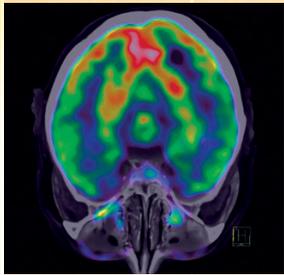


RAPPORT D'ENSEMBLE SUR LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE

2018



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire
pour 2018

GC(62)/INF/2

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Août 2018

IAEA/NTR/2018

Avant-propos

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

Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2018* couvre les domaines suivants : applications électronucléaires, fission avancée et fusion, applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, techniques nucléaires dans la gestion de l'alimentation, des sols et du bétail, et il y est fait référence à l'intervention d'urgence, aux faits marquants nouveaux dans les domaines de la radiothérapie et de la neuropsychiatrie, à la pollution au plastique dans les océans et aux radiopharmaceutiques.

Un projet de rapport a été examiné par le Conseil des gouverneurs à sa réunion de mars 2018 (document GOV/2018/2). La présente version finale a été établie à la lumière des débats du Conseil des gouverneurs et des observations reçues des États Membres.

Table des matières

Synthèse	1
Rapport principal.....	5
A. Applications énergétiques	5
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	5
A.1.1. Pays primo-accédants	7
A.1.2. Pays qui développent leur parc électronucléaire	8
A.1.3. Pays qui exploitent des centrales nucléaires.....	9
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire	10
A.3. Cycle du combustible	11
A.3.1. Partie initiale.....	11
A.3.2. Assurance de l'approvisionnement.....	14
A.3.3. Partie terminale.....	14
A.3.4. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs.....	15
B. Fission avancée et fusion.....	20
B.1. Fission avancée.....	20
B.1.1. Réacteurs refroidis par eau	20
B.1.2. Systèmes à neutrons rapides	21
B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz	22
B.1.4. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires.....	23
B.1.5. Initiatives internationales portant sur des systèmes d'énergie nucléaire innovants.....	25
B.1.6. Applications non électriques de l'énergie nucléaire	26
B.2. Fusion	27
C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche.....	28
C.1. Accélérateurs	28
C.2. Réacteurs de recherche	30
D. Alimentation et agriculture.....	33
D.1. Préparation des interventions d'urgence nucléaire dans l'alimentation et l'agriculture.....	33
D.1.1. Difficultés liées aux interventions d'urgence nucléaire.....	33
D.1.2. Nouvelles avancées dans les systèmes d'aide à la décision pour la conduite d'intervention d'urgence.....	33
D.1.3. DSS4NAFA.....	34
D.2. Recours à l'irradiation pour l'élaboration de nouveaux vaccins efficaces contre les maladies animales et les zoonoses.....	36
D.3. Recours aux empreintes multi-isotopiques pour déterminer les sources de contaminants agricoles passant des sols aux plans d'eau	39

E. Santé humaine.....	41
E.1. La radiothérapie stéréotaxique : une technique radiothérapique de haute précision.....	41
E.1.1. Prescriptions techniques.....	42
E.1.2. Personnel requis	43
E.1.3. Indications.....	43
E.1.4. Contributions de l'Agence	43
E.2. Neuropsychiatrie : la révolution de l'imagerie moléculaire dans la maladie d'Alzheimer.....	44
E.2.1. Contexte	44
E.2.2. Diagnostic	45
E.2.3. Initiatives mondiales et sensibilisation	45
F. Environnement	47
F.1. Techniques nucléaires dans la recherche sur les plastiques marins	47
G. Production de radio-isotopes et technologies des rayonnements	50
G.1. Alphathérapie : nouvelles applications thérapeutiques de radiopharmaceutiques contenant des émetteurs de particules alpha	50
G.1.1. Radium 223	51
G.1.2. Générateur actinium 225/bismuth 213	52
G.1.3. Actinium 225	52
G.1.4. Astate 211	53

Synthèse

1. À la fin de 2017, la capacité de production totale des 448 réacteurs nucléaires de puissance en exploitation dans le monde était de 392 GWe, ce qui représente une augmentation d'environ 1,2 GWe par rapport à 2016. En 2017, cinq réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt, quatre ont été raccordés au réseau, et quatre ont été mis en chantier. Les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie, région qui abrite 40 des 59 réacteurs en construction, ainsi que 51 des 59 réacteurs couplés au réseau depuis 2005.
2. Trente pays utilisent actuellement l'électronucléaire et 28 envisagent ou prévoient son inclusion dans leur bouquet énergétique, ou y travaillent activement. Trois pays primo-accédants construisent leurs premières centrales nucléaires et plusieurs autres, après avoir décidé de se lancer dans l'électronucléaire, en sont à un stade avancé de la préparation de leur infrastructure. D'après les projections hautes établies par l'Agence en 2017, la capacité électronucléaire mondiale devrait augmenter de 42 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux actuels, et doubler d'ici 2050, tandis que les projections basses prévoient un déclin progressif de cette capacité jusqu'à 2040, puis un rebond jusqu'aux niveaux actuels à l'horizon 2050.
3. Les principales raisons qui amènent de nombreux pays à envisager de se lancer dans l'électronucléaire ou de développer leurs programmes actuels sont les avantages qu'offre l'électronucléaire s'agissant de l'atténuation des changements climatiques, de la sécurité énergétique et des politiques environnementales et socio-économiques. Lors de la Conférence ministérielle internationale sur l'électronucléaire au XXI^e siècle organisée par l'Agence à Abou Dhabi, il a été souligné qu'une croissance substantielle de l'électronucléaire serait nécessaire pour que le monde puisse atteindre ses objectifs climatiques et de développement durable.
4. Les niveaux de production mondiale d'uranium de 2017 ont été identiques à ceux de 2016, avec environ 63 000 tonnes produites. La faiblesse des prix a considérablement limité la capacité des entreprises à mobiliser des fonds pour la prospection, les études de faisabilité et la construction de nouveaux projets d'extension. Les ressources mondiales d'uranium et les capacités de conversion, d'enrichissement et de fabrication de combustible sont plus que suffisantes pour satisfaire la demande.
5. L'installation d'entreposage de la banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA au Kazakhstan a été inaugurée en août 2017, et l'appel d'offres concernant l'acquisition d'UFE a été publié en novembre 2017.
6. On a continué d'enregistrer des progrès dans le renforcement et l'amélioration de la sûreté des centrales nucléaires dans le monde entier. Les difficultés les plus couramment rencontrées sont notamment liées à la mise en œuvre des modifications organisationnelles, aux retards dans les activités de mise en service, au renforcement des capacités humaines, à l'optimisation des activités de maintenance, à l'évaluation des modifications majeures de la sûreté des centrales, au renforcement de la gestion des accidents, de la préparation des interventions d'urgence et de leur conduite sur site, et à la direction et la gestion pour la sûreté. L'Agence, avec ses normes de sûreté et ses outils et documents améliorés, a continué d'aider et d'orienter les États Membres dans ces domaines.
7. À ce jour, environ 400 000 tonnes de combustible nucléaire usé sous forme de métaux lourds ont été extraites des centrales nucléaires, dont approximativement 25 % sont en cours de retraitement. Il existe 151 installations d'entreposage à sec de combustible usé hors du site du réacteur réparties dans 27 pays.

