au long de son cycle de vie, de sa construction jusqu'à son déclassement en passant par sa phase d'exploitation. Les progrès réalisés dans le domaine des technologies liées au dessalement, tels que les systèmes fonctionnant à basse température, les systèmes de récupération de la chaleur, les systèmes énergétiques et de traitement efficaces et l'optimisation de procédés innovants, ouvrent de nouvelles perspectives en matière de dessalement nucléaire. À cet égard, le dessalement intégré hybride, fondé sur des procédés thermique et membranaire, est considéré comme la solution optimale, qui pourrait permettre de réduire la consommation d'énergie, le volume d'eau de mer utilisé et le coût de l'évacuation. Plusieurs États Membres, dont l'Arabie saoudite, le Brésil, la Chine, l'Égypte, l'Inde, la Jordanie et le Pakistan, ont exprimé ou renouvelé leur intérêt pour le dessalement nucléaire.

164. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'hydrogène peut permettre au parc évolutif de réacteurs nucléaires de jouer un rôle de premier plan dans l'économie de l'hydrogène de demain ainsi que dans les initiatives prises pour atténuer les changements climatiques. Les centrales nucléaires actuellement en service peuvent produire de l'hydrogène grâce à une technologie avancée d'électrolyse de l'eau à basse température. On pourrait accroître le rendement de cette méthode en utilisant l'électricité produite en dehors des heures de pointe. Plusieurs autres technologies de production d'hydrogène ont progressé au cours des dernières années, notamment l'électrolyse à haute température et les cycles thermochimiques ou électro-thermochimiques. Elles pourront être intégrées dans de futurs modèles de réacteurs à haute température.

B.3. Fusion

165. La construction de l'ITER a bien avancé, 73 % des travaux de génie civil étant achevés (figure B-7). Le calendrier révisé des travaux de construction, daté de 2016, a été récemment confirmé, la date limite initialement approuvée de production du premier plasma restant fixée à la fin de 2025. Le bâtiment du tokamak est prêt pour la mise en place de la base du cryostat, prévue pour mars 2020, et les travaux autour de cet élément dureront plus de quatre ans. L'ITER devrait commencer à être exploité à plein régime en 2035.



FIG. B-7. Photos du site de construction de l'ITER en avril 2014 (à gauche) et en octobre 2019 (à droite). (Photo : ITER)

166. En juin 2019, l'AIEA et l'Organisation ITER ont renforcé leur coopération déjà ancienne en signant des arrangements pratiques, au titre desquels, la seconde fera bénéficier la première et ses 171 États Membres de son expérience en matière de sûreté et de radioprotection en fusion nucléaire. En outre, les deux organisations mettront en œuvre des initiatives de formation à la physique des plasmas et à la technologie de la fusion, coordonneront des activités de sensibilisation du public et coopéreront dans les domaines de la gestion des connaissances et de la mise en valeur des ressources humaines.

167. La construction du tokamak supraconducteur JT-60SA (figure B-8), en construction à Naka (Japon), fruit d'une collaboration internationale entre l'Europe et le Japon, constitue une autre étape importante dans le développement de la fusion en tant que future source d'énergie.

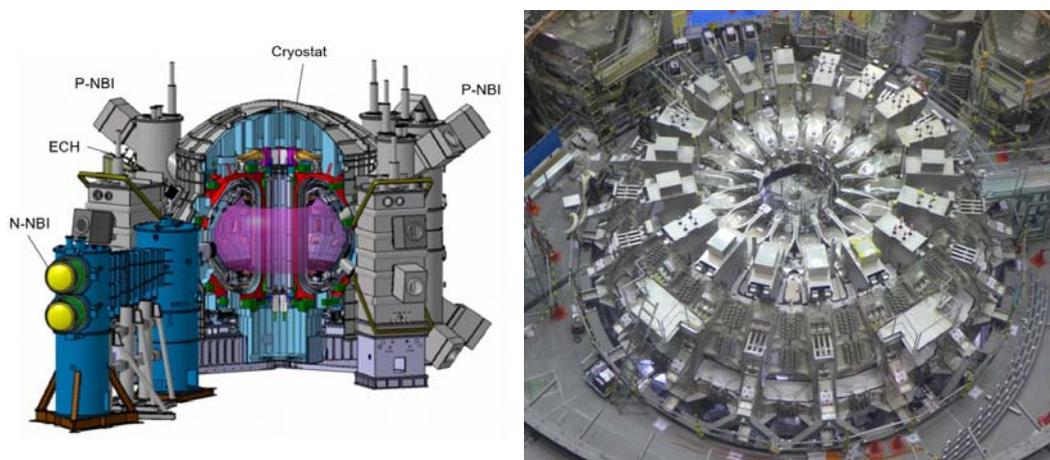


FIG. B-8. Représentation schématique du JT-60SA (à gauche) accompagnée d'une photo de l'assemblage de l'enveloppe en forme de tore quasiment achevée (Source : P. Barabaschi et al., présentation lors de la Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion en 2018).

168. Sa mise en service étant prévue en 2020, le JT-60SA devrait être opérationnel cinq ans avant l'ITER, dont il appuiera la mise en service et l'exploitation grâce à ses expériences. Parmi les sujets de recherche auxquels il se consacrera, figurent notamment la physique des particules de haute énergie, les aspects techniques de la fusion, la mise au point du régime d'exploitation et, plus important encore, les mécanismes de production et de contrôle de plasmas. Par ailleurs, les expériences qu'il effectuera compléteront les recherches menées conjointement avec l'ITER en s'attaquant aux très grands défis physiques et technologiques auxquels pourraient être confrontées les futures centrales de démonstration à fusion, les DEMO.

169. La stabilité des plasmas, les sciences des matériaux et les incidences des conditions de fonctionnement dans le contexte des DEMO ont été certains des sujets abordés lors du sixième atelier de l'AIEA organisé au titre du programme DEMO en octobre 2019, à Moscou (Fédération de Russie), auquel ont participé quelque 60 experts de 14 pays, l'organisation Fusion for Energy de l'Union européenne et l'Organisation ITER. Pendant cet atelier², qui se déroule tous les deux ans, sont examinées les principales difficultés scientifiques et techniques de la conception d'une DEMO, ainsi que les programmes, tâches et diverses mesures possibles. Si chaque participant peut avoir ses priorités en matière de recherche, ces ateliers visent à coordonner des actions mutuellement bénéfiques et à faciliter la collaboration internationale.

170. En 2019, le Ministère de l'énergie des États-Unis a entrepris un programme national en faveur de la fusion qui s'articule autour de grandes avancées technologiques, mais aussi plusieurs initiatives visant à financer et à promouvoir des partenariats public-privé. Il s'agit d'un programme pilote destiné à ouvrir des perspectives dans des domaines clés de la R-D sur la fusion et à accélérer les progrès vers le développement de l'énergie de fusion.

171. Entre-temps, un grand nombre de sociétés privées et de partenariats public-privé ont été établis ces cinq dernières années, essentiellement au Canada, aux États-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni, mais aussi dans des pays européens et en Chine. C'est dans ce contexte que s'est créée aux États-Unis l'Association des industries de la fusion, réseau international d'entreprises œuvrant à l'électrification de la planète grâce à l'énergie de fusion et à la promotion de cette dernière en tant que nouvelle source d'énergie.

172. L'émergence de ces nouvelles entités, partiellement financées par des fonds privés, est de nature à modifier le scénario traditionnel de développement de la fusion, dont les progrès reposaient sur des projets largement subventionnés par des fonds publics. Il faudra donc établir des lignes directrices et des normes internationales dans ce domaine pour favoriser les études techniques et faciliter les procédures d'autorisation, les procédures de sûreté et de sécurité, les plans de gestion des déchets et les études globales de faisabilité concernant les futurs réacteurs à fusion, dont les analyses coûts-avantages et les scénarios d'évaluation des retombées socio-économiques.

C. Accélérateurs et réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs et instruments connexes

173. La présente section énonce les principaux faits nouveaux concernant la technologie des accélérateurs, leurs applications et les instruments connexes. Au nombre des applications les plus courantes des accélérateurs figurent la production de radio-isotopes pour le diagnostic médical et le traitement du cancer, l'utilisation de sources intenses de rayons X pour la stérilisation du matériel médical et des denrées alimentaires, l'utilisation de faisceaux de particules chargées aux fins de l'analyse et de l'irradiation en sciences des matériaux, la datation au carbone, la production de neutrons par accélérateur dont les applications vont de la prospection minière et pétrolière aux mesures de données nucléaires ou à l'utilisation de sources intenses de neutrons de spallation.

² Pour de plus amples informations, voir https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DEMO_landing.aspx.

C.1.1. Une installation à double faisceau ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche sur les matériaux

174. Une installation à double faisceau d'ions (figure C-1) qui permet d'utiliser simultanément deux faisceaux d'ions émis par des accélérateurs différents a été inaugurée à Zagreb, renforçant les travaux de recherche de la Croatie sur les matériaux et la présence mondiale de ces installations de pointe.

175. Créée avec l'aide de l'AIEA, l'installation He Ion Source & DiFU Dual-Beam de l'Institut Ruđer Bošković aidera les scientifiques à tester et à développer de nouveaux matériaux de structure utilisés dans diverses technologies énergétiques. Les réactions de fission et de fusion génèrent non seulement des neutrons de haute énergie mais peuvent également produire des gaz (hydrogène et hélium) qui, après un certain temps d'exposition, peuvent endommager les structures et les composants d'un réacteur. La technologie des faisceaux d'ions permet de simuler ces conditions extrêmes et peut aider à mettre au point de nouveaux matériaux suffisamment robustes pour y résister.



FIG. C-1. L'installation He Ion Source & DiFU Dual-Beam à l'Institut Ruđer Bošković, en Croatie.
(Source : AIEA)

176. Dans cette installation, deux faisceaux frappent un échantillon d'acier, matériau utilisé habituellement dans les réacteurs nucléaires pour sa robustesse, simulant l'interaction des produits issus des réactions de fission ou de fusion avec ce matériau et l'altération de celui-ci. Cette interaction nucléaire peut endommager la structure cristalline du matériau mais aussi produire des gaz de transmutation tels que l'hélium et l'hydrogène. Des bulles risquent alors de se former dans l'acier et de le faire gonfler. En sachant quand et comment surviennent ces réactions, les scientifiques peuvent adapter le matériau pour contrecarrer ces effets indésirables.

C.1.2. MACHINA – accélérateur mobile pour l'analyse non destructive in-situ du patrimoine culturel

177. MACHINA est un accélérateur de particules compact de la prochaine génération, mis au point grâce à une collaboration internationale entre l'Institut national de physique nucléaire (INFN) sis en Italie et l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) en Suisse, qui peut amener des progrès décisifs dans l'analyse élémentaire in-situ d'objets du patrimoine culturel. Il répond aux besoins des conservateurs, des historiens de l'art et des restaurateurs en matière d'analyse in situ et non invasive d'œuvres d'art par faisceau d'ions – indispensable pour l'étude de celles qui sont intransportables et inestimables, comme des fresques fragiles et des peintures de grande taille ou sensibles au transport.

178. Comme le montre la figure C-2, il s'agit d'un système compact et portable basé sur la technologie HF-RFQ (quadrupôle à radiofréquence de haute fréquence) mise au point par le CERN. Il est léger

(environ 300 kg), facile à transporter et deux heures suffisent pour le démonter et le remonter entièrement. Robuste et extrêmement compact (2,5 m x 0,6 m au sol, avec une hauteur réglable d'environ 1 m), il consomme extrêmement peu d'énergie (7-8 kW de puissance totale). Le premier prototype³, qui sera utilisé à l'Opificio delle Pietre Dure à Florence (Italie), devrait être mis à la disposition d'autres laboratoires et musées européens.

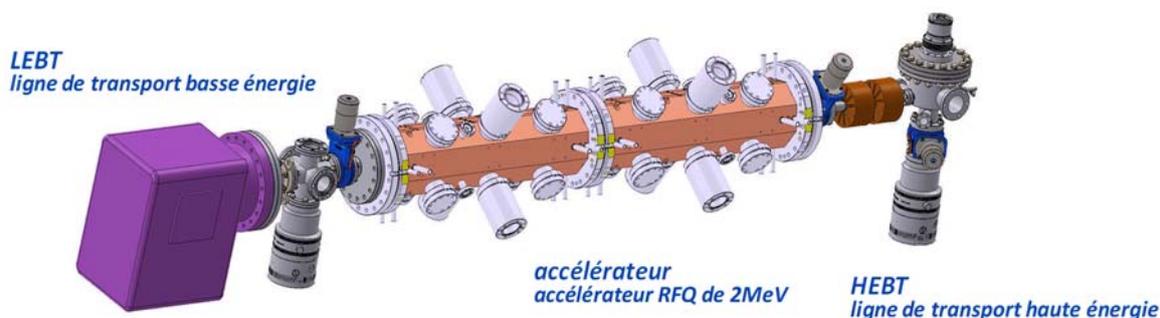


FIG. C-2. Schéma des principaux composants de MACHINA Le faisceau d'ions peut être extrait du côté de la ligne haute énergie de l'accélérateur pour l'analyse de l'objet. Les toutes premières applications reposent sur la technique PIXE, où des rayons X sont induits par les interactions particules-matière. Les rayons X émis sont ensuite détectés et, après évaluation des données, la composition de l'échantillon est déterminée.

(Photo : Projet MACHINA)

C.1.3. Imagerie de cellules entières à l'aide de faisceaux d'ions focalisés de l'ordre du mégaélectronvolt

179. La capacité de visualiser des structures à l'intérieur de cellules entières à des résolutions spatiales inférieures à 100 nanomètres est importante pour un large éventail d'applications en biologie, notamment pour l'administration de médicaments, la radiobiologie et la radiothérapie par particules (agents radiosensibilisants en imagerie). Les faisceaux d'ions hautement focalisés émis par des accélérateurs de particules d'une puissance de l'ordre du mégaélectronvolt (MeV) offrent à cet égard des possibilités uniques. En détectant simultanément l'énergie des ions transmis [microscopie ionique à transmission et à balayage (STIM)] et la lumière visible qu'ils génèrent, les chercheurs peuvent enregistrer des images pour l'étude de la structure et de la localisation des particules. Cette forme de microscopie corrélative quantitative peut être un outil puissant pour l'étude de la structure et de la fonction des cellules. La figure C-3 montre que les nanoparticules pénètrent difficilement dans le noyau de la cellule, aussi est-il possible d'empêcher que l'ADN soit directement atteint lorsque la cellule sera ultérieurement irradiée au cours d'expériences de radiobiologie.