8. Dans les années à venir, d'importants travaux de déclassement de réacteurs de puissance, de réacteurs de recherche, d'assemblages critiques et d'autres installations du cycle du combustible sont prévus dans le monde entier.

9. Plusieurs pays ont progressé dans leurs projets portant sur le stockage définitif en formations géologiques profondes des déchets radioactifs de haute activité et/ou de combustible usé déclaré en tant que déchets, ainsi que dans les projets de stockage en puits de sources radioactives scellées retirées du service. Des installations de stockage définitif pour toutes les autres catégories de déchets radioactifs sont en service dans le monde entier.

10. La recherche-développement (R-D) sur des réacteurs à fission avancés et la mise en place de ce type de réacteurs se sont poursuivies dans plusieurs États Membres. Pour leur premier réacteur, la plupart des primo-accédants envisagent de choisir un réacteur avancé refroidi par eau bénéficiant de capacités de production accrues. Plusieurs technologies de réacteurs à neutrons rapides, fondées sur des décennies d'expérience de conception, de construction et d'exploitation, sont en cours de mise en place et d'élaboration. De nombreux États Membres, y compris des primo-accédants, s'emploient à élaborer des réacteurs refroidis par gaz bénéficiant de caractéristiques de sûreté et d'efficacité accrues. Plus de 50 réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires appartenant aux principaux types de réacteurs sont en cours d'élaboration, et la construction de trois de ces réacteurs est rendue à un stade avancé. Ces activités sont appuyées par plusieurs initiatives internationales portant sur les systèmes d'énergie nucléaire innovants.

11. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications non énergétiques telles que le dessalement de l'eau de mer, la production d'hydrogène, le chauffage urbain, la récupération tertiaire du pétrole et d'autres applications industrielles suscite un intérêt croissant. La cogénération peut compenser une part importante des coûts de la production électronucléaire.

12. Des progrès considérables ont été réalisés sur le site du Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) et des programmes de R-D très divers sur la fusion sont en cours dans plusieurs États Membres. Autre événement marquant concernant l'énergie de fusion, le stellarator optimisé Wendelstein 7-X a produit du plasma pour la première fois.

13. On a continué d'employer les accélérateurs dans le cadre d'études environnementales, d'applications biomédicales, de la science des matériaux, de la caractérisation du patrimoine culturel, de l'étude de la provenance et de la datation au carbone. Inaugurée en 2017, l'installation SESAME, première source de rayonnement synchrotron au Moyen-Orient, a émis sa « première lumière » au début de l'année 2017.

14. Les 238 réacteurs de recherche en exploitation dans 56 pays continuent de jouer un rôle stratégique à l'appui des secteurs de la médecine, de l'industrie, de l'éducation et de l'électronucléaire. Sept pays construisent de nouveaux réacteurs de recherche comme installations nationales clés pour le développement de l'infrastructure et des programmes de science et de technologie nucléaires, y compris de puissance nucléaire, tandis que plusieurs autres pays prévoient ou envisagent de faire de même. Deux nouveaux organismes de recherche sont devenus des Centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR) en 2017.

15. À ce jour, 97 réacteurs de recherche et deux installations de production d'isotopes médicaux qui fonctionnaient à l'uranium hautement enrichi (UHE) ont été transformés pour pouvoir fonctionner à l'UFE, ou leur mise à l'arrêt a été confirmée. Des travaux supplémentaires seront nécessaires avant que les combustibles à l'UFE de haute densité puissent être mis sur le marché pour la conversion des réacteurs de recherche à haute performance et à haut flux. Les activités visant à réduire le plus possible l'utilisation de l'UHE, y compris le rapatriement du combustible à l'UHE des réacteurs de recherche dans son pays d'origine, se sont poursuivies en 2017. Le projet consistant à transformer sur trois ans le

seul réacteur de recherche du Ghana pour qu'il utilise du combustible à l'UFE à la place de combustible à l'UHE a été achevé en 2017, à la suite de quoi le combustible à l'UHE a été rapatrié en Chine.

16. Malgré des difficultés dues à des pannes occasionnelles de réacteurs, l'approvisionnement mondial en molybdène 99, isotope médical le plus utilisé, a été maintenu grâce à une excellente coopération et à des mesures préventives prises collectivement par les grands producteurs internationaux, les organismes de coordination des chaînes d'approvisionnement, les parties prenantes gouvernementales et les installations de réacteurs de recherche concernées.

17. Dans le cadre de la préparation aux situations d'urgence nucléaire ou radiologique, la capacité d'identification rapide est considérée comme essentielle pour veiller à ce qu'aucun produit agricole potentiellement contaminé ne parvienne au consommateur. Il arrive que de nombreuses organisations prennent part à une intervention d'urgence, et la gestion et l'interprétation d'importants volumes de données sera cruciale pour que les décisions appropriées puissent être prises. De nouvelles avancées dans le domaine des outils informatiques des systèmes d'aide à la décision améliorent la gestion en temps réel de grands volumes de données et l'appui intégré à la prise de décision en ce qui concerne le temps et l'espace. En revanche, il n'existe que peu d'outils spécialement conçus pour l'appui à la prise de décision dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture. L'Agence a donc élaboré DSS4NAFA, un outil infonuagique complet qui optimise la collecte, la gestion et la visualisation des données relatives à l'agriculture. Après réception de données sur la concentration de radionucléides, l'outil peut suggérer des restrictions sur les aliments et les cultures basées sur le niveau de risque et des niveaux de tolérance spécifiques. La version bêta de l'outil sera disponible en 2018.

18. Depuis les années 1950, des recherches sont menées sur l'irradiation de pathogènes dans le cadre de la création de vaccins mais les structures nucléique et protéique sont souvent détruites du fait d'une surirradiation. Les irradiateurs modernes peuvent générer avec efficacité des doses plus élevées et plus spécifiques, ce qui, en conjonction avec les progrès de la recherche génomique et le développement des connaissances sur les systèmes immunitaires, a ouvert la voie à la mise au point d'une nouvelle gamme de vaccins. Les avancées actuellement enregistrées dans les technologies de vaccins irradiés montrent qu'il est possible de produire de nouveaux vaccins contre de nombreux virus, parasites et bactéries à l'origine de maladies qui peuvent avoir des retombées positives considérables sur la santé animale et humaine et les économies des pays en développement.

19. La pollution des cours d'eau due à l'agriculture a des effets néfastes sur la santé humaine, la biodiversité et la pêche. Les polluants pouvant provenir de plusieurs sources, il convient de faire appel à plusieurs méthodes pour formuler une caractérisation claire de l'origine et du transport des solutés à travers le sol. Les isotopes stables de l'azote, du carbone, de l'oxygène, du soufre et de l'hydrogène peuvent être utilisés en tant que traceurs pour obtenir ces informations sur les agroécosystèmes. L'élément isotopique de chaque élément est unique et peut donc être utilisé pour caractériser les différentes sources, celles-ci étant souvent multiples. Les recherches sur l'utilisation de plusieurs isotopes stables en tant que traceurs, une fois associées à des techniques conventionnelles, permettront de discerner clairement les voies de pollution multiples, et les informations fournies contribueront à accroître la durabilité des pratiques de gestion des terres.

20. La radiothérapie stéréotaxique est une technique d'irradiation non chirurgicale avancée qui est utilisée pour le traitement du cancer. Elle consiste à diriger des rayonnements ciblés précisément sur la tumeur et permet ainsi d'éviter les risques considérables liés à la chirurgie invasive, en particulier quand les zones ciblées sont difficiles d'accès ou proches d'organes vitaux. Le système s'appuie sur l'imagerie tridimensionnelle et la localisation quadridimensionnelle de la tumeur, et utilise des faisceaux de rayons gamma ou de rayons X fortement concentrés. Un accélérateur linéaire permet de traiter des tumeurs très développées en une seule séance. Cette technique peut être utilisée pour traiter

de nombreux troubles fonctionnels du cerveau, le cancer du poumon à un stade précoce, les cancers de la prostate, du pancréas, du foie et du rein, de même que les cancers des voies aérodigestives supérieures et de la moelle épinière chez les patients qu'il n'est pas possible d'opérer médicalement. Des essais cliniques indiquent que la radiothérapie stéréotaxique pourrait à terme offrir un meilleur rapport coût-efficacité que la radiothérapie classique dans de nombreux contextes cliniques.

21. Si la démence peut prendre de nombreuses formes, la maladie d'Alzheimer en est la plus courante. Il est souvent difficile de diagnostiquer les symptômes cliniques distinctifs de cette maladie à un stade précoce mais les techniques nucléaires sont utilisées avec une efficacité croissante pour en détecter les processus sous-jacents, ce parfois des années avant que les symptômes apparaissent clairement, et permettent ainsi d'établir des diagnostics appropriés et différentiels. La médecine nucléaire, qu'on appelle également imagerie moléculaire, permet de diagnostiquer divers troubles cérébraux et de différencier les symptômes dus à la démence neurodégénérative de ceux d'autres états, tels que les attaques cérébrales. Par ailleurs, les radiotraceurs peuvent constituer des biomarqueurs fiables dans ce domaine et aider les cliniciens à diagnostiquer différents troubles liés à la démence. Grâce aux progrès de la neuro-imagerie, on dispose aujourd'hui de connaissances essentielles sur le fonctionnement de la maladie qui contribueront à l'amélioration des innovations thérapeutiques.

22. L'océan est devenu la destination finale d'une grande part de la pollution d'origine terrestre, notamment de celle constituée de matières plastiques. Les effets particuliers des micro-plastiques sur les organismes marins sont aujourd'hui mieux connus grâce aux recherches menées à l'aide de techniques nucléaires et isotopiques. Les micro-plastiques peuvent avoir des effets nocifs par simple ingestion et se déposent également sur certains organes internes, où ils deviennent des vecteurs efficaces de transfert des contaminants, y compris aux humains. Des recherches sont actuellement menées pour déterminer l'évolution des micro-plastiques et des contaminants associés, et leur toxicité pour des espèces marines importantes d'un point de vue socio-économique.

23. On utilise les radiopharmaceutiques thérapeutiques pour détruire les cellules cancéreuses depuis plusieurs dizaines d'années déjà. Néanmoins, à énergie égale, les particules bêta qui ont été utilisées pénètrent bien plus profondément que les particules alpha. C'est cette différence qui permet de viser précisément les cellules cancéreuses au moyen de particules alpha, avec des risques nettement amoindris d'endommager les tissus situés au-delà ou autour de la zone ciblée. Divers radionucléides émetteurs de particules alpha font actuellement l'objet d'évaluations aux niveaux pré-clinique et clinique, l'objectif étant de déterminer leur potentiel en tant que radiopharmaceutiques et de faire progresser le traitement du cancer.

24. En 2017 le projet de Rénovation des laboratoires des applications nucléaires a franchi plusieurs étapes importantes. Le nouveau Laboratoire de la lutte contre les insectes ravageurs a été inauguré et les travaux portant sur un Laboratoire modulaire polyvalent ont commencé à Seibersdorf. D'autres fonds extra-budgétaires ont été mobilisés pendant l'année, ce qui a porté les contributions financières globales consacrées à la modernisation par 31 États Membres et d'autres contributeurs à près de 32,5 millions d'euros. Les activités visant à développer les partenariats et la mobilisation de ressources de l'Agence auprès de nouveaux partenaires ont abouti à la conclusion d'un partenariat avec Varian Medical Systems concernant le prêt d'un accélérateur linéaire (LINAC) sur dix ans au Laboratoire de dosimétrie, ainsi qu'à une contribution en nature sous forme de services d'appui par un État Membre. L'Agence a signé un Mémoire de coopération avec Shimadzu Corporation concernant le don, dans le cadre de l'Initiative sur les utilisations pacifiques, d'un chromatographe en phase liquide qui sera utilisé pour des activités visant à apporter davantage de soutien aux États Membres dans le domaine des recherches sur la sécurité sanitaire des aliments et de la formation.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2018

Rapport principal

Applications énergétiques

L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2017, il y avait 448 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité totale de 392 GWe¹ (voir tableau A-1). Cela représente une augmentation de quelque 1,2 GWe de la capacité totale par rapport à 2016. Parmi les réacteurs en service, 81,9 % sont modérés et refroidis par eau ordinaire, 10,9 % modérés et refroidis par eau lourde, 3,3 % refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite, et 3,1 % refroidis par gaz. Trois d'entre eux sont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide. Près de 89 % de l'électricité d'origine nucléaire a été produite par 370 réacteurs à eau ordinaire.

2. En 2017, quatre nouveaux réacteurs à eau sous pression (REP) ont été couplés au réseau : trois en Chine (Fuqing-4, Tianwan-3, Yangjiang-4) et un au Pakistan (CHASNUPP-4). Cinq réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt : Kori-1 (République de Corée), Oskarhamn-1 (Suède), Santa Maria de Garoña (Espagne), Monju (Japon) et Gundremmingen-B (Allemagne). Monju et Santa Maria de Garoña étaient en arrêt prolongé avant d'être déclarés définitivement mis à l'arrêt.

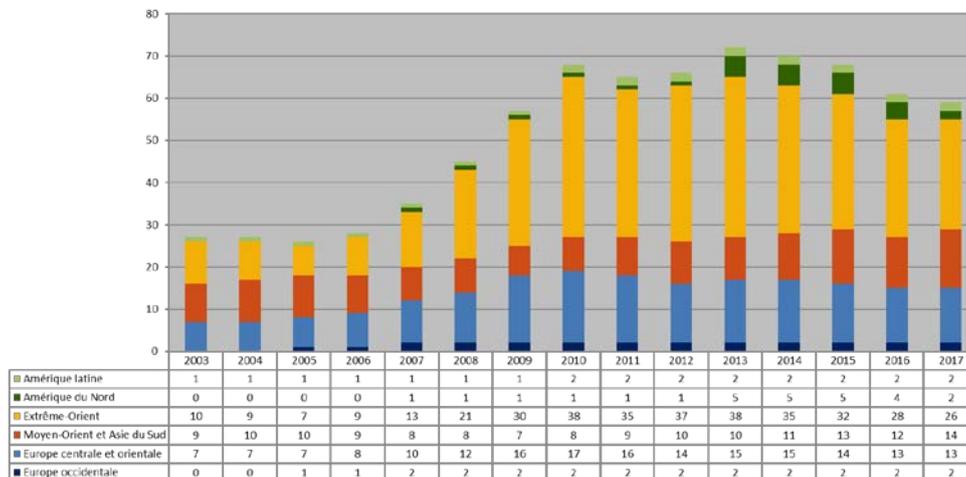


FIG. A-1. Nombre de réacteurs en construction par région.