³ Pour de plus amples informations, voir <http://home.infn.it/en/media-outreach/2015-03-26-11-50-59/2693-piccolo-preciso-e-potente-arriva-machina-l-acceleratore-per-i-beni-culturali-2>.

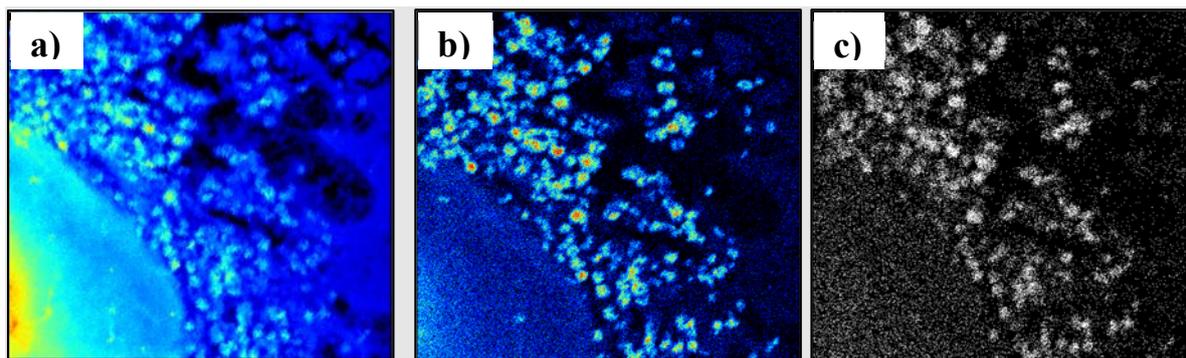


FIG. C-3. Image (taille de la section balayée : 13 μm) de l'absorption de nanoparticules à conversion ascendante de terres rares dans une cellule HeLa. On étudie l'accumulation de nanotiges de 100 nm au bord du noyau de la cellule au moyen de trois modalités d'imagerie par faisceaux d'ions : a) STIM sur l'axe montrant la densité ; b) STIM hors axe montrant une diffusion accrue des nanoparticules ; et c) fluorescence induite par les particules alpha. Un faisceau de particules alpha de 1,6 MeV a été utilisé pour l'imagerie de cette cellule avec une résolution spatiale inférieure à 50 nm. (Reproduction avec l'autorisation d'Andrew Bettioli, Centre des applications des faisceaux d'ions, Département de physique de l'Université nationale de Singapour).

180. En effet, on peut utiliser des nanoparticules pour cibler certaines régions de la cellule telles que les mitochondries. Dans une expérience de radiosensibilisation (dans le cas d'une radiothérapie par particules), il peut être souhaitable de visualiser l'effet des radiolésions sur l'ADN mitochondrial qui a été accentué par ces nanoparticules. L'imagerie à haute résolution est capitale, car les mitochondries cellulaires sont approximativement de la taille d'un micron. Comme elles peuvent être ciblées simultanément avec des sondes fluorescentes et des nanoparticules, l'adoption d'une approche « corrélative » en imagerie peut être utile pour les localiser ainsi que les nanoparticules. Il est alors possible d'entreprendre une étude systématique de la localisation des nanoparticules et de l'effet des différentes doses d'irradiation.

C.1.4. Les technologies d'accélération par laser : des applications prometteuses

181. Les progrès récents de la technologie des lasers de haute puissance⁴ se sont traduits par la mise au point de lasers produisant des impulsions lumineuses extrêmement courtes de l'ordre de la femto-seconde avec des intensités très élevées supérieures à 10^{21} watt/cm². En guidant ces impulsions sur une surface plane solide, on peut générer des sources intenses de photons, d'ions et de neutrons (figure C-4), qui peuvent ensuite être utilisées dans un large spectre d'applications, comme les essais non destructifs en aérospatiale, l'imagerie radiographique d'objets de grande taille, le diagnostic en conditions opératoires des batteries au lithium-ion, le radiotraitement pour la fabrication de matériaux intelligents et fonctionnels, et la mesure neutronique active de matières nucléaires sensibles, y compris la caractérisation de déchets nucléaires.

⁴ Source : Manifestation parallèle organisée par l'Allemagne en marge de la 63^e session ordinaire de la Conférence générale de l'AIEA sous l'intitulé « Sources de neutrons produites par laser pour les applications nucléaires ».

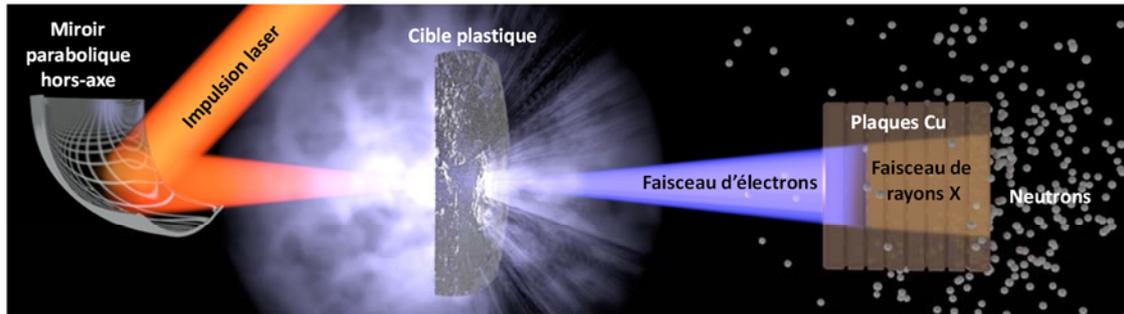


FIG. C-4. Représentation schématique d'électrons et de neutrons secondaires produits au moyen de technologies d'accélération par laser. (Photo : Ishay Pomerantz, Université de Tel Aviv, Israël)

182. À ce jour, les techniques des lasers ont démontré qu'elles pouvaient favoriser l'accélération de champs électriques d'au moins quatre ordres de grandeur plus grands que ceux des accélérateurs traditionnels, aussi semble-t-il que l'objectif de la communauté scientifique internationale consistant à produire des accélérateurs de particules miniaturisés et portables puisse être atteint au cours des dix prochaines années.

C.2. Réacteurs de recherche

183. Les applications les plus courantes des réacteurs de recherche sont présentées à la figure C-5. Leur puissance peut aller de zéro (assemblages critiques ou sous-critiques, par exemple) à environ 200 MWth, ce qui est faible comparé aux 3 000 MWth d'une centrale nucléaire typique. Les réacteurs de recherche peuvent être beaucoup plus diversifiés que les réacteurs de puissance sur le plan de la conception, voire en ce qui concerne leurs modes d'exploitation – mode continu ou mode pulsé.



FIG. C-5. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde^a.

^a 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.

^b Sur les 237 réacteurs de recherche en question (224 en service et 13 provisoirement à l'arrêt), au 31 décembre 2019.

^c Comme l'étalonnage et les essais d'instruments, les expériences de blindage, la création de sources de positrons et les études sur l'incinération des déchets nucléaires.

Il ressort de la base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche qu'à ce jour, sur les 818 réacteurs de recherche qui ont été construits dans 67 pays, 250 sont en service dans 54 pays. La Fédération de Russie possède le plus grand nombre de réacteurs de recherche en service (59), suivie par les États-Unis d'Amérique (50), la Chine (17) et le Japon (7). Il y a dans le monde 63 réacteurs de recherche fonctionnant à des puissances de 5 MW ou plus et produisant donc des flux de neutrons élevés à l'appui de la fourniture de produits et de services médicaux et industriels. Au total, neuf réacteurs de recherche sont en construction dans six pays et 14 sont prévus dans 11 pays.

184. Les réacteurs de recherche sont indispensables pour fournir des radio-isotopes aux secteurs médical et industriel, des faisceaux de neutrons destinés 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 aux fins des études menées sur le patrimoine culturel et l'environnement. Ils apportent une contribution stratégique à l'éducation et à la formation. De nombreux réacteurs de recherche vieillissants étant mis à l'arrêt, les installations restantes et nouvelles doivent être utilisées au mieux, être bien gérées et exploitées de manière durable et efficiente. L'Agence 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, 23 installations lui ont soumis de tels plans à des fins consultatives. En 2019, elle a mis au point l'Examen intégré de l'utilisation des réacteurs de recherche (IRRUR) pour aider ses États Membres à optimiser l'utilisation de leurs réacteurs de recherche et a mené la première mission pilote IRRUR en Italie.

185. Plus de la moitié des réacteurs de recherche en exploitation dans le monde le sont depuis plus de 40 ans. Si leur cycle de vie peut atteindre 60 ans ou plus, 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 maintenance et de gestion de la durée de vie deviendront indispensables pour que les réacteurs de recherche puissent remplir leurs missions de manière économique. À cet égard, les missions OMARR (Évaluation de l'exploitation et de la maintenance des réacteurs de recherche) d'examen par des pairs, entreprises notamment par le Bangladesh, l'Indonésie, l'Ouzbékistan, le Portugal, la République démocratique du Congo et la Thaïlande, se sont avérées très utiles. Sur les 58 réacteurs de recherche ayant été définitivement mis à l'arrêt dans 23 États Membres, plusieurs devraient commencer à être déclassés dans un futur proche.

186. De nouveaux réacteurs de recherche sont en cours de construction en Arabie saoudite, en Argentine, en Fédération de Russie, en France, en République de Corée et en Ukraine (un ADS). Plusieurs États Membres ont des plans de construction formellement établis, à savoir le Bélarus, la Belgique, la Bolivie, les États-Unis d'Amérique, 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. Les examens intégrés de l'infrastructure nucléaire pour les réacteurs de recherche (INIR-RR) permettent d'aider les États Membres qui entreprennent un projet de

construction d'un nouveau réacteur de recherche et de leur prodiguer des conseils. Des missions INIR-RR ont été menées au Nigeria et au Viet Nam, et d'autres sont en cours en Thaïlande et en Zambie.

187. Les États Membres qui prévoient d'établir ou de préserver leur capacité nucléaire nationale dans le cadre de leurs programmes en science et technologie, y compris leur programme électronucléaire, continuent de manifester un intérêt pour l'accès aux réacteurs de recherche. Ainsi, en 2019, l'Agence a consolidé et développé ses quatre instruments et outils : le réacteur-laboratoire par Internet (IRL), outil de formation à distance destiné principalement au milieu universitaire (des séances ont continué d'être diffusées en 2019 à destination de la région Amérique latine et Caraïbes, un réacteur hôte IRL a été mis en service au Maroc et la mise en place de réacteurs IRL dans la région Asie et Pacifique et en Europe a bien progressé) ; les écoles régionales sur les réacteurs de recherche qui offrent une formation de base ; l'Initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale (EERRI) qui propose des cours pratiques avancés, surtout à l'intention de jeunes professionnels (en 2019, une école sur les réacteurs de recherche a été organisée au Japon et le 15^e cours de l'EERRI s'est déroulé en Autriche, en Slovénie et en République tchèque) ; et enfin 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.

188. 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 2019, les préparatifs de la réexpédition du combustible à l'UHE du réacteur de recherche IVG.1M du Kazakhstan vers la Fédération de Russie ont commencé, après la conversion de ce réacteur pour l'utilisation de combustible à l'UFE. Les préparatifs de la dilution par mélange du combustible à l'UHE du réacteur de recherche IGR au Kazakhstan ont aussi commencé afin d'en faire descendre le taux d'enrichissement sous les 20 %.

189. À la fin 2019, quelque 1 600 kg de combustible à l'UHE neuf et usé avaient été retirés de réacteurs de recherche dans le cadre du programme de renvoi du combustible à l'UHE provenant des États-Unis, quelque 2 875 kg de combustible à l'UHE avaient fait l'objet d'un retrait ou d'une évacuation confirmée dans le cadre du « Gap Remove Program », et quelque 2 300 kg de combustible à l'UHE avaient été retirés dans le cadre du programme de renvoi du combustible à l'UHE d'origine russe.

190. Les initiatives internationales destinées à inciter les fabricants d'isotopes médicaux à utiliser des cibles à l'UFE plutôt qu'à l'UHE se sont poursuivies. Les brèves pannes intervenues en 2019 dans 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. Environ 75 % du molybdène 99 vendu dans le monde est maintenant produit sans recours à aucun combustible ni aucune cible à l'UHE. Aux États-Unis d'Amérique, une nouvelle installation de production de molybdène 99 a démarré l'exploitation commerciale à partir de cibles sans uranium en 2018 et commencé des travaux d'agrandissement en 2019.

D. Technologies des radio-isotopes et des rayonnements

D.1. Face au problème du plastique, les techniques nucléaires à la rescousse

191. La croissance rapide de la production de plastique et l'accumulation de déchets plastiques qui l'accompagne pèsent très lourdement sur l'environnement. L'utilisation généralisée de polymères synthétiques facilement accessibles et relativement bon marché, y compris de thermoplastiques (communément appelés « plastiques ») et de caoutchouc, a engendré d'immenses quantités de déchets de polymères dont la gestion à ciel ouvert pose des problèmes tout aussi vastes.

192. Les polymères sont couramment utilisés, car ils sont abordables, faciles à fabriquer et légers, en plus d'être dotés de bonnes propriétés mécaniques. La croissance de la population mondiale, combinée aux avantages offerts par ces matériaux, a conduit à une augmentation alarmante de la charge environnementale du plastique à l'échelle de la planète. Au cours des 20 dernières années, la production de polymères synthétiques a bondi de 240 %. Si cette tendance se poursuit, ce sont quelque 12 milliards de tonnes de déchets de polymères qui finiront dans des décharges ou dans l'environnement à l'horizon 2050⁵.

193. De nombreux déchets de polymères sont composés de différentes matières qui sont difficiles, voire impossibles, à séparer, et dont la réutilisation est donc problématique. Contrairement à leurs équivalents naturels, les polymères synthétiques se dégradent lentement et se décomposent progressivement en petites particules, appelées « microplastiques », qui polluent l'écosystème. Selon les dernières statistiques sur la quantité de déchets plastiques produits jusqu'à nos jours, on estime que depuis 2015, quelque 6 300 millions de tonnes de déchets de polymères ont été générés (5 800 Mt de déchets primaires et 500 Mt de déchets secondaires), dont 9 % environ ont été recyclés, 12 % incinérés et 79 % mis au rebut dans des décharges ou dans la nature.