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

3. Au 31 décembre 2017, 59 réacteurs étaient en construction. La construction de Shin-Kori-5 (République de Corée) et de Kudankulam-3 et 4 (Inde) et de Rooppur-1 (Bangladesh) a démarré. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (figure A-1), où 40 réacteurs sont en construction. C'est également en Asie que se trouvent 51 des 59 nouveaux réacteurs couplés au réseau depuis 2005.

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

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2017)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2017		Expérience d'exploitation totale en 2017	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			15,1	6,7	66	3
ALLEMAGNE	7	9 515			72,2	11,6	832	7
ARGENTINE	3	1 633	1	25	5,7	4,5	82	2
ARMÉNIE	1	375			2,4	32,5	43	8
BANGLADESH			1	1 080				
BÉLARUS			2	2 220				
BELGIQUE	7	5 918			40,2	49,9	289	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 340	14,9	2,7	53	3
BULGARIE	2	1 926			14,9	34,3	163	3
CANADA	19	13 554			95,1	14,6	731	6
CHINE	39	34 514	18	19 016	232,8	3,9	280	9
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	24	22 494	4	5 360	141,3	27,1	523	5
ÉMIRATS ARABES UNIS			4	5 380				
ESPAGNE	7	7 121			55,6	21,2	329	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	99	99 952	2	2 234	805,6	20,0	4 309	9
FÉDÉRATION DE RUSSIE	35	26 142	7	5 520	190,1	17,8	1 261	9
FINLANDE	4	2 769	1	1 600	21,6	33,2	155	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	381,8	71,6	2 164	4
HONGRIE	4	1 889			15,2	50,0	130	2
INDE	22	6 255	7	4 824	34,9 ^b	3,2	482	11
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			6,4	2,2	6	4
JAPON	42	39 752	2	2 653	29,3	3,6	1 823	5
MEXIQUE	2	1 552			10,6	6,0	51	11
PAKISTAN	5	1 318	2	2 028	8,1	6,2	72	5
PAYS-BAS	1	482			3,3	2,9	73	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 930			26,8	33,1	158	10
ROUMANIE	2	1 300			10,6	17,7	31	11
ROYAUME-UNI	15	8 918			63,9	19,3	1 589	7
SLOVAQUIE	4	1 814	2	880	14,0	54,0	164	7
SLOVÉNIE	1	688			6,0	39,1	36	3
SUÈDE	8	8 629			63,1	39,6	451	0
SUISSE	5	3 333			19,6	33,4	214	11
UKRAINE	15	13 107	2	2 070	80,4	55,1	488	6
Total^{c, d}		448 391 721	59	60 460	2 503,1		17 430	6

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

^b Les données concernant l'électricité pour l'Inde sont basées sur les valeurs annuelles fournies au niveau du pays, car les données relatives à certains réacteurs n'étaient pas disponibles au moment de la publication du présent rapport.

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

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

35,1 TW h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 16,3 % de la production électrique totale.

^d L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (80 ans et 8 mois), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) et à Taïwan (Chine) (206 ans et un mois).

A.1.1. Pays primo-accédants

4. Parmi les 28 États Membres qui ont exprimé leur intérêt pour l'électronucléaire, 19 ont lancé des études sur l'infrastructure électronucléaire, quatre ont déjà pris une décision et préparent l'infrastructure nécessaire et cinq ont signé des contrats et se préparent à la construction ou l'ont déjà commencée. Vingt et un autres États Membres devraient poursuivre leurs travaux en vue d'arriver à une décision quant à la mise en place d'un programme électronucléaire au cours de la prochaine décennie.

5. Aux Émirats arabes unis, la construction des quatre réacteurs de la première centrale nucléaire du pays, située à Barakah, s'est poursuivie. L'exploitation de la tranche 1 devrait démarrer en 2018, et les trois autres tranches suivront au cours des prochaines années. L'Agence a effectué des missions d'évaluation de la formation théorique et pratique et de l'Équipe d'examen préliminaire de la sûreté d'exploitation en 2017. Au Bélarus, la construction de la première centrale nucléaire, à Ostrovets, était en cours et la mise en service des deux tranches est prévue pour 2019 et 2020. Le rapport final d'analyse de la sûreté a été présenté aux fins d'examen réglementaire en 2017. Une mission d'examen du site et de la conception basée sur les événements externes a été accueillie en 2017.

6. Au Bangladesh, les travaux de construction liés à la sûreté sur la tranche 1 de la centrale nucléaire de Rooppur ont commencé le 30 novembre. Les deux tranches de cette centrale devraient être mises en service en 2023 et 2024. En Turquie, les travaux de construction non nucléaire à la centrale d'Akkuyu ont commencé en octobre, sur la base d'un permis de construire limité, et la mise en service de la tranche 1 est prévue pour 2023. L'Égypte a achevé les négociations avec la Société nationale d'énergie atomique « Rosatom » de la Fédération de Russie concernant quatre accords clés pour la construction de la centrale nucléaire de quatre tranches d'El Dabaa, qui devrait être achevée entre 2023 et 2026.

7. Les négociations entre la Jordanie et Rosatom ont progressé. Avec l'achèvement des études clés du réseau et de l'eau de refroidissement, une décision définitive relative à l'investissement est attendue en 2018. Le Nigeria a signé en octobre 2017 des accords avec la Fédération de Russie concernant la construction et l'exploitation d'une centrale nucléaire et d'un centre de recherche nucléaire, ainsi qu'une feuille de route pour la coopération sur les technologies nucléaires sûres. La Pologne et l'Arabie saoudite ont travaillé sur des appels d'offres internationaux et prévoient de les publier en 2018. Le Kenya doit prendre une décision quant à un programme électronucléaire.

8. Les États Membres continuent de bénéficier de l'aide de l'Agence pour le développement de l'infrastructure nucléaire nationale nécessaire, sur la base de l'approche par étapes, qui contribue à la mise en place de programmes électronucléaires sûrs, sécurisés et durables. Cette approche comprend des examens par des pairs, des missions d'experts, des cours et des outils qui couvrent systématiquement les 19 questions relatives à l'infrastructure nucléaire. Avec la mission d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) effectuée au Ghana en 2017, ce sont au total 22 missions INIR qui ont été menées dans 16 États Membres depuis le lancement de l'approche en 2009.

A.1.2. Pays qui développent leur parc électronucléaire

9. Avec 38 réacteurs nucléaires de puissance en service et 19 en construction, la Chine a toujours le plus grand programme d'expansion, et prévoit de construire 30 réacteurs à l'étranger d'ici 2030.

10. Le projet EPR Okiluoto-3, en Finlande, est entré dans la phase de mise en service et les essais fonctionnels à froid sont achevés. Après les essais fonctionnels à chaud, l'exploitation commerciale devrait commencer début 2019. L'examen en vue de l'autorisation est toujours en cours pour le projet Hanhikivi-1 et la construction devrait démarrer en 2019.