194. Actuellement, l'allègement de la charge que représentent ces déchets repose sur un large éventail de technologies dont l'application dépend de facteurs favorisant tant la gestion que la réduction des déchets aux échelons local, régional et national. Le taux moyen de recyclage des déchets plastiques à l'échelle mondiale demeure faible et varie d'un pays à l'autre (tableau D-1).

⁵ Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances* 3(7):e1700782 (2017).

Tableau D-1. Recyclage du plastique dans le monde

Région/pays	Recyclage (%)	Récupération d'énergie (%)	Géré : en décharge (%)	Mal géré (inconnu) (%)
Afrique	12	1	26	62
Asie et Océanie	24	25	15	37
Europe (Turquie comprise)	27	31	33	9
Amérique du Nord	11	13	72	4
Amérique du Sud et centrale (Mexique compris)	15	11	30	44

Source : *Global Plastics Flow 2018 (Conversio Market & Strategy, February 2018, https://www.conversio-gmbh.com/res/Global_Plastics_Flow_Feb10_2020.pdf)*

195. Pour l'instant, le recyclage des déchets de polymères s'effectue dans de grands centres qui n'ont que rarement recours au traitement par rayonnements. Les technologies des rayonnements (figure D-1) respectent les principes fondamentaux de la « chimie verte » et offrent de multiples possibilités en matière de traitement des matériaux par la formation ou la rupture contrôlée de liaisons chimiques.



FIG. D-1 : Cycle de vie des produits de matière plastique, production et traitement des déchets plastiques. (Source : AIEA)

196. De plus en plus, les États Membres demandent que l'on adapte les technologies des rayonnements à l'enjeu mondial du recyclage des déchets de polymères. Les technologies nucléaires peuvent contribuer à la mise en place d'une économie circulaire du plastique et compléter les méthodes conventionnelles de réduction du volume des déchets plastiques. Les technologies des rayonnements peuvent être utilisées à différentes échelles et notamment pour irradier même de grandes quantités de déchets de polymères. Le processus d'irradiation peut être utilisé pour modifier la structure et les propriétés du plastique ou pour le décomposer en matières de base. Dans les deux cas, le nouveau

matériau modifié ou fonctionnalisé ou la matière de base sont utilisés pour fabriquer des produits de consommation en plastique recyclé commercialement viables, ce qui permet de générer un profit et de réduire le volume de déchets.

197. L'utilisation des technologies des rayonnements présente un autre avantage : c'est une technologie « verte » qui se passe des solvants utilisés dans le recyclage chimique, qui polluent l'environnement et génèrent des émissions de carbone. Le recyclage par les technologies de rayonnements est particulièrement intéressant quand le recyclage primaire des déchets plastiques n'est plus possible, de nombreux thermoplastiques ne pouvant être recyclés qu'une ou deux fois à l'aide des technologies conventionnelles. Il constitue donc une solution innovante qui peut compléter les méthodes conventionnelles de recyclage des déchets plastiques.

198. Les techniques nucléaires permettent également de suivre et d'évaluer avec fiabilité et exactitude les incidences des microplastiques marins dans l'environnement au moyen de traceurs isotopiques. Ceux-ci présentent un degré de précision sans égal et la sensibilité nécessaire pour déterminer avec exactitude la présence de déchets plastiques dans l'environnement, suivre leurs déplacements et les évaluer. Ces informations peuvent guider la prise de décisions de politique générale.

199. Cependant, les approches éprouvées dans le domaine des technologies des rayonnements appliquées à la synthèse de nouveaux matériaux et à la désinfection de liquides et de gaz toxiques ne peuvent être directement transposées aux déchets de polymères. Par conséquent, il va falloir procéder à de nouveaux travaux de recherche-développement. Dans la mesure du possible, il est souhaitable de recycler et de réutiliser les polymères, sachant que l'efficacité, la rationalité économique et la durabilité du processus de recyclage sont primordiales.

Une nouvelle approche qui permet de transformer les déchets plastiques en un matériau adapté à des applications durables et évolutives consiste à utiliser ces déchets pour améliorer les performances mécaniques et la durabilité de la pâte de ciment et du béton. La production mondiale de ciment constituant la troisième source la plus importante d'émissions de carbone, l'utilisation de plastique recyclé dans le béton pourrait également avoir un effet bénéfique supplémentaire sur l'environnement⁶.

200. Les futures installations d'irradiation destinées au recyclage du plastique devraient s'équiper d'appareils d'irradiation par faisceaux d'électrons intégrés, d'un bon rapport coût-efficacité, proposés par de petites et moyennes entreprises. Il serait préférable de procéder à la radiomodification des polymères sous atmosphère d'air, sans pression excessive, en faisant appel au traitement par faisceaux d'électrons selon des paramètres optimisés. Il conviendrait d'envisager d'élaborer des lignes directrices standard pour encadrer la traçabilité des matériaux dès lors que l'on commence à en mettre au point de nouveaux à partir de déchets de polymères recyclés.

⁶ Schaefer, C.E. et al., Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint, Waste Management 71 (2018), 426-439.

D.2. La thérapie par capture de neutrons par le bore fait son entrée dans les hôpitaux grâce aux avancées majeures des technologies faisant appel aux accélérateurs

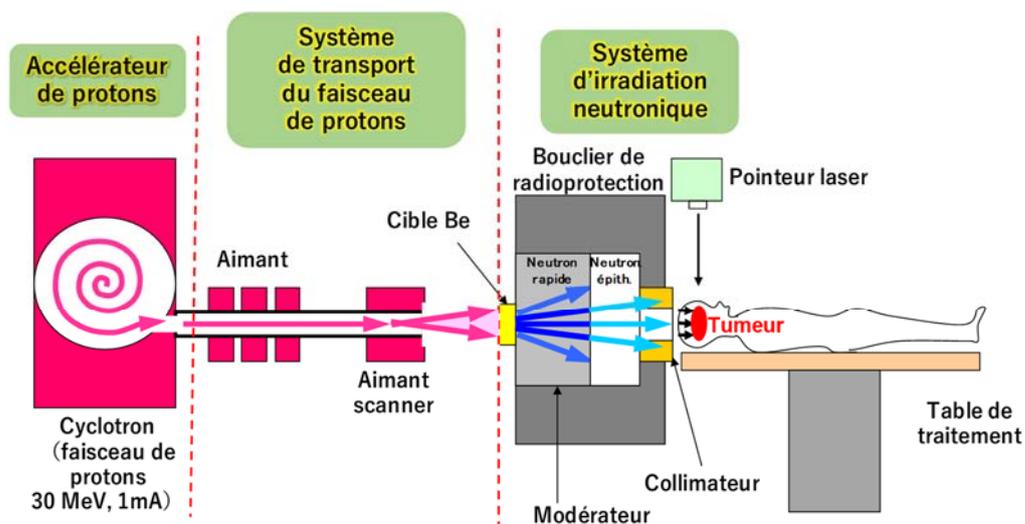
D.2.1. Avancées des sources de neutrons compacts alimentées par accélérateur

Qu'est-ce que la thérapie par capture de neutrons par le bore ?

La thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT) est une thérapie inédite qui repose sur l'idée d'administrer de manière sélective des composés du bore dans des tissus tumoraux, qui sont ensuite irradiés à l'aide de neutrons. Ces neutrons sont capturés par le bore, entraînant l'émission de particules alpha et le recul du noyau de lithium ; le transfert d'énergie est très élevé sur un parcours très court de la taille d'une cellule. La grande efficacité biologique intracellulaire et la nature très localisée, à l'échelle cellulaire, des dommages causés aux cellules tumorales constituent les deux principaux avantages de la BNCT en thérapie clinique. Compte tenu des récents progrès accomplis dans le domaine des technologies faisant appel aux accélérateurs, la BNCT est encore plus proche de devenir une solution possible pour le traitement clinique du cancer.

201. Jusqu'à présent, on a essentiellement pratiqué la BNCT dans des réacteurs de recherche capables d'offrir les capacités requises en termes d'intensité et de qualité des faisceaux de neutrons pour l'irradiation des patients. Au cours des 20 dernières années, plus de 1 000 patients dans le monde ont été traités dans de telles installations, et des progrès notables ont été accomplis dans l'optimisation des composés du bore, notamment en ce qui concerne leur utilisation et le contrôle de leur accumulation dans les cellules tumorales. Toutefois, nombre de ces réacteurs ont été mis à l'arrêt ou ont cessé leurs activités en rapport avec la BNCT, surtout en raison de la difficulté de satisfaire aux exigences cliniques dans un environnement tel que celui d'un réacteur. Aujourd'hui, seuls quatre réacteurs continuent de proposer la BNCT comme option de traitement du cancer. Cela étant, on observe une augmentation marquée du nombre d'installations et de projets BNCT ayant pour objectif de mettre sur pied et d'exploiter des sources de neutrons compacts, alimentées par des accélérateurs de particules, qui se trouvent tous dans des hôpitaux universitaires ou dans des centres de cancérothérapie. Certaines de ces installations ont déjà entrepris des essais cliniques, d'autres sont à l'étude dans le monde.

202. Les différents composants technologiques d'une installation BNCT faisant appel à un accélérateur sont illustrés à la figure D-2 : les protons sont accélérés de façon à atteindre une énergie allant de quelques mégaelectronvolts (MeV) à 30 MeV, avec un courant de faisceau moyen d'une intensité de quelques milliampères (mA) à plusieurs dizaines de mA, puis ils entrent en collision avec des cibles en métal léger, comme le lithium (Li) ou le béryllium (Be). Cette opération donne lieu à une production de neutrons rapides qui eux-mêmes sont collimatés, modérés et guidés vers la zone d'irradiation du patient, comme on peut le voir dans la représentation schématique figurant ci-après. Certains composants clés d'une installation BNCT sont également présentés à la figure D-3.



(Crédit : Sumitomo Heavy Industry Ltd.)

FIG. D-2. Représentation schématique d'une installation BNCT alimentée par un accélérateur.
(Source : Sumitomo Heavy Industries, Japon)

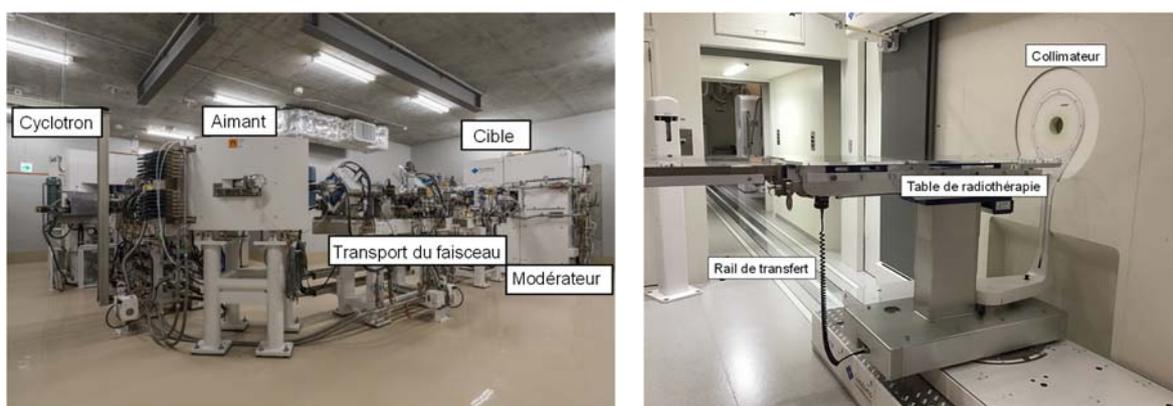


FIG. D-3. Composants de l'accélérateur et de la cible (à gauche) et zone d'irradiation du patient (à droite) dans un centre BNCT faisant appel à un accélérateur.
(Photos : Centre médical BNCT de Kansai, Japon)

203. L'Agence procède actuellement à la révision et à la mise à jour de son document technique (IAEA-TECDOC) sur l'état d'avancement actuel de la BNCT, publié en 2001 sous le titre *Current Status of Neutron Capture Therapy* (IAEA-TECDOC-1223), afin de rendre compte de tous les résultats obtenus au cours des 20 dernières années dans les installations BNCT utilisant des réacteurs et de faire état des nouvelles tendances observées et des progrès accomplis en ce qui concerne les centres BNCT alimentés par des accélérateurs sis dans l'enceinte d'hôpitaux. Le tableau D-2 donne un aperçu de diverses installations BNCT ayant recours à des accélérateurs ainsi que de leurs paramètres techniques et de leur état d'avancement.

Tableau D-2. Liste d'installations BNCT faisant appel à des accélérateurs et description de leur état d'avancement. (Source : AIEA)

Pays	Installation	Accélérateur	Projectile (énergie incidente) + cible	Courant maximal prévu (actuel) en mA	Situation actuelle
Japon	Université de Kyoto	Cyclotron	p(30,0 MeV)+Be	1 (1)	Essais cliniques
	Centre de recherche BNCT du Tohoku du Sud				
	Centre médical BNCT de Kansai				
	Université de Tsukuba	Linéaire	p(8 MeV)+Be	5 (1,8)	Mise en service
	Centre national de lutte contre le cancer	Linéaire	p(2,5 MeV)+Li	20 (12)	Essais cliniques
	Centre BNCT de l'hôpital Edogawa				Construction
	Université de Nagoya	Électrostatique	p(2,8 MeV)+Li	15 (1)	Mise en service
Finlande	Hôpital universitaire d'Helsinki	Électrostatique	p(2,6 MeV)+Li	30 (20)	Essais cliniques*
Argentine	Centre atomique Bariloche	Électrostatique	d(1,4 MeV)+Be	30 (1)	Construction
Fédération de Russie	Institut Budker de physique nucléaire	Électrostatique	p(2,0 MeV)+Li	10 (2)	En cours de mise au point
Israël	Accélérateur de Soreq pour la recherche appliquée	Linéaire	p(4,0 MeV)+Li	20 (2)	En cours de mise au point
Chine	Hôpital Humanity de Xiamen	Électrostatique	p(2,5 MeV)+Li	10 (-)	En cours de mise au point
Italie	Institut national de physique nucléaire	Linéaire	p(4,0 MeV)+Be	30 (-)	En cours de mise au point
République de Corée	A-BNCT	Linéaire	p(10,0 MeV)+Be	8 (-)	En cours de mise au point

* L'installation est en service et des essais cliniques sont déjà prévus.