11. En mars 2017, la Commission européenne a approuvé la construction de nouvelles tranches à la centrale nucléaire Paks II et, en avril 2017, l'Agence hongroise de l'énergie atomique a délivré une autorisation environnementale définitive et une licence pour le site de la centrale nucléaire.

12. En septembre 2017, le premier (sur trois) générateur de vapeur a été installé sur la tranche 2 de Karachi (Pakistan), qui est le premier de deux réacteurs chinois Hualong 1 en construction sur ce site (figure A-2).



*FIG. A-2. Travaux de construction sur la tranche 2 de Karachi (Pakistan), septembre 2017.
(Photo : Société chinoise de génie nucléaire – CNEC)*

13. Les travaux de construction non liés à la sûreté ont commencé à Bushehr-2, en République islamique d'Iran, en mars. Le VVER-1000 devrait être achevé en 2024, et Bushehr-3 devrait suivre en 2026.

14. Aux États-Unis, les travaux de construction des tranches 3 et 4 de Vogtle (AP1000) se sont poursuivis, Southern Nuclear a succédé à Westinghouse pour la gestion du projet et l'exploitation devrait commencer en 2021 et 2022 respectivement. La construction de Summer-2 et 3, également des réacteurs AP1000, a été suspendue en juillet 2017 pour des raisons économiques.

15. En mai, la compagnie nucléaire publique argentine, Nucleoeléctrica, a signé des accords avec la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) pour deux nouveaux réacteurs. Ainsi, la construction d'un nouveau réacteur CANDU de 720 MWe devrait commencer en 2018, et ce réacteur sera suivi par un réacteur Hualong 1 de 1000 MWe en 2020.

16. En août, l'Inde a signé des contrats avec Rosatom concernant les tranches 5 et 6 de la centrale nucléaire de Kudankulam, tous deux des réacteurs de type VVER-1000, qui seront construits en collaboration avec la Nuclear Power Corporation of India.

17. En octobre, le Ministère de l'environnement de l'Afrique du Sud a délivré une autorisation environnementale pour la construction et l'exploitation d'une centrale nucléaire de 4 000 MWe, et de l'infrastructure connexe, à Duynefontein, près de la centrale nucléaire déjà en exploitation de Koeberg.

A.1.3. Pays qui exploitent des centrales nucléaires

18. À la fin de 2017, 47 % des 448 réacteurs nucléaires en service l'étaient depuis 30 à 40 ans, et 17 % depuis plus de 40 ans. Une exploitation à long terme et des programmes de gestion du vieillissement sont mis en œuvre pour un nombre croissant de centrales nucléaires.

19. Afin de mettre en œuvre sa stratégie industrielle qui consiste à exploiter de façon sûre les centrales nucléaires existantes pendant bien plus de 40 ans, Électricité de France (EDF) a lancé son programme « Grand carénage », qui comprend un vaste programme de rénovation visant à améliorer la performance et la sûreté, et qui devrait durer dix ans. Quant au remplacement d'une partie du parc de centrales nucléaires français, l'EPR de Flamanville-3 est dans la phase de mise en service et les essais fonctionnels à froid sont achevés. Après les essais fonctionnels à chaud, l'exploitation commerciale devrait commencer fin 2018.

20. Le renouvellement des licences pour les centrales en exploitation aux États-Unis est un processus mature et stable et les licences de 86 réacteurs sur 99 ont été renouvelées pour une durée d'exploitation allant jusqu'à 60 ans. Dans le cadre du même processus réglementaire que pour le renouvellement de licence initial, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis a publié en juillet 2017 des documents d'orientation pour le renouvellement ultérieur de la licence, pour une durée d'exploitation pouvant aller jusqu'à 80 ans.

21. En Bulgarie, les licences d'exploitation des réacteurs Kozloduy 5 et 6 couraient jusqu'en 2017 et 2019. En novembre 2017, en prolongeant celle du réacteur 5 jusqu'en 2027, l'Agence de réglementation nucléaire bulgare a autorisé, pour la première fois, la poursuite de l'exploitation d'un réacteur nucléaire au-delà de la durée prévue par la licence d'origine.

22. Au Japon, cinq des 42 réacteurs en état de fonctionner ont pour l'instant passé avec succès des inspections qui ont confirmé qu'ils satisfaisaient aux nouvelles normes réglementaires de sûreté et ont redémarré. Il s'agit des réacteurs Sendai 1 et 2 de Kyushu, Ikata 3 de Shikoku et Takahama 3 et 4 de Kansai. Des demandes de redémarrage ont été introduites pour 20 autres réacteurs.

23. La sûreté d'exploitation des centrales nucléaires reste élevée, comme le montrent les indicateurs de sûreté recueillis par l'Agence et l'Association mondiale des exploitants nucléaires. La figure A-3 indique le nombre d'arrêts d'urgence ou de mises à l'arrêt non programmés manuels ou automatiques, par tranche, pour 7 000 heures d'exploitation (environ un an). Bien qu'il ne soit qu'un indicateur parmi d'autres de la performance en matière de sûreté, le nombre d'arrêts d'urgence est couramment utilisé.

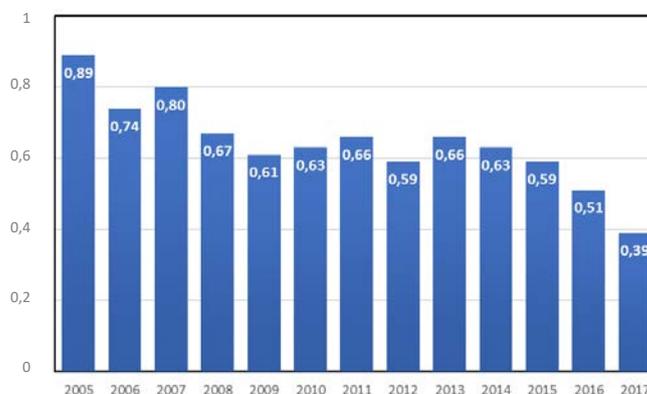


FIG. A-3. Taux moyen d'arrêts non programmés (automatiques ou manuels) – nombre d'arrêts non programmés pour 7 000 heures de fonctionnement d'une tranche. (source : Système d'information de l'AIEA sur les réacteurs de puissance, www.iaea.org/pris)

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

24. D'après les projections de 2017 de l'Agence (figure A-4), la capacité mondiale de production électronucléaire devrait augmenter pour atteindre 554 GWe d'ici 2030 et 874 GWe d'ici 2050 dans l'hypothèse haute, soit une hausse de 42 % par rapport aux niveaux actuels d'ici 2030 et un doublement d'ici 2050. Dans l'hypothèse basse, elle devrait diminuer progressivement jusqu'en 2040, avant de repartir à la hausse pour atteindre le niveau actuel d'ici 2050.

25. L'écart important entre ces projections s'explique en partie par le grand nombre de réacteurs dont l'arrêt définitif est prévu vers 2030 et au-delà, en particulier en Amérique du Nord et en Europe, et par l'incertitude entourant la question de savoir si de nouvelles capacités nucléaires seront mises en place pour les remplacer.