D.2.2. Radiopharmaceutiques théranostiques et BNCT

204. Les radiopharmaceutiques théranostiques peuvent être utilisés dans le cadre d'une approche combinant thérapie et diagnostic, qui permet de passer d'une médecine traditionnelle à une médecine personnalisée, de précision. L'efficacité de la BNCT dépend en grande partie de la concentration en bore et de la répartition de celui-ci dans les cellules tumorales ciblées. Dans la plupart des cas, la BPA (boronophénylalanine) est utilisée comme un transporteur de bore 10 (^{10}B) dans le cadre de la BNCT. La BPA marquée au fluor 18 (^{18}F -BPA) a été mise au point et appliquée avec succès pour contrôler la pharmacocinétique de la BPA au moyen de la tomographie à émission de positons (PET). Ainsi, la PET utilisant la ^{18}F -BPA a permis non seulement d'obtenir des renseignements sur la tumeur, mais aussi d'évaluer l'accumulation de bore à la fois dans les tissus tumoraux et dans les tissus sains et de déterminer la réaction de la tumeur à la BNCT. Actuellement, la BNCT couplée à la PET utilisant la ^{18}F -BPA, sert à traiter divers cancers, tels que les gliomes malins, les cancers de la tête et du cou, les mélanomes, les mésothéliomes, les cancers du foie et les tumeurs pulmonaires (figure D-5).

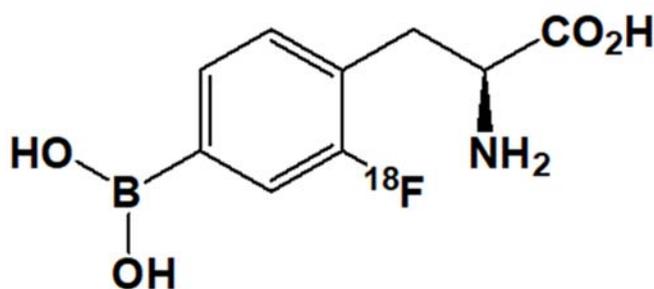


FIG. D-5. À gauche : Structure moléculaire de la BPA marquée au fluor 18 (^{18}F -BPA).
À droite : Image obtenue par PET d'une accumulation de composés du bore dans un mélanome malin métastatique pulmonaire. (Source : Université d'Osaka, Japon)

205. L'efficacité de la BNCT pourrait être renforcée si l'on parvenait à accroître la concentration en bore dans les cellules cibles. Étant donné que la BPA ne contient qu'un seul atome de bore 10 par molécule, il apparaît nécessaire de mettre au point des agents de ciblage de cellules dont la structure serait composée d'un nombre plus élevé d'atomes de bore 10. De nombreuses études en cours dans le monde visent à créer des molécules de ce type ; toutefois, la mise au point de médicaments étant un processus de longue haleine, il faudra un certain temps avant que de nouvelles molécules puissent être testées et utilisées dans le cadre de la BNCT.

D.3. Medical Isotope Browser : un outil qui facilite la découverte de nouveaux circuits de production de radio-isotopes pour lutter contre le cancer et d'autres maladies

206. L'Agence a conçu un nouvel outil en ligne qui permet de prévoir directement le rendement de la production d'un radio-isotope médical donné en fonction des informations communiquées par l'utilisateur. Baptisé « Medical Isotope Browser », cet outil peut être utilisé par des chercheurs en médecine ainsi que par les acteurs de l'industrie radiopharmaceutique pour mettre au jour des circuits de production de radio-isotopes encore inconnus. Il s'agit d'une avancée qui contribuera largement à la lutte contre le cancer et d'autres maladies. La production de radio-isotopes médicaux à des fins thérapeutiques ou diagnostiques repose sur des processus très complexes faisant intervenir des réactions nucléaires, processus auxquels seuls les physiciens nucléaires ont accès au moyen de mesures et de théories sur les réactions nucléaires. Grâce à Medical Isotope Browser, ces informations fondamentales

sont désormais mises à la disposition d'un grand nombre de non-spécialistes via une interface utilisateur graphique.

207. L'outil Medical Isotope Browser a été officiellement mis en ligne à l'occasion du Colloque international sur les tendances en matière de radiopharmaceutiques, qui a été organisé par l'Agence à Vienne en octobre-novembre 2019. Sa première version couvre uniquement les isotopes produits par des accélérateurs de particules chargées. Les utilisateurs peuvent indiquer les caractéristiques de l'accélérateur, telles que le type de projectile (proton, deutéron, tritium, hélium 3 ou particule alpha), le courant en microampères, les énergies incidente et de sortie, ainsi que la matière cible et le radio-isotope à produire. Ils peuvent ensuite obtenir quasiment immédiatement le rendement isotopique requis en fonction du temps d'irradiation et de refroidissement de même qu'une description détaillée de toutes les impuretés produites. La prochaine version de l'outil couvrira également la production de radio-isotopes médicaux au moyen de réacteurs de recherche et de faisceaux d'électrons (figure D-6).

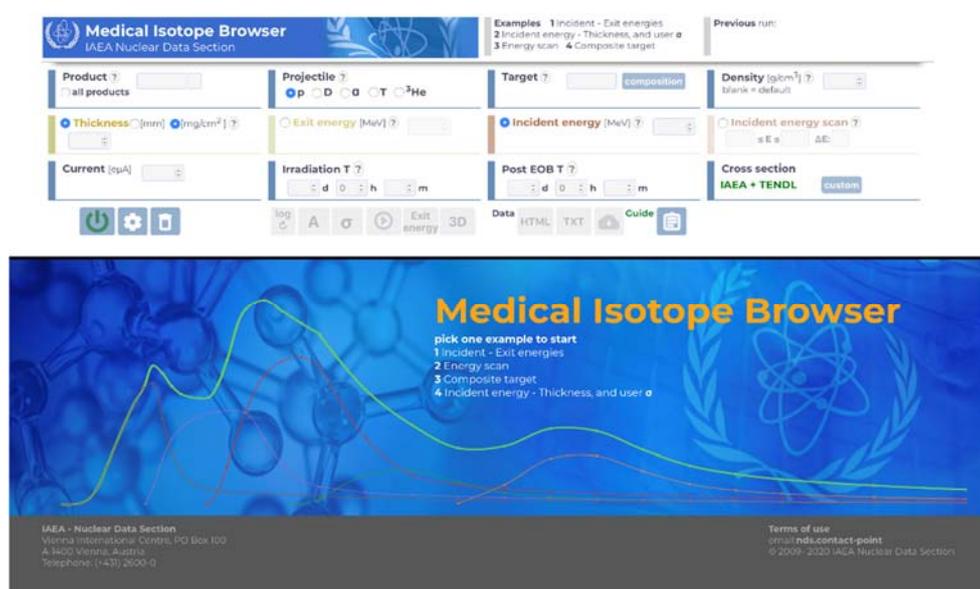


FIG. D-6. Page d'accueil de l'outil Medical Isotope Browser accessible à l'adresse <http://nds.iaea.org/mib>.

E. Santé humaine

E.1. Une nouvelle méthode basée sur un double traceur isotopique pour l'évaluation de la qualité des protéines chez l'être humain

E.1.1. Les protéines et leurs incidences sur la croissance et le développement de l'enfant

208. L'apport en protéines au cours des deux premières années de la vie a des incidences sur la croissance, mais aussi sur le risque de souffrir d'obésité ou de contracter des maladies non transmissibles plus tard dans la vie. Il peut également avoir des conséquences sur le taux de guérison après une période de malnutrition aiguë. Les protéines sont constituées d'acides aminés essentiels (AAE) et non essentiels. Ces derniers peuvent être synthétisés par le corps tandis que les premiers proviennent exclusivement de l'alimentation. Les enfants qui sont exposés à un risque élevé de retard de croissance consomment

souvent des aliments dans lesquels la plupart des AAE, tels que le tryptophane, la méthionine, la thréonine, la phénylalanine et la lysine, sont en quantité insuffisante. Les données dont nous disposons sur l'apport nécessaire en AAE pour la croissance du jeune enfant et sur leur digestibilité ne sont toutefois pas assez nombreuses.

E.1.2. Qualité des protéines

Le saviez-vous ?

La digestibilité des protéines varie en fonction de leur source : les protéines d'origine animale sont souvent plus digestibles que les protéines végétales.

209. Pour déterminer la qualité des protéines, on mesure leur capacité de fournir, quand elles sont consommées, une quantité adéquate d'AAE biodisponibles qui vont assurer l'équilibre de l'organisme, la croissance, les besoins physiologiques, l'activité physique et la résistance aux infections. Les AAE que contient une protéine, sa digestibilité et le taux d'absorption des acides aminés jouent un rôle important. Ces caractéristiques sont associées aux fins de la détermination de l'indice protéique d'un aliment donné. Par exemple, la lysine et la thréonine se trouvent dans des quantités qui sont loin d'être optimales dans la plupart des céréales et les légumineuses ne contiennent pas suffisamment de méthionine.

E.1.3. Évaluation de la qualité des protéines chez l'être humain par la méthode du double traceur isotopique

210. Les méthodes actuellement disponibles pour mesurer la digestibilité des acides aminés dans le tractus gastro-intestinal supérieur sont invasives ; il faut en effet accéder aux effluents à la sortie de l'intestin grêle, ce qui implique de procéder à une intubation intestinale chez l'être humain. Il existe néanmoins une méthode beaucoup moins invasive qui repose sur l'utilisation conjointe de deux traceurs isotopiques, le deutérium (^2H) et le carbone 13 (^{13}C). Le sujet ingère une protéine-test intrinsèquement marquée par un isotope en même temps qu'une protéine de référence marquée par un autre isotope. La protéine de référence peut être un mélange d'acides aminés quelconques (qui n'a pas besoin d'être digéré) ou une protéine entière (spiruline marquée par un isotope, par exemple) dont la digestibilité est prédéterminée. Le bilan postprandial indiquant les taux des AAE marqués par ces différents isotopes dans le sang permet ensuite d'évaluer la digestibilité réelle des AAE de la protéine-test. Cette technique a été mise au point en réponse à une demande formulée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) dans le contexte d'un PRC intitulé « Biodisponibilité des protéines dans les régimes alimentaires à base de plantes », mené avec l'appui de l'AIEA. Dans le cadre de ce PRC, on a employé, avec l'appui technique d'experts de France et du Royaume-Uni, une méthode de comptage des acides aminés essentiels digestibles recommandée par la FAO, pour déterminer la qualité des protéines d'une grande variété de légumineuses cultivées localement au Brésil, en Inde, en Jamaïque, au Maroc, au Mexique, au Pakistan et en Thaïlande. Cette méthode comprend deux phases, qui sont décrites ci-après.

E.1.4. Marquage intrinsèque des légumineuses à l'oxyde de deutérium pendant la croissance en champ

211. On produit des légumineuses intrinsèquement marquées en leur administrant un bolus d'oxyde de deutérium (D_2O) lors de l'arrosage habituel des plants. On laisse ceux-ci arriver à maturité puis on récolte les graines séchées (figure E-1).



FIG. E-1. Marquage intrinsèque de légumineuses au D₂O pendant la croissance.
(Photo : M^{me} Wantanee Kriengsinyos, Université Mahidol, Thaïlande)

E.1.5. Étude menée chez l'être humain après ingestion de repas-tests à base de légumineuses intrinsèquement marquées

212. La méthode de double traceur isotopique est mise en œuvre dans le cadre d'un protocole d'alimentation de huit heures (chez l'adulte) ou de six heures (chez l'enfant). Chez l'adulte, cinq échantillons sanguins sont prélevés, une fois au début de l'étude, puis toutes les heures à partir de la cinquième heure jusqu'à la huitième y inclus après l'ingestion du repas-test. Chez les enfants en bas âge, seuls trois échantillons sont prélevés, l'un au début de l'étude et les deux autres à la cinquième et à la sixième heure. La légumineuse ou l'aliment-test peut être marqué intrinsèquement au D₂O, par exemple, et une petite quantité de protéine « standard » marquée au ¹³C est ajoutée au repas afin de permettre la comparaison des niveaux d'AAE entre la légumineuse-test et la protéine de référence administrée simultanément. Pour la protéine de référence, on peut utiliser une protéine unicellulaire hautement enrichie au ¹³C disponible sur le marché (spiruline au ¹³C). Les taux d'acides aminés marqués dans le sang et dans le repas-test permettent de calculer le taux de digestibilité des protéines de la légumineuse (figure E-2). En ajoutant un acide aminé marqué (phénylalanine au ¹³C) au repas-test, on peut également estimer son taux d'absorption d'après son taux dans le sang.



FIG. E-2. Repas-test et participante à l'étude.
(Photos : Wantanee Kriengsinyos, Université Mahidol, Thaïlande)

E.1.6. Intérêt de la méthode

213. Cette méthode a déjà été mise en pratique sur une cohorte de nourrissons et d'enfants de moins de deux ans en Inde aux fins de l'évaluation de la digestibilité réelle des AAE de quatre aliments couramment consommés. Il est apparu que la digestibilité d'AAE importants tels que la méthionine et la thréonine était très faible. Cette étude a également révélé qu'il existait un rapport certain entre le taux de digestibilité des acides aminés des aliments et la taille des enfants. Ces nouvelles données sur la digestibilité des acides aminés aideront considérablement la FAO à formuler des recommandations sur

la qualité des protéines destinées à la consommation humaine à tous les âges, au titre de l'objectif de développement durable 2 : éliminer la faim dans le monde. Étant donné les problèmes suscités par les changements climatiques et la rareté des ressources en eau, la teneur en protéines et l'apport des sources de protéines dans les céréales seront probablement amenés à diminuer, tandis que la teneur en protéines des légumineuses pourrait ne pas être autant affectée. Il serait intéressant de déterminer la teneur en protéines des variétés de plantes résistantes à la sécheresse et la digestibilité des protéines qu'elles contiennent, et d'établir des projections concernant l'apport futur de protéines de qualité élevée au moyen de techniques précises telles que la méthode du double traceur.

E.2. La biodosimétrie en tant qu'outil de diagnostic et de prévision en situation d'urgence nucléaire ou radiologique et en médecine

La biodosimétrie permet de déterminer la dose de rayonnements reçue par une personne ou un patient. Cette méthode repose sur l'étude de marqueurs biologiques tels que les aberrations chromosomiques, qui sont visibles au microscope.

214. La biodosimétrie consiste à analyser des échantillons biologiques (notamment sanguins) généralement prélevés sur des personnes ayant été exposées à des rayonnements, par inhalation ou par ingestion, par exemple, en vue d'évaluer leur exposition. La résonance paramagnétique électronique est parfois appelée biodosimétrie quand elle est utilisée sur l'émail des dents ou sur les os pour la dosimétrie rétrospective. En situation d'urgence radiologique ou nucléaire, la biodosimétrie est essentielle pour déterminer rapidement les doses de rayonnements reçues par les personnes exposées (p. ex. travailleurs ou population). La biodosimétrie rétrospective permet même d'obtenir des informations sur une exposition à des rayonnements datant de plusieurs années, comme par exemple lors de l'accident de Tchernobyl ou des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki. Elle peut également être utilisée pour des applications cliniques et ainsi aider les radio-oncologues à améliorer les résultats médicaux, par exemple.