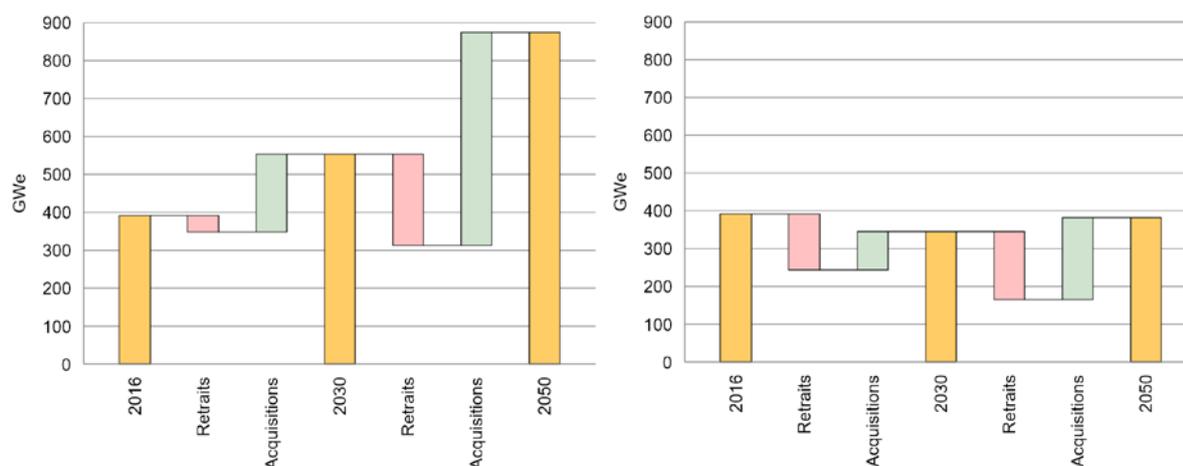


FIG. A-4. Projections haute (à gauche) et basse de la capacité nucléaire installée dans le monde.
(Source : Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, n° 1 de la collection Données de référence de l'AIEA, 2017)

26. Les scénarios de projection haute de l'AIEA, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et de l'Association nucléaire mondiale (WNA) indiquent tous que la croissance s'établira autour de 500 à 600 GWe d'ici à 2030, tandis que les scénarios de projection basse font ressortir de plus grandes incertitudes en ce qui concerne la croissance (figure A-5).

27. L'électronucléaire contribue fortement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, tout en permettant de répondre aux besoins croissants d'énergie d'une population sans cesse plus nombreuse, et en contribuant au développement durable. Les réacteurs nucléaires n'émettent pratiquement pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques durant leur période d'exploitation et n'en émettent que de très faibles quantités sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ainsi, l'utilisation de l'électronucléaire permet d'éviter l'émission de près de deux milliards de tonnes de dioxyde de carbone par an.

28. L'Accord de Paris, ratifié par 171 pays, appelle les pays à limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à bien moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Les constatations de l'AIEA, de l'AIE et de la WNA soulignent la nécessité de recourir davantage à l'électronucléaire sur le plus long terme pour atteindre cet objectif de 2 °C. Ses avantages en termes d'atténuation des changements climatiques et de sécurité énergétique et en ce qui concerne les aspects socioéconomiques et environnementaux non liés au climat, sont les raisons importantes pour

lesquelles de nombreux pays, en particulier du monde en développement, envisagent d'y recourir pour la première fois au cours des décennies à venir ou d'étendre les programmes existants.

29. La Conférence ministérielle internationale sur l'électronucléaire au XXI^e siècle, organisée par l'Agence, a eu lieu à Abou Dhabi, du 31 octobre au 2 novembre 2017. Les déclarations des représentants nationaux et les tables rondes ont porté essentiellement sur l'électronucléaire en tant que solution pour résoudre le « trilemme des 3E » (énergie, économie et environnement), sur les difficultés liées à la mise en place d'une infrastructure électronucléaire, sur les aspects ayant trait à la sûreté et à la fiabilité de l'énergie nucléaire et sur les innovations et les progrès réalisés en matière de technologie nucléaire. Les participants à la Conférence ont également souligné qu'une croissance substantielle de l'électronucléaire était nécessaire pour que le monde puisse réaliser les objectifs de développement durable et les objectifs climatiques fixés.

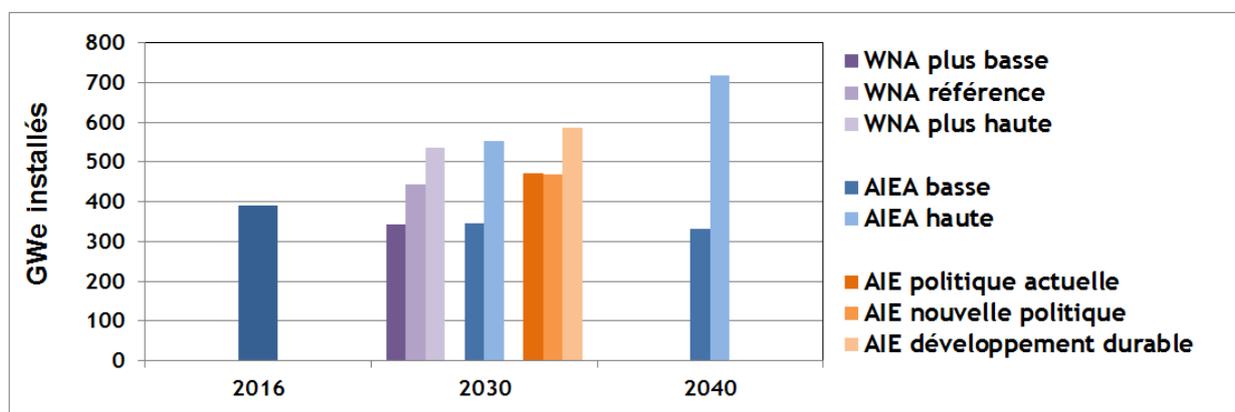


FIG. A-5. Comparaison des projections 2017 de l'AIEA en matière de capacité électronucléaire aux scénarios de l'AIE et aux projections de la WNA (les chiffres de l'AIE sont fondés sur la capacité brute).

A.3. Cycle du combustible

A.3.1. Partie initiale

Ressources et production d'uranium

30. Les prix au comptant de l'uranium sont restés bas en 2017, se situant généralement entre 42 \$/kg U et 54 \$/kg U. Cette faiblesse des prix a considérablement limité la capacité des entreprises à mobiliser des fonds pour la prospection, les études de faisabilité et l'élaboration de nouveaux projets d'extension. Ainsi, la production en 2017 sera probablement similaire à celle de 2016, qui était de 63 366 t U, contre 60 496 t U en 2015.

31. Le Kazakhstan est resté le premier pays producteur mondial, presque exclusivement en raison de ses mines de lixiviation in situ. Après une rapide augmentation de la production entre 2000 et 2012, et une production de 23 800 t U en 2015 et de 30 062 t U en 2016, on attend un chiffre similaire pour 2017.

32. Au Canada, deuxième producteur mondial, la capacité de production annuelle de la mine de Cigar Lake (dont la teneur en uranium est la plus élevée au monde et dont la production commerciale a commencé en mai 2015) devrait passer de 5 000 à 6 900 t U d'ici début 2018.

33. La production commerciale d'uranium a commencé à la mine d'uranium de Husab (Namibie) en 2016, avec un chiffre de 192 t U. Ce chiffre devrait augmenter et, à pleine capacité, cette mine pourrait produire 5 770 t U par an, avec une durée de vie prévue supérieure à 20 ans. L'exploitation

des mines d'uranium namibiennes de Rössing et de Langer Heinrich s'est poursuivie en 2017. Des études de faisabilité d'une portée limitée se sont poursuivies sur certains autres gisements d'uranium dans le pays.

34. En Australie, la mine d'uranium à lixiviation in situ de Four Mile a produit environ 1 400 t U par an. Dans le cadre du projet Ranger, la production était de 1 994 t U en 2016, et les prévisions sont de 1 700 à 2 000 t U en 2017, alors que les chiffres allaient de 4 000 à 6 000 t U par an entre 1997 et 2009. Conformément aux accords en vigueur, l'extraction et le traitement doivent prendre fin d'ici janvier 2020 et la réhabilitation doit être achevée dans les cinq ans. L'exploitation classique de la mine de cuivre, d'uranium, d'or et d'argent Olympic Dam s'est poursuivie, de même que les tests de lixiviation en tas d'une partie des minerais de cette mine. Des progrès ont été réalisés dans les études et les approbations relatives à plusieurs gisements d'uranium en Australie occidentale, mais aucune date n'a été fixée pour la construction et l'ouverture.

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

36. La Chine a continué de montrer l'importance primordiale qu'elle attache à l'expansion du secteur nucléaire en allouant des fonds la prospection et à la mise en valeur de l'uranium, tant à l'intérieur de ses frontières qu'à l'étranger. Les dépenses de mise en valeur à l'étranger sont restées importantes, principalement en raison de la mise en valeur de la mine de Husab (Namibie).

37. Le projet d'uranium de Salamanca (Espagne) fait l'objet d'une procédure d'autorisation, et plusieurs procédures juridiques ont été menées à leur terme, conformément à la réglementation nationale. La construction et la mise en service de l'installation seront sujettes à l'autorisation du gouvernement, sur la base d'un rapport de l'organisme espagnol de réglementation de la sûreté nucléaire.

38. Début 2017, Indústrias Nucleares do Brasil (INB) a commencé à travailler à sa mine d'Engenho, dans l'état brésilien de Bahia, et indiqué qu'elle prévoyait une production de 73 t U de concentré au cours de l'année, avec une production annuelle potentielle de 280 à 300 t U de concentré. Des études de faisabilité et des travaux réglementaires sont en cours pour une extension souterraine, ou une deuxième mine à ciel ouvert, de la mine de Caetité.

39. De nombreux projets concernant l'uranium sont restés en attente ou insuffisamment financés. Certains projets qui avaient été lancés ou pour lesquels la construction était à un stade avancé sont restés au stade de l'entretien et de la maintenance. La suspension de la production des sites de McArthur River et de Key Lake, au Canada, pendant une période prévue de 10 mois, a été une annonce importante en novembre 2017.

Conversion et enrichissement

40. La capacité de conversion et d'enrichissement actuelle est plus que suffisante pour répondre à la demande, mais le caractère segmenté du marché, avec une production centrée sur quelques usines, est un problème.

41. Centrus Energy et le Laboratoire national d'Oak Ridge du Ministère de l'énergie des États-Unis ont signé en octobre 2017 un contrat pour poursuivre leur collaboration en vue de réduire le coût et d'accroître le rendement de la technologie AC100 d'enrichissement par centrifugation gazeuse.

42. Étant donné qu'elles ont passé les tests nécessaires et offrent la promesse d'économies d'énergie substantielles, les centrifugeuses à gaz modernes « génération 9+ » seront installées par Urals Electrochemical Combine à Novouralsk, dans la région de Sverdlovsk (Fédération de Russie), à partir de 2018.

Fabrication de combustible

43. En vertu d'un contrat entré en vigueur en janvier 2017, la filiale TVEL de Rosatom produira et fournira des assemblages combustibles en 2017 et en 2018 pour le réacteur rapide expérimental chinois, construit par ses partenaires russes. En septembre 2017, TVEL a signé un contrat avec HAEK CJSC pour la fourniture de combustible nucléaire au réacteur arménien n° 2 de 440 MW pour le prochain rechargement, ainsi que du combustible de réserve pour deux ans.

44. En janvier 2017, la filiale Baotou Nuclear Fuel Company de la CNNC a reçu son agrément pour produire les barres de combustible nucléaire AP1000 de Westinghouse Electric. Cela permet à la CNNC d'achever sa ligne de production de barres de combustible et de fabriquer les assemblages combustibles AP1000.

45. Marquant le passage d'une production d'essai à une exploitation industrielle, China North Nuclear Fuel a lancé en juillet 2017, à Baotou, la production en masse d'éléments combustibles pour réacteurs à haute température refroidis par gaz (RHTRG). Quelque 200 000 éléments combustibles sphériques ont déjà été produits dans l'usine, qui a une capacité de 300 000 éléments combustibles sphériques par an pour le RHTRG de démonstration en construction à Shidaowan, dans la province de Shandong.

46. En avril 2017, l'autorité de réglementation nucléaire japonaise a donné son aval pour que soit amendé le permis de fabrication de combustible de l'usine de fabrication de combustible de Global Nuclear Fuel – Japan (GNF-J) à Yokosuka, dans la préfecture de Kanagawa. Il s'agissait d'une des étapes clés de la mise en conformité avec les nouvelles prescriptions réglementaires introduites après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. GNF-J fait partie de la coentreprise Global Nuclear Fuel, dirigée par General Electric et incluant Hitachi et Toshiba, aux fins de la conception et de la fabrication du combustible pour réacteurs à eau bouillante.

47. Un chargement de 16 assemblages de combustible à mélange d'oxydes (MOX) est arrivé en septembre 2017 à la centrale nucléaire de Takahama (Japon), en provenance de la France ; ces assemblages seront utilisés dans la tranche 4 en 2018. AREVA² a obtenu de Nuclear Fuel Industries un contrat pour la fabrication de 32 assemblages de combustible MOX, qui serviront dans les tranches 3 et 4 de la centrale de Takahama, appartenant à Kansai Electric Company.

48. La société canadienne Cameco a signé en mai 2017 un accord de prolongation de dix ans pour continuer à fournir du combustible nucléaire à la centrale de Bruce.

49. En juin 2017, Westinghouse Electric Company a lancé un combustible résistant aux accidents, EnCore™, dont elle espère fabriquer des barres d'essai dès 2018. Selon l'entreprise, le combustible EnCore aura des caractéristiques de sûreté capables d'altérer la base de conception et d'améliorer le rendement de l'uranium, permettant ainsi aux compagnies d'électricité de faire des économies.

50. En août 2017, Westinghouse Electric a prolongé son contrat avec la compagnie d'électricité américaine PSE&G, au New Jersey, concernant la fourniture de combustible pour les deux tranches de la centrale nucléaire de Salem.