E.2.1. La biodosimétrie permet d'établir des rapports entre biomarqueurs et doses

215. La biodosimétrie est l'un des domaines les mieux développés de la radiobiologie. Ses aspects techniques sont bien aboutis et sont régis par des règles internationales⁷, notamment par quatre normes ISO qui encadrent la mise en œuvre des services de biodosimétrie : ISO 19238:2014, ISO 21243:2008, ISO 17099:2014 et ISO 20046:2019.

216. En substance, il s'agit d'établir un rapport entre les biomarqueurs et la dose reçue par un patient à l'aide de courbes d'étalonnage (figure E-3). La détermination de la dose est importante pour le choix de la bonne stratégie médicale à mettre en œuvre pour traiter une personne qui a été exposée à des rayonnements lors d'un accident. Les courbes d'étalonnage résultent d'une modélisation mathématique fondée sur des données empiriques ; les erreurs n'apparaissent pas.

⁷ AIEA, Dosimétrie cytogénétique : Applications à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence radiologique (2011), p. 152.

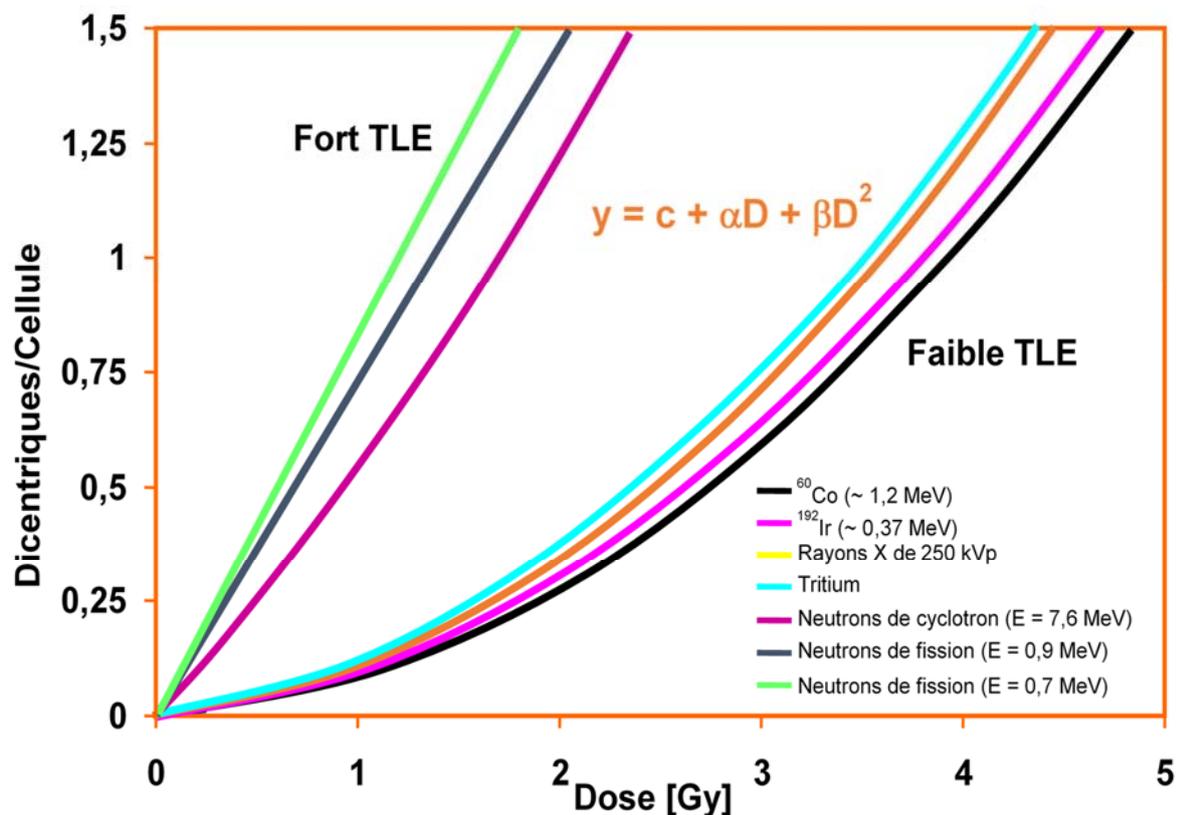


FIG. E-3. Courbes dose-réponse linéaires et linéaires quadratiques des dicentriques sous rayonnements à faible et à fort transfert linéique d'énergie. (Source : Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies – Training Materials, Emergency Preparedness and Response, EPR-Biodosimetry/T, 2012, IAEA, 2013)

E.2.2. Méthodes de biodosimétrie standard

217. Quatre méthodes standardisées de biodosimétrie cytogénétique sont actuellement utilisées : i) l'analyse conventionnelle des aberrations chromosomiques instables (« dicentriques ») ; ii) la mesure des aberrations chromosomiques stables à l'aide de la méthode d'hybridation in situ en fluorescence (« analyse des translocations ») ; iii) l'analyse de la condensation chromosomique prématurée (CCP) ; et iv) l'analyse des micronoyaux par blocage de la cytokinèse (CBMN).

E.2.3. Principales méthodes de biodosimétrie élaborées depuis 2000

218. Plusieurs nouvelles méthodes révolutionnaires ont récemment été mises au point dans le domaine de la biodosimétrie⁸. Les chromosomes dicentriques qui apparaissent dans les lymphocytes humains à la suite d'une exposition à des rayonnements peuvent être détectés à l'aide de la méthode d'hybridation in situ en fluorescence des acides nucléiques peptidiques (PNA-FISH) (figure E-4), qui permet un comptage plus efficace des aberrations dicentriques pour la détermination des aberrations chromosomiques instables. Grâce aux sondes télomériques et centromériques utilisées pendant l'hybridation, on bénéficie d'une résolution plus élevée pour la détection des chromosomes dicentriques lors de l'analyse.

⁸ Zeegers, D., et al., Biomarkers of Ionizing Radiation Exposure: A Multiparametric Approach, Genome Integrity 8(1) (2017).

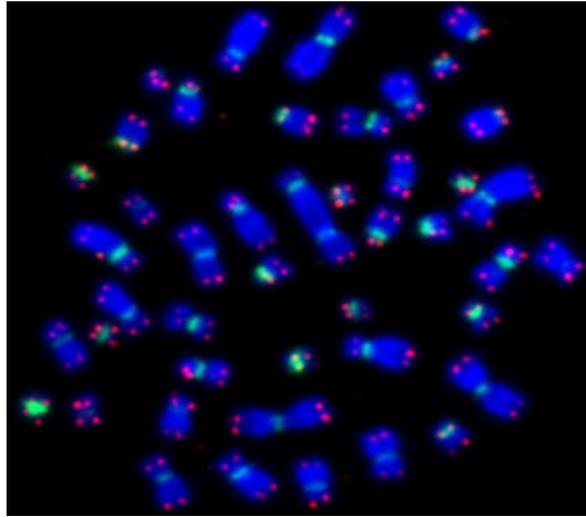


FIG. E-4. PNA-FISH : les sondes PNA marquées à la cyanine 3 (télomériques) et à l'isothiocyanate de fluorescéine (centromériques), en rouge et vert, sont contre-colorées à l'aide de diamidino-4,6 phénylindole-2, en bleu. (Photo : Prof. Hande, Université nationale de Singapour)

219. La technique d'hybridation in situ en fluorescence multicolore (mFISH) est une autre méthode qui permet de détecter les aberrations interchromosomiques que sont les translocations chromosomiques induites par des rayonnements ionisants dans les lymphocytes humains (figure E-5).

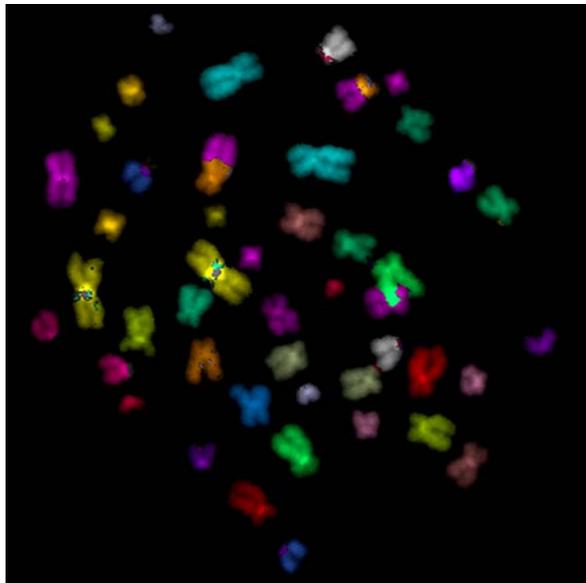
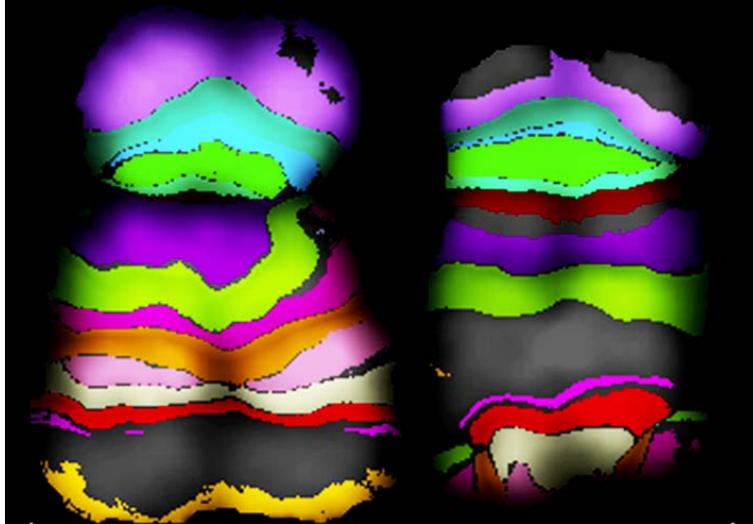


FIG. E-5. La technique mFISH permet d'attribuer une couleur différente à chaque chromosome (1 à 22, X et Y) grâce à un marquage combinatoire qui produit une hybridation à 24 couleurs. Tous les chromosomes bicolores indiquent des translocations interchromosomiques. (Photo : Prof. Hande, Université nationale de Singapour)

220. Enfin, la technique de zébrage chromosomique multicolore (mBAND) est sans doute la méthode de dosimétrie la plus évoluée, car elle permet de détecter les aberrations intrachromosomiques. On considère que ce type de biomarqueur est caractéristique des rayonnements à fort transfert linéique d'énergie (figure E-6)⁹.



*FIG. E-6. Aberrations intrachromosomiques dans le chromosome 5 détectées à l'aide de la technique mBAND FISH, qui permet une coloration spécifique de chaque région.
(Photo : Prof. Hande, Université nationale de Singapour)*

E.2.4. Orientations futures

221. Les nouvelles méthodes de biodosimétrie permettent plus facilement d'identifier les expositions aux rayonnements chez l'être humain, de les quantifier et d'en déterminer les sources possibles et la nature. Les méthodes de biodosimétrie ont récemment été introduites en radio-oncologie et en médecine nucléaire, ainsi qu'en radiologie diagnostique et interventionnelle¹⁰. L'Agence a lancé un nouveau PRC destiné à faciliter les échanges de vue entre spécialistes de la biodosimétrie et radio-oncologues¹¹. On espère que l'amélioration remarquable des méthodes de biodosimétrie permettra d'évaluer de manière plus exhaustive les conséquences des expositions médicales aux rayonnements, qu'elles soient planifiées ou accidentelles.

⁹ Vinnikov, V. and Belyakov, O., Clinical Applications of Biomarkers of Radiation Exposure: Limitations and Possible Solutions through Coordinated Research. Radiat Prot Dosimetry, 2019.

¹⁰ Vinnikov, V. and Belyakov, O., Radiation Exposure Biomarkers in the Practice of Medical Radiology: Cooperative Research and the Role of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Biodosimetry/Radiobiology Laboratory. Health Physics, 2020.

¹¹ *Ibid.*

F. Alimentation et agriculture

F.1. Applications renforcées de la technique de l'insecte stérile dans la lutte contre les insectes ravageurs envahissants (prévention et éradication)

F.1.1. Contexte

222. Les espèces envahissantes peuvent interférer avec les services écosystémiques ou perturber des écosystèmes entiers et entraîner le déclin de nombreuses espèces indigènes qui sont maintenant inscrites sur la liste des espèces en danger ou menacées¹². Leur impact est la deuxième cause d'appauvrissement de la biodiversité dans le monde après la destruction des habitats¹³. Les coûts importants de la lutte contre les insectes ravageurs envahissants et ceux dus aux pertes de production sont des problèmes transfrontaliers qui exigent une coordination régionale et internationale efficace.

223. La multiplication rapide des transports et des échanges commerciaux internationaux, des migrations humaines et des mouvements de bétail et de produits agricoles d'une région géographique à l'autre a considérablement accru les probabilités d'introduction d'espèces de ravageurs envahissants dans de nouvelles régions. Le nombre d'introductions d'espèces non indigènes a augmenté ces 200 dernières années, passant de 7,7 par an en moyenne entre 1 500 et 1 800 à un pic de 585 en 1996¹⁴. Avec le temps, les arthropodes et autres invertébrés sont devenus des envahisseurs de plus en plus actifs, leurs incursions ayant augmenté de manière exponentielle au cours des 45 dernières années. On estime que les dommages causés à l'économie mondiale par les espèces envahissantes s'élèvent à environ 1,4 billion de dollars, ce qui représentait environ 5 % de l'économie mondiale totale en 2002.

F. 1.1.1. Liens entre insectes ravageurs envahissants et changements climatiques

224. Les changements climatiques résultant des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique non seulement agissent sur la répartition de nombreuses espèces, mais favorisent également la survie des insectes ravageurs envahissants dans des régions auparavant inhospitalières¹⁵. Tandis que l'augmentation des mouvements et des échanges de marchandises accélère la redistribution de nombreux insectes ravageurs, les changements climatiques et les transformations qu'ils induisent dans l'utilisation des terres créeront probablement de nouvelles niches écologiques, permettant à de nouveaux ravageurs de s'établir dans de nouveaux territoires et modifiant en profondeur l'aire de répartition des espèces (figure F-1).

¹² Charles, H., Dukes, J., Impacts of invasive species on ecosystem services, *Ecological Studies* 193 (2007) 217–237.

¹³ Pimentel, D., (Ed.) *Biological Invasions: Economic and Environmental Costs of Alien Plant, Animal and Microbe Species*, 2nd edn. (2011) CRC Press, Boca Raton, 369. Cette publication est utilisée plusieurs fois comme référence dans la partie F.

¹⁴ Hulme, P. E., Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization, *Journal of Applied Ecology* 46 (2009) 10-18.

¹⁵ Ziska, L. H., Dukes, J. S., (Eds.) *Invasive species and global climate change*, (2014) CABI, Wallingford, 368.



FIG. F-1. Exemple d'insecte ravageur envahissant [pyrale du cactus, *Cactoblastis cactorum* (Berg)].
(Photo : Ignacio Baez, Centre de science et technologie phytosanitaire,
Département de l'agriculture des États-Unis)

225. Les projections relatives aux changements climatiques à l'horizon 2050 prévoient une augmentation nette moyenne de 18 % de la fréquence des invasions d'arthropodes. Cette augmentation, qui concerne non seulement les ravageurs des plantes mais aussi les maladies transmises par des vecteurs, affecte la distribution spatio-temporelle de ceux-ci et la dynamique de leurs populations, stimule leur cycle de vie (y compris celui des parasites) et leurs modes de transmission, et leur offre davantage de possibilités de s'implanter dans de nouveaux hôtes. Des températures plus élevées peuvent accélérer le développement des ravageurs et des agents pathogènes et raccourcir leur temps de reproduction, augmentant ainsi le nombre de générations par an, ce qui peut entraîner une augmentation de la taille des populations d'agents pathogènes et de parasites et de la probabilité de mutations en des souches plus virulentes. Pour atténuer ou traiter ces problèmes causés par le climat et la mondialisation, il faut appliquer de nouvelles lois et politiques¹⁶. Il faut notamment soutenir la mise au point de méthodes de lutte innovantes, comme la technique de l'insecte stérile (TIS), atténuer et gérer ces incursions biologiques et contenir l'expansion géographique des populations de ravageurs non indigènes.

F.1.1.2 La TIS, outil de lutte contre les insectes ravageurs envahissants

226. Les outils nécessaires pour éradiquer avec une extrême précision tous les individus d'une population cible font souvent défaut dans les campagnes d'éradication des insectes ravageurs envahissants ; celles-ci consistent donc surtout à pulvériser des insecticides de manière indifférenciée et massive, à éliminer de manière radicale les animaux et les plantes infestés, voire à détruire, à grande échelle, des troupeaux, des cultures et des vergers entiers.

¹⁶ Perrings, C., Dehnen-Schmutz, K., Touza, J., Williamson, M., How to manage biological invasions under globalization, *Trends in Ecology and Evolution* 20(5) (2005) 212–215.

Mise en place de la TIS

La TIS, utilisée en tant qu'élément important d'une méthode de gestion intégrée des ravageurs à l'échelle d'une zone (GIREZ), peut empêcher l'établissement d'une population envahissante, la circonscrire et l'éradiquer sans susciter l'opposition du public ou laisser une empreinte écologique. Comme elle peut être adaptée à chaque espèce et qu'elle n'affecte donc pas d'autres organismes bénéfiques ou non ciblés, c'est un outil idéal pour faciliter l'éradication de populations d'insectes ravageurs envahissants. Son efficacité, en particulier dans les dernières phases des campagnes d'éradication, est inversement proportionnelle à la densité de la population cible : plus celle-ci est faible, plus vite l'objectif d'éradication sera atteint. En outre, elle se combine bien avec d'autres méthodes de réduction biologiques. Elle peut être appliquée par voie aérienne et, par conséquent, est efficace sur un relief irrégulier et dans les zones à accès limité.

F.1.2. Des techniques et des stratégies liées à la TIS en amélioration

227. Au cours des dernières décennies, l'amélioration des techniques et des protocoles d'élevage en masse, de stérilisation et de lâcher d'insectes stériles a permis d'accroître sensiblement la rentabilité de la GIREZ comportant un volet TIS. Cela a permis d'étendre cette technique à d'autres insectes ravageurs importants, comme ceux bien connus qui s'attaquent aux plantes, aux animaux et à la santé humaine. On l'utilise notamment pour lutter contre leurs incursions et l'établissement d'espèces récemment apparues. En cas d'introduction d'une espèce invasive dans les États Membres, les données sur les doses recommandées pour la stérilisation des insectes sont compilées et disponibles pour plus de 360 espèces d'insectes dans la Base internationale de données sur la désinsectisation et sur la stérilisation des insectes (IDIDAS).

228. Les programmes de lâchers préventifs contre la mouche méditerranéenne des fruits menés en Californie et en Floride illustrent la manière dont la TIS est appliquée à titre préventif¹⁷. Les incursions de cet insecte dans ces États américains se sont multipliées, et l'on a détecté à maintes reprises l'irruption et la présence de cette mouche dans des zones urbaines, en particulier à proximité des aéroports internationaux. Ces incursions sont liées à la contrebande de fruits et à l'augmentation rapide du volume des expéditions et du trafic aérien. On a donc mené des programmes d'éradication étendus et coûteux qui consistaient initialement surtout à pulvériser des appâts au malathion par voie aérienne au-dessus des zones urbaines, ce qui a suscité beaucoup d'indignation au sein de la population. Par conséquent, un programme de lâchers préventifs contre la mouche méditerranéenne des fruits a été lancé en 1994. Couvrant actuellement une superficie de 4 582 km² dans le bassin de Los Angeles et le comté d'Orange, en Californie, il a permis d'y réduire de plus de 98 % les apparitions de foyers de cet insecte. Dans les zones de la Floride couvertes par le programme, il n'y a plus aucun foyer¹⁸. Malgré des incursions récurrentes de ce ravageur envahissant, la partie continentale des États-Unis est donc toujours considérée au niveau international comme une zone exempte de mouches méditerranéennes des fruits.

229. L'éradication en République dominicaine de la mouche méditerranéenne des fruits, dont la présence avait été signalée en mars 2015, illustre la manière dont la TIS peut être appliquée face aux incursions d'organismes nuisibles et à l'établissement d'espèces naissantes. Les principaux partenaires commerciaux de ce pays ont immédiatement interdit les importations de fruits et de légumes en sa provenance, ce qui a entraîné une perte de recettes d'exportation estimée à quelque 40 millions de dollars

¹⁷ Dowell, R. V., Siddiqui, I. A., Meyer, F., Spaugy, E. L., Mediterranean fruit fly preventative release programme in southern California, 369-375. Dans Tan, K. H., (Ed.) Proceedings: Area-Wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests. Conférence internationale sur la lutte contre les insectes ravageurs à l'échelle d'une zone et 5^e Colloque international sur les mouches des fruits ayant un impact économique, 28 mai-5 juin 1998, (2000) Penerbit Universiti Sains Malaysia, Malaisie.

¹⁸ United States Department of Agriculture, 2014 Review of Sterile Insect Release Facilities: Sarasota, Florida and Los Alamitos, California. Mediterranean Fruit Fly Preventive Release Program, (2014) 30.

et a mis en péril des milliers d'emplois. Le Gouvernement de la République dominicaine a donc mis en place en urgence le programme Moscamed-DR.

230. La Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, en étroite coopération avec le Département de l'agriculture des États-Unis et le Programme Moscamed regroupant le Guatemala, le Mexique et les États-Unis d'Amérique, a fourni une assistance technique à la République dominicaine pour réduire sur son territoire les populations de cet important ravageur envahissant et appliquer la TIS comme principal outil d'éradication. L'Organisation internationale régionale pour la protection des plantes et la santé animale et l'Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture ont également participé à cette vaste entreprise. Entre octobre 2015 et mai 2017, plus de 4 milliards de mouches stériles ont été expédiées de l'installation d'El Pino, au Guatemala, et relâchées dans les zones touchées (figure F-2). L'éradication de la mouche méditerranéenne des fruits a été officiellement déclarée en juillet 2017¹⁹. Si cet insecte ravageur envahissant et destructeur avait pu s'établir, toute la région des Caraïbes et tous ses partenaires commerciaux auraient été exposés à un risque grave d'apparition de foyers aux effets dévastateurs et de perte d'une part considérable de leurs recettes d'exportation.



*FIG. F-2. Préparatifs en vue d'un lâcher aérien d'insectes stériles.
(Photo : Programme Moscamed au Guatemala)*

F.1.3. Lutte contre les insectes ravageurs envahissants : prévention et préparation

231. Pour un grand nombre de régions et de pays actuellement exempts de certaines espèces de ravageurs, la question n'est pas de savoir si mais quand l'invasion se produira (figure F-3). Au vu des tendances en matière de voyages et de commerce à l'échelle mondiale, il est de plus en plus probable que toute espèce, quelle qu'elle soit, pourra atteindre n'importe quel endroit dans le monde.

¹⁹ Zavala-López, J. L., Marte-Díaz, G., Martínez-Pujols, F., Successful area-wide Mediterranean fruit fly eradication in the Dominican Republic. *Dans* J. Hendrichs, R. Pereira and M.J.B. Vreysen (Eds.), Area-wide integrated pest management: development and field application (à paraître).



FIG. F-3. Inspection phytosanitaire des bagages à un point d'entrée : les chiens détectent les espèces envahissantes à des stades immatures. (Photo : FUNBAPA Argentine)

232. Il ressort généralement des analyses coûts-avantages que la préparation aux incursions, qui permet d'intervenir rapidement et efficacement, est beaucoup moins onéreuse que la mise en œuvre de vastes et coûteuses campagnes d'éradication, dont le succès est incertain, ou l'application sur le long terme des mesures de lutte qui s'imposent en cas d'établissement permanent d'un ravageur important. L'application de la TIS dans la lutte contre les principaux insectes ravageurs envahissants présente un énorme potentiel ; cependant, toutes les techniques qui entrent en ligne de compte à cette fin ne sont souvent que partiellement disponibles, voire pas du tout, quand apparaissent de nouveaux foyers. Il est donc important de les développer en vue de leur application aux pires ravageurs non indigènes qui peuvent se prêter à cet exercice²⁰.

233. L'optimisation des techniques d'application de la TIS à l'échelle d'une zone et leur diversification en vue de la lutte contre d'autres insectes ravageurs bien connus permettront d'étendre encore l'utilisation de la TIS, qui constituera un outil stratégique pour faire face à l'incursion croissante de ravageurs envahissants due aux voyages, aux échanges commerciaux et aux changements climatiques.

F.2. Les techniques nucléaires au service des systèmes de traçabilité des aliments

F.2.1. Contexte

234. De nombreux aliments se vendent à des prix majorés en raison de la mention, sur leurs étiquettes, d'une « valeur ajoutée » liée à leur origine géographique, à leur méthode de production ou à des caractéristiques distinctives. Les produits du terroir peuvent s'inscrire dans un cercle vertueux de qualité durable fondé sur la préservation des ressources locales et d'autres facteurs décrits dans la publication de la FAO intitulée « Territoires, produits et acteurs locaux : des liens de qualité »²¹.

235. Parmi les méthodes d'analyse les plus prometteuses en matière de vérification de l'indication géographique figurent notamment l'analyse des isotopes stables et des éléments en traces, la spectroscopie par résonance magnétique, notamment la spectroscopie par résonance magnétique

²⁰ Invasive Species Specialist Group, Global Invasive Species Database, Global Invasive Species Programme (GISP) (2018). <http://www.issg.org/database/species/search.asp?st=100ss&fr=1&str=&lang=EN>

²¹ FAO, Strengthening sustainable food systems through geographical indications: An analysis of economic impacts (2018).

nucléaire (RMN) et par résonance paramagnétique électronique ou résonance électronique de spin, et l'analyse par spectrométrie de masse (SM). Par ailleurs, l'Union européenne a adopté une recommandation qui stipule que les indications géographiques nouvellement enregistrées devraient être assorties d'une référence à une procédure d'analyse adaptée permettant de vérifier la provenance et les qualités essentielles du produit.

Qu'est-ce que l'indication géographique ?

L'indication géographique définit l'origine et/ou la méthode de production d'un aliment ayant une qualité, une notoriété ou d'autres caractéristiques essentiellement attribuables à son origine géographique ou à son terroir. Elle présente les avantages suivants : assurance de la qualité (notoriété), juste concurrence, protection de l'appellation sur les marchés (national et international), prix supérieur, association des produits de valeur et des zones rurales, rapprochement des consommateurs et des producteurs et protection des traditions. La base de données DOOR (Database of Origin and Registration) de l'Union européenne donne une vue d'ensemble des milliers de produits agricoles et alimentaires qui, partout dans le monde, ont une indication géographique enregistrée.

F.2.2. Techniques nucléaires

236. Les principales techniques nucléaires ou isotopiques dont on peut se servir pour contrôler l'origine des aliments sont décrites dans les paragraphes ci-après. Elles comprennent entre autres : l'analyse du rapport des isotopes stables des éléments lourds à l'aide de la spectrométrie de masse à thermo-ionisation (TIMS) et d'un spectromètre de masse multicollecteur à source plasma à couplage inductif (MC-ICP-MS) ; et l'analyse multi-élémentaire par spectrométrie de masse à source plasma à couplage inductif (ICP-MS), spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES), spectrométrie à fluorescence X, analyse par activation neutronique (AAN) et par des techniques connexes. Il est également possible de recourir à des techniques telles que la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) et la spectroscopie de masse aux fins de la détermination des profils ou de l'analyse non ciblée des métabolites, de même qu'à d'autres méthodes nucléaires rapides appliquées dans les tests de présomption, comme la spectrométrie à mobilité ionique.

237. La grande variété et la nature complémentaire de ces techniques fournissent une assise solide sur laquelle s'appuyer pour déterminer l'origine et l'authenticité des aliments de façon à promouvoir les systèmes de traçabilité des aliments et les aliments à valeur ajoutée. De plus, l'efficacité éprouvée de chacune de ces technologies pour ce qui est de contribuer avec succès à la détection de l'origine et de l'adultération des aliments constitue un aspect essentiel pour faciliter le transfert des connaissances ainsi qu'une mise en œuvre et une formation rapides dans les pays et les régions actuellement dépourvus de toute solution d'analyse.