51. AREVA et Lightbridge Corporation, une entreprise de conception de combustibles nucléaires établie aux États-Unis, sont convenues en septembre 2017 d'une coentreprise 50-50 qui sera lancée début 2018, pour la fabrication et la commercialisation d'une nouvelle ligne de combustible métallique avancé pour centrales nucléaires. Le combustible, qui a été mis au point par Lightbridge, peut être

² À l'issue de la restructuration du secteur nucléaire français, AREVA a été scindée en deux entités en janvier 2018 : Orano (combustible nucléaire) et Framatome (réacteurs nucléaires).

utilisé dans les installations existantes et les nouvelles installations en construction pour améliorer le rendement d'exploitation et la sûreté. En octobre 2017, Lightbridge a signé des commandes avec l'Institut des technologies de l'énergie (IFE), exploitant du réacteur de recherche de Halden, en Norvège, pour la conception et la fabrication d'un deuxième montage d'irradiation pour tester ses combustibles, ce qui marque une nouvelle étape importante vers la commercialisation de cette technologie.

52. En février 2017, AREVA est passée à la deuxième phase du projet de combustible résistant aux accidents du Ministère de l'énergie des États-Unis, qui vise à améliorer le rendement et la fiabilité au moyen de pastilles dopées au chrome et d'un matériau de gainage enduit de chrome.

53. La Fédération de Russie a poursuivi ses essais sur deux nouveaux types de combustible : le mélange régénéré (REMIX), utilisé dans les réacteurs à eau ordinaire, et un combustible au nitrure mixte d'uranium-plutonium, destiné aux réacteurs à neutrons rapides.

A.3.2. Assurance de l'approvisionnement

54. 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). L'Agence et le Kazakhstan ont établi en 2015 le cadre juridique de base en vue de l'installation de cette banque d'UFE dans l'usine métallurgique d'Ulba à Ust-Kamenogorsk. Des accords de transit ont été signés avec la Fédération de Russie et la Chine, et les négociations des contrats de transport avec les organisations autorisées de ces deux pays et le Kazakhstan progressent.

55. Le plan relatif aux activités spéciales est presque achevé, après la prise en compte de différentes questions, notamment celles liées à la sûreté et à la sécurité du site. La construction de l'installation d'entreposage d'UFE de l'AIEA au Kazakhstan a été achevée à l'été 2017. En août 2017, une mission effectuée par l'Agence a confirmé que cette installation avait été construite, mise en service et préparée à l'exploitation conformément à ses normes de sûreté et à ses orientations sur la sécurité, et que des mesures adéquates avaient été prises pour garantir la protection des travailleurs, de la population et de l'environnement pendant toute la durée de l'exploitation. L'installation a été inaugurée le 29 août 2017.

56. Des progrès ont aussi été accomplis dans la mise au point définitive du programme de gestion des cylindres qui garantira la sûreté et la sécurité à long terme des cylindres in situ, puis pendant le transport. Un essai pilote a été réalisé en avril 2017 pour simuler les essais aux fins d'une nouvelle certification des cylindres conformément à la norme ISO pertinente à venir, et ses résultats serviront de base pour le programme définitif de gestion des cylindres. L'appel d'offres concernant l'acquisition d'UFE a été publié en novembre 2017.

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

A.3.3. Partie terminale

Gestion du combustible usé

58. À ce jour, environ 400 000 tonnes de métaux lourds (t ML) ont été extraites des centrales nucléaires. Environ 25 % de ces combustibles sont en cours de retraitement, une proportion qui devrait atteindre 30 % d'ici 2020. On compte 151 installations d'entreposage à sec de combustible usé hors des sites de réacteur dans 27 pays.

59. En 2017, deux pays ont signé des contrats pour de nouvelles installations d'entreposage à sec de combustible usé hors du site du réacteur : la Slovénie, pour la centrale de Krško, et le Brésil, pour l'entreposage du combustible usé des tranches 1 et 2 de la centrale d'Angra. Krško est en cours de

conception de façon à satisfaire aux prescriptions plus strictes relatives à l'activité sismique et aux inondations importantes conformément aux orientations sur la sûreté établies après Fukushima.

60. L'installation d'entreposage à sec de la centrale nucléaire de Sizewell B, au Royaume-Uni, conçue pour un entreposage de 100 ans, a reçu ses premiers châteaux de combustible chargés en 2017.

61. En Hongrie, l'installation de stockage modulaire à sec sous voûte d'isolement de la centrale de Paks, dont la capacité était précédemment de 9 308 assemblages combustibles dans 20 casemates, a été agrandie en 2017 avec l'ajout de quatre autres casemates.

62. L'installation d'entreposage provisoire 2 de la centrale nucléaire de Tchernobyl (Ukraine), qui comprend une installation de découpe/d'emballage du combustible et des modules d'entreposage du combustible usé, est actuellement soumise à des essais de mise en service portant sur les opérations de découpe du combustible des réacteurs RMBK. L'autorisation réglementaire de construction d'une nouvelle installation d'entreposage centralisée pour les combustibles de réacteurs de puissance dans la zone d'exclusion de Tchernobyl a été accordée en 2017, et les opérations devraient démarrer en 2019.

63. Un certain nombre d'innovations ont été annoncées dans le secteur en 2017. Celles-ci comprennent le martelage laser des conteneurs d'entreposage à sec soudés pour réduire le risque de fissuration par corrosion sous contrainte, et la mise au point de modules d'entreposage à sec compacts qui facilitent l'inspection des conteneurs entreposés.

64. S'agissant du retraitement et du recyclage du combustible usé, la France a élargi la palette des combustibles usés de réacteur à eau ordinaire qui seront traités à La Hague. La Fédération de Russie a elle aussi continué d'élargir l'éventail des combustibles qui peuvent être retraités à l'usine RT-1 de Mayak Chemical Combine, à Ozersk. À cet égard, cette usine a été modernisée en 2017 pour pouvoir retraiter 20 t de combustible VVER-1000.

65. L'Autorité du déclassé nucléaire du Royaume-Uni a annoncé en mars 2017 que l'usine de retraitement de combustible THORP cesserait ses activités autour de novembre 2018. Depuis 1994, cette usine a retraité environ 9 500 t de combustible à oxyde.

66. En août 2017, le Centre de recherche atomique Indira Gandhi, en Inde, a confié à Hindustan Construction Co la construction de l'installation du cycle du combustible du réacteur à neutrons rapides, à Kalpakkam, au cours des 4 prochaines années. Une installation de recherche radiochimique multifonctions est en construction à l'Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires (NIAR) en Fédération de Russie. Rosatom a annoncé en mai que cette installation serait placée sous l'autorité du centre international de recherche pour tester les technologies en vue de fermer le cycle du combustible du réacteur à neutrons rapides.

67. En août 2017, le premier chargement de combustible usé en provenance de l'installation d'entreposage de la flotte du nord de la Fédération de Russie, dans la baie d'Andreeva, est arrivé par train aux fins de traitement à l'usine de Mayak (à 3 000 kilomètres). Selon les estimations, 50 chargements par train sont prévus, pour amener les 22 000 éléments combustibles usés de sous-marin nucléaire à Mayak, où le traitement devrait prendre 5 à 10 ans.

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

Déclassé des installations nucléaires

68. Il y a actuellement 164 réacteurs nucléaires de puissance mis à l'arrêt ou en cours de déclassé dans le monde. Dix-sept