Mesure des isotopes stables

238. Les techniques nucléaires tirent parti des variations globales systématiques des rapports des isotopes stables de plusieurs bioéléments (l'hydrogène, le carbone, l'azote, l'oxygène et le soufre), mesurés au moyen de la SMI, ainsi que des variations des isotopes lourds du strontium, et d'autres indicateurs biogéochimiques. En guise de première approximation, les mesures de l'abondance naturelle des isotopes stables donnent des indications sur la photosynthèse ou le régime alimentaire (rapports des isotopes du carbone et de l'azote) et sur l'origine géographique (rapports des isotopes de l'hydrogène,

de l'oxygène, du soufre et du strontium). Par exemple, la technique consistant à mesurer les rapports d'isotopes stables naturels présents dans les bioéléments (hydrogène, carbone, azote, oxygène et soufre) des aliments permet souvent d'obtenir des informations sur l'origine géographique ou la technique de production de ces aliments, par comparaison avec les rapports des isotopes présents dans l'environnement ou encore dans l'alimentation des animaux. Les isotopes du strontium, mesurés par TIMS ou MC-ICP-MS, renseignent également sur la géologie de la région de production, car cette information se transmet aux plantes et aux animaux par les fractions biodisponibles contenues dans les sols. Dans la mesure où les « empreintes » des isotopes stables des aliments sont intrinsèquement liées aux caractéristiques propres à la région de production, il n'est guère possible d'un point de vue économique de les manipuler artificiellement et de les contrefaire.

Analyse élémentaire

239. L'analyse élémentaire des aliments au moyen de l'ICP-MS révèle d'importantes informations sur la concentration en macro-éléments, en micro-éléments et en éléments en traces permettant de relier un aliment à son lieu de production et à tout procédé technologique auquel il aurait été soumis et qui aurait pu altérer sa composition élémentaire, tel que la mouture ou le broyage. On retrouve dans la composition des plantes les nutriments biodisponibles et mobilisés qui sont présents dans les sols sur lesquels elles ont été cultivées. Par exemple, les métaux alcalins, en particulier le rubidium et le césium, sont facilement mobilisés dans le sol et transportés dans les plantes, ce qui en fait de bons indicateurs de l'identité géographique.

240. La disponibilité des éléments en traces est conditionnée par plusieurs facteurs, tels que le pH, l'humidité et la porosité du sol, sans oublier sa teneur en argile et en humus. Par conséquent, compte tenu de la variété des sols présents et de la biodisponibilité, la composition élémentaire peut fournir une combinaison unique des marqueurs contenus dans les aliments, qui permet de déterminer l'origine géographique, et peut aider à assurer la traçabilité. De la même manière, les multiples éléments qui composent les tissus des animaux reflètent, dans une certaine mesure, les végétaux dont ceux-ci se nourrissent et peuvent être reliés à des zones de production précises, par exemple dans le cas des vaches laitières et des bovins à viande nourris au pâturage. En outre, l'analyse élémentaire permet d'en savoir plus sur la sécurité sanitaire des aliments en révélant la concentration en éléments susceptibles d'être toxiques, tels que l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure.

La métabolomique ou analyse des empreintes métabolomiques

241. L'analyse des métabolites présents dans les aliments constitue une autre technique importante couramment employée à des fins de vérification de l'authenticité. Les métabolites sont le produit des processus cellulaires ou moléculaires en œuvre dans un organisme et peuvent être caractérisés à l'aide de la spectroscopie RMN et de masse. La métabolomique peut être soit ciblée, lorsqu'elle vise des groupes de métabolites connexes pour fournir des informations fonctionnelles directes utiles à la modélisation métabolomique, soit non ciblée, lorsqu'elle décèle dans le métabolome des tendances qui permettent de différencier les différents ensembles d'échantillons et d'élaborer des modèles en vue du classement d'échantillons inconnus à partir du schéma ou de l'empreinte métabolique. Toutes ces techniques reposent en très grande partie sur l'analyse statistique à plusieurs variables, qui permet de traiter les données recueillies et d'interpréter les résultats (figure F-4).

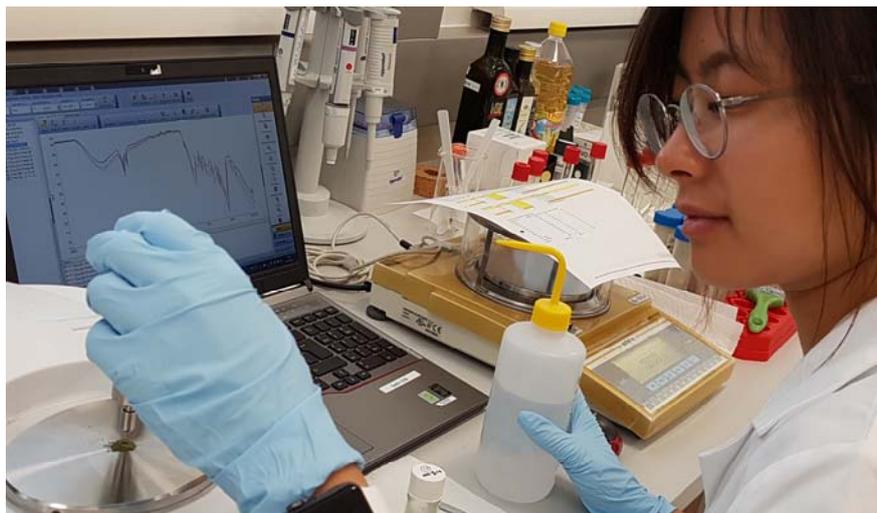


FIG. F-4. Une fonctionnaire de l'AIEA procède à l'analyse d'un échantillon de thé vert.
(Photo : AIEA)

242. La RMN et la résonance paramagnétique électronique peuvent être appliquées aux études menées sur des mélanges complexes présents dans les aliments, soit après une séparation simple des composants, soit sans séparation préalable. Elles peuvent renseigner sur l'origine géographique, la présence d'adultérants, la qualité et la transformation d'un aliment au moyen de certains procédés technologiques. Parmi ses applications possibles, on peut notamment mentionner l'analyse du miel, de jus de fruit et de vins au moyen de la spectroscopie RMN à champ élevé du proton pour en déterminer l'origine et y déceler la présence éventuelle d'adultérants. On compare les résultats obtenus pour un échantillon inconnu avec les profils d'échantillons authentiques dont la provenance est connue enregistrés dans d'une base de données, et deux cas de figure peuvent alors se présenter : soit l'échantillon est authentique et les profils correspondent, soit il ne l'est pas et on obtient une empreinte anormale. Ces techniques présentent un autre atout puisqu'elles permettent de procéder à une analyse plus approfondie de la région de l'anomalie du spectre afin d'isoler le ou les produits chimiques qui ont servi à adultérer le produit alimentaire. Par ailleurs, la caractérisation à l'aide de la résonance paramagnétique électronique constitue une technique de mesure sensible et précise de détection des espèces de radicaux organiques à électrons célibataires dans un champ magnétique permettant de vérifier si les normes d'assurance de la qualité et de sécurité sanitaire ont été respectées par les producteurs de fruits et légumes, d'épices et de produits analogues. La résonance paramagnétique électronique confirme l'utilisation de l'irradiation des aliments en détectant les antioxydants, les radicaux de cellulose et les radicaux de sucre cristallin dans les échantillons. L'irradiation des aliments consiste à les traiter à l'aide de rayonnements ionisants aux niveaux approuvés pour éliminer les organismes pathogènes et en prolonger la durée de conservation. Elle permet également d'en assurer la sécurité microbiologique en neutralisant les parasites et les microorganismes pathogènes et en éliminant les insectes et les bactéries nocives (telles qu'*Escherichia coli* dans les viandes de volailles et autres) souvent présents dans de nombreux produits alimentaires, grâce à une technologie de traitement destinée à améliorer la sécurité sanitaire des aliments.

Technologie d'analyse

243. Grâce aux récentes améliorations apportées aux instruments d'analyse, certaines techniques nucléaires et paramagnétiques électroniques gagnent en portabilité et en accessibilité. Ainsi, divers types d'instruments qui n'étaient auparavant utilisés qu'en laboratoire commencent à se trouver dans différents formats (fixes pour paillasse, portatifs ou de poche) plus abordables, et il est possible de s'en servir pour analyser les aliments afin d'y repérer des caractéristiques inhabituelles ou des anomalies. Par exemple, on trouve depuis peu des instruments fixes de RMN et de résonance paramagnétique

électronique relativement bon marché permettant d'exécuter des analyses qui nécessitaient auparavant des instruments de RM à champ élevé, lesquels étaient onéreux et faisaient appel à une infrastructure et à du personnel spécialisés.

244. Dans le même ordre d'idée, si l'on parvient à améliorer la sensibilité relative des spectromètres à fluorescence X, portatifs et de poche, ceux-ci pourraient avoir des applications dans le domaine de l'analyse des aliments en permettant d'établir les empreintes de leurs éléments. Une autre technique disponible en format fixe ou portatif présente un grand potentiel pour la vérification de l'authenticité des aliments : il s'agit de la chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie à mobilité ionique dans l'espace de tête, qui fait appel à une source de rayonnements de très faible énergie. La spectrométrie à mobilité ionique, couramment employée depuis de nombreuses années pour détecter les explosifs et les drogues illicites dans les aéroports, n'est utilisée que depuis peu pour confirmer l'authenticité et l'origine des aliments, ce qu'elle rend possible en permettant l'examen des composés organiques volatiles des produits alimentaires. Parmi les aliments dont on vérifie l'authenticité et l'origine figurent notamment les produits laitiers, le riz ainsi que les huiles végétales, de noix et de graines de grande valeur, comme l'huile d'argan marocaine.

F.2.3. Bases de données

245. Pour utiliser les technologies susmentionnées aux fins de la recherche de l'origine des aliments et de la vérification indépendante des systèmes de traçabilité, il faut caractériser les variations naturelles dans l'analyse des isotopes stables et des éléments en traces et dans les « empreintes » métaboliques des produits alimentaires authentiques porteurs d'une indication géographique, et ce, sur une période couvrant plusieurs cycles annuels ou cycles de récolte. Ces informations peuvent ensuite être intégrées dans une banque de référence ou une base de données sur l'origine des aliments, de sorte qu'il soit possible de les comparer aux caractéristiques de produits alimentaires présumés être contrefaits ou adulterés. Bien que les méthodes et les technologies existent, l'absence de bases de données ou leur interopérabilité réduite constitue le principal obstacle à l'utilisation de ces méthodes qui nous permettraient de procéder à l'analyse des isotopes stables et des éléments en traces et à l'étude des empreintes métaboliques à des fins de vérification de l'origine et de l'authenticité des aliments.

Le saviez-vous ?

Une base de données sur l'origine des aliments est une collection organisée de données, analysées au moyen de protocoles établis et recueillies à partir d'un nombre représentatif d'échantillons authentiques.

246. Une telle base de données a pour objet de définir la variabilité naturelle (et la variabilité technologique admissible) de certaines propriétés d'un produit alimentaire. Cette variabilité « naturelle » constitue un point de référence à partir duquel on peut établir des comparaisons lorsqu'on analyse des échantillons suspects ou lorsqu'on procède à une surveillance régulière d'échantillons prélevés sur le marché afin de détecter des cas de fraude, qu'il s'agisse par exemple d'un étiquetage trompeur ou d'une adultération du produit. Compte tenu de la finalité de ce type de base de données, qui est de faciliter le fonctionnement des systèmes de traçabilité (rappels ciblés ou de différents lots, par exemple), et des conséquences de la découverte d'un cas de non-conformité après l'analyse d'un échantillon, il est impératif que ces outils soient pris en charge par un hébergeur indépendant, digne de confiance et d'envergure mondiale, de sorte que les États Membres puissent y faire appel de manière régulière pour comparer des aliments présumés frauduleux ou contrefaits.

247. Il existe diverses techniques d'analyse nucléaires et connexes qui permettent de rechercher l'origine des denrées alimentaires et auxquelles on peut avoir recours pour renforcer les systèmes de traçabilité des aliments ou pour en vérifier l'efficacité en toute indépendance. Des nouveautés sont attendues dans ce domaine, notamment une miniaturisation plus poussée des instruments servant aux analyses de premier niveau, et ce grâce à l'utilisation de technologies émergentes, comme les nanomatériaux, et d'outils perfectionnés de traitement des données pour concevoir des instruments portatifs, rapides et non invasifs qui permettront d'analyser une quantité beaucoup plus importante d'échantillons d'aliments. Ainsi, on a déjà mis au point des prototypes de scanners d'aliments dont le dispositif d'analyse n'est autre qu'un simple ordiphone. Grâce à leur bon rapport coût-efficacité et à leur accessibilité, ces techniques pourraient permettre aux intervenants de la filière alimentaire, aux organismes de réglementation et même aux consommateurs d'analyser les aliments en différents points de la chaîne de valeur alimentaire, ce qui améliorerait considérablement l'efficacité des systèmes de contrôle.

248. L'intégration de ces instruments dans les systèmes d'analyse des aliments devrait entraîner un changement de paradigme, dans la mesure où les laboratoires chargés d'appliquer les techniques nucléaires et isotopiques très ciblées et très sensibles qui donnent accès à des informations cruciales n'auront plus à traiter de grandes quantités d'échantillons conformes et pourront se concentrer sur un nombre restreint d'échantillons déjà considérés comme suspects et présentant par conséquent un plus grand intérêt.

F.3. Application des techniques nucléaires à la surveillance des gaz à effet de serre pour atténuer l'impact des changements climatiques

F.3.1. Contexte

249. Les émissions des principaux gaz à effet de serre (GES), dont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), contribuent au réchauffement climatique, pesant ainsi sur la durabilité des systèmes de production agricole. D'après des données récentes publiées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il apparaît de manière indiscutable que les émissions anthropiques de GES ont atteint un niveau sans précédent²². Depuis 1900, la température moyenne de l'air à la surface du globe s'est accrue de 0,8 °C environ, la plus grande partie de cette hausse étant intervenue depuis le milieu des années 1970. Les changements qui se sont opérés dans l'agriculture et dans l'utilisation des terres sont à l'origine de quelque 25 % des émissions totales de GES, essentiellement en raison de l'utilisation inefficace des engrais chimiques et des effluents d'élevage, du surpâturage et de la déforestation. S'il est vrai que l'agriculture, de par les émissions de gaz à effet de serre qu'elle engendre, contribue de manière considérable aux changements climatiques, elle en est également victime compte tenu des effets néfastes de ces changements sur la disponibilité des ressources en eau, la fertilité et la qualité des sols ainsi que la productivité des cultures.

250. En dehors des sources directes d'émission de GES existent différentes sources indirectes, parmi lesquelles la volatilisation de l'ammoniac (NH₃) dans les systèmes agricoles (figure F-5). Des émissions d'ammoniac, dans une large fourchette allant de 10 % à 60 % de l'azote épandu, ont été signalées dans différents agroécosystèmes²³. Ces rejets d'ammoniac de grande ampleur qui se produisent dans le secteur agricole ont des conséquences sur les plans agronomique, environnemental et économique. À

²² GIEC (2014), Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019. Publications [document WGW]. GIEC – Équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. URL : <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html>.

²³ Zaman, M., Sagar, S., Stafford, A.D., Mitigation of ammonia losses from urea applied to a pastoral system: The effect of nBTP and timing and amount of irrigation, Proceedings of the New Zealand Grassland Association 75 (2013) 209–214.

titre d'exemple, ils entraînent des problèmes de santé tout autant que des problèmes environnementaux, notamment l'inflammation du système respiratoire, l'eutrophisation de l'eau et l'acidification des sols. À cela s'ajoute le fait que l'ammoniac agit comme une source secondaire de N_2O , gaz à effet de serre puissant qui contribue au réchauffement climatique. Qui plus est, la variabilité spatiale et temporelle des émissions de GES complique grandement leur évaluation et leur gestion au sein de divers agroécosystèmes et systèmes d'utilisation des terres et au-delà, tout comme l'hétérogénéité spatiale intrinsèque des surfaces exploitées. Les techniques isotopiques fournissent les outils nécessaires pour déterminer les profils d'émission, ce qui renseigne sur les techniques d'atténuation qui pourront donner des résultats.

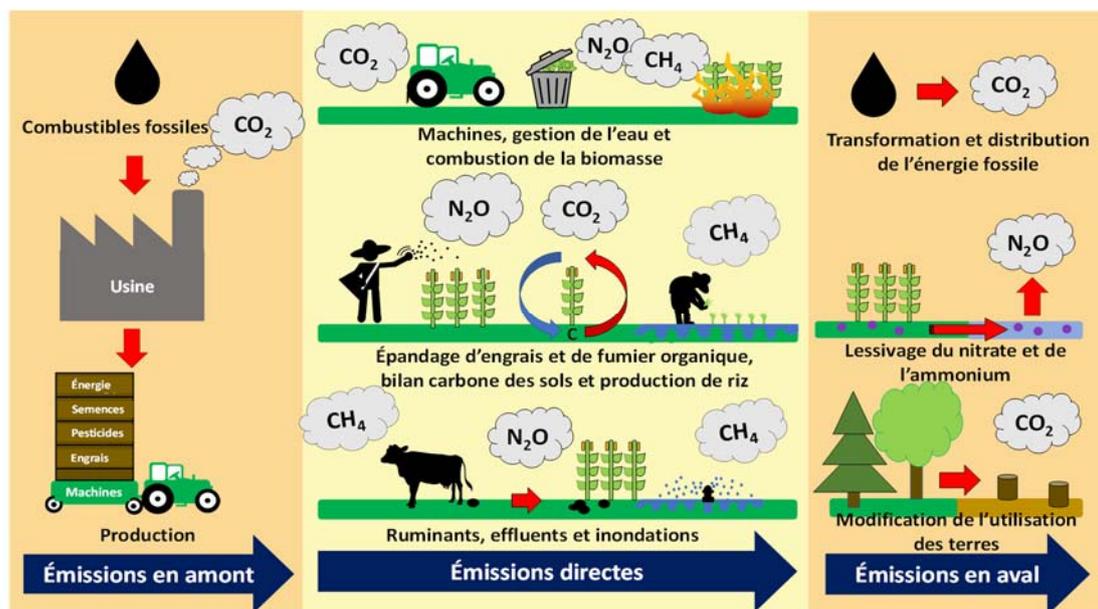


FIG. F-5. Représentation schématique des émissions directes (provenant du système de culture) et indirectes (en amont et en aval) engendrées par la production végétale.

F.3.2. Technologie au ^{13}C : vers une application élargie sur le terrain

251. Grâce aux innovations réalisées dans le domaine du carbone 13 (^{13}C), les études portant sur le cycle du carbone peuvent désormais passer du stade des expériences en laboratoire à petite échelle à celui des expériences menées sur le terrain. Pour permettre cette application à plus grande échelle, il est essentiel de disposer d'outils avancés d'analyse du ^{13}C en temps réel, tels que l'analyseur laser d'isotopes du CO_2 ²⁴. De plus, en marquant du matériel végétal à l'aide d'isotopes de ^{13}C , il est possible d'évaluer le taux de renouvellement de la matière organique du sol ainsi que la fixation et la stabilisation du carbone dans les agroécosystèmes. Le Laboratoire de la gestion des sols et de l'eau et de la nutrition des plantes de l'Agence mène des activités de recherche-développement sur les émissions de CO_2 , et le matériel végétal marqué au ^{13}C est maintenant à la disposition des États Membres. Ces outils technologiques, qui font appel à l'isotope ^{13}C , aideront non seulement à améliorer la résilience des systèmes de gestion des terres face aux changements climatiques, mais aussi à comprendre les répercussions que les divers scénarios sur l'évolution du climat (notamment en ce qui concerne les températures et les précipitations) auront sur le stockage du carbone et les émissions de CO_2 .

²⁴ Müller, C., et al., Quantification of N_2O emission pathways via a ^{15}N tracing model, *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44–54.

Ces techniques permettent d'obtenir des estimations précises des quantités de carbone fixées dans le sol ou rejetées par les différents bassins de carbone du sol²⁵.

F.3.3. Application de la technique de traçage à l'azote 15 pour la mesure de l'oxyde nitreux (N_2O) et la détermination des sources de N_2O

252. Pour comprendre les émissions de N_2O , il est très important de quantifier les pertes d'azote par les émissions de diazote (N_2), gaz sans effet de serre qui est émis en quantités bien plus élevées que le N_2O . Afin de mesurer avec précision les émissions de GES provenant des sols, des scientifiques du Programme mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture et de l'Université Justus Liebig, à Giessen (Allemagne), ont travaillé en collaboration et mené à bien de nombreuses expériences de laboratoire et sur le terrain. Celles-ci ont abouti à la mise au point d'une technique de traçage à l'azote 15 (^{15}N), différente de la technique de dilution isotopique, qui permet de mesurer avec précision les émissions de GES et de mettre en évidence leur source dans le sol lors d'études sur le terrain à court et à long terme^{26, 27}.

253. De récents travaux ont mis en exergue l'importance des techniques isotopiques qui aident à comprendre la migration et le devenir de l'azote et du carbone dans nos agroécosystèmes, aussi bien en ce qui concerne leur stockage dans le sol que leur libération dans l'atmosphère. Ce n'est que lorsque l'on aura saisi toute la complexité de la nature des sols et les facteurs interdépendants qui influent sur leur fertilité et sur la production de GES que l'on sera en mesure d'élaborer des pratiques agricoles intelligentes face au climat. La figure F-6 donne un exemple des résultats obtenus grâce à une méthode de traçage visant à quantifier le profil des émissions de N_2O provenant d'une prairie permanente. Il existe des méthodes semblables qui permettent de mettre au jour les processus de production et de consommation de CH_4 et de CO_2 au moyen de sources de carbone 13 appropriées.

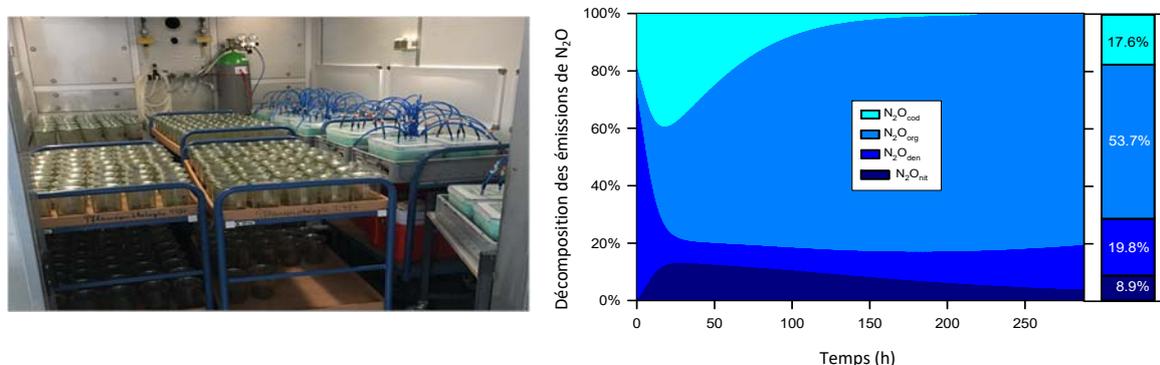


FIG. F-6. Installation d'incubation en laboratoire dans le cadre d'une étude sur le traçage à l'azote 15 (à gauche) et résultats d'une étude de traçage à l'azote 15 visant à déterminer le profil des émissions de N_2O provenant d'une prairie permanente ; N_2O_{nit} = nitrification, N_2O_{den} = dénitrification, N_2O_{org} = nitrification hétérotrophe, N_2O_{cod} = co-dénitrification. 2014)²⁸.

²⁵ Keidel, L., et al., Depth-dependent response of soil aggregates and soil organic carbon content to long-term elevated CO_2 in a temperate grassland soil, *Soil Biology and Biochemistry* 123 (2018) 145–154.

²⁶ Müller, C., et al., Quantification of N_2O emission pathways via a ^{15}N tracing model. *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44–54.

²⁷ 26: Moser, G., et al., Explaining the doubling of N_2O emissions under elevated CO_2 in the Giessen FACE via in-field ^{15}N tracing. *Global Change Biology* 24 (2014) 3897–3910.

²⁸ Müller, C., et al., Quantification of N_2O emission pathways via a ^{15}N tracing model, *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44–54.

F.3.4. Mesure de l'ammoniac (NH_3) : des nouveautés sur le terrain

254. Le manque de techniques de mesure simples et peu coûteuses a fait que les études menées jusqu'ici sur le terrain pour évaluer les rejets de NH_3 dans le monde sont demeurées modestes. Plusieurs techniques de pointe, comme les tunnels de ventilation, la spectroscopie par mesure du temps de déclin dans une cavité et des techniques micrométéorologiques, sont déjà disponibles, mais elles sont coûteuses et nécessitent l'intervention de techniciens hautement qualifiés sur le terrain. Elles sont donc hors de portée de nombreux pays en développement et institutions qui souhaitent évaluer les rejets de NH_3 dans divers systèmes de gestion agricole.

255. Afin de mettre au point une technique de mesure du NH_3 qui soit à la fois abordable et fiable, l'AIEA a collaboré avec l'Entreprise brésilienne de recherche agropastorale (Embrapa) et l'Institut d'agronomie du Paraná (IAPAR) pour concevoir une chambre de mesure toute simple, fabriquée à partir d'une bouteille en plastique (figure F-7).

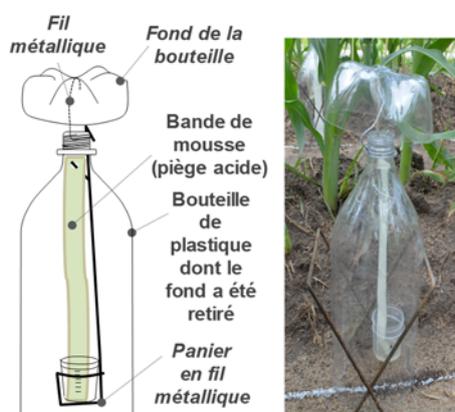


FIG. F-7. Vue de la chambre ouverte servant à mesurer la volatilisation de l'ammoniac.
Une description détaillée de ce dispositif de mesure est fournie
par Araújo et al. (2009)²⁹ et par Jantalia et al. (2012)³⁰.

256. Afin de tester et de valider la précision de cette nouvelle méthode de mesure du NH_3 , on a fait appel à la technique de traçage à l'azote 15. L'urée marquée à l'azote 15 a été appliquée à la surface de lysimètres installés entre des rangs de maïs. Des chambres ouvertes, fabriquées à partir de bouteilles PET (figure F-7) ont été installées sur chaque lysimètre, avec application de quatre taux d'azote différents, des chambres fixées à des hauteurs différentes par rapport à la surface du sol qui, durant la période de surveillance, étaient soit stationnaires soit ambulantes (méthode statique ou dynamique).

257. Cette méthode simple à chambre ouverte est un outil fiable et adapté pour quantifier les rejets de NH_3 par volatilisation dans les terres agricoles, et la fabrication de chaque chambre coûte moins d'un dollar É.-U. On la déploie actuellement dans les pays développés comme dans ceux en développement pour les aider à surveiller l'impact environnemental des émissions de NH_3 provenant de l'agriculture, notamment du secteur de l'élevage, et à s'y adapter. Son efficacité a été comparée avec celle de plusieurs autres méthodes fondées sur la technique au ^{15}N et utilisées sur le terrain, et les

²⁹ Araújo, E.S., et al., Calibration of a semi-opened static chamber for the quantification of volatilized ammonia from soil, *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44(7) (2009) 769–776.

³⁰ Jantalia, C.P., et al., Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers, *Agronomy Journal* 104(6) (2012) 1595–1603.

résultats obtenus ont été très comparables. Avec son côté pratique, sa précision et sa fiabilité qui séduisent rapidement les utilisateurs, elle a déjà été mise en œuvre avec de bons résultats par des scientifiques au Brésil, au Chili, en Chine, au Costa Rica, en Espagne, aux États-Unis d'Amérique, au Pakistan et en République islamique d'Iran. Le dispositif fournit une mesure précise des rejets d'ammoniac, ce qui permet d'effectuer un suivi des pratiques agricoles intelligentes face au climat en vue d'une réduction accrue des gaz à effet de serre et de leur impact sur l'environnement.

F.3.5. Perspectives

258. Compte tenu des progrès accomplis dans le domaine des outils de mesure et de la modélisation, on prévoit d'entreprendre de nouvelles activités de recherche-développement pour mener des expériences sur le terrain ainsi que pour étendre les applications concrètes à l'échelle des agroécosystèmes. Un nouveau PRC sur le sujet sera mis en chantier en 2020, l'objectif étant d'affiner la compréhension des processus complexes intervenant dans la formation des émissions de GES et de concevoir de nouvelles mesures d'atténuation de nature à réduire les GES ainsi que des solutions de piégeage du carbone.



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

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

GC(64)/INF/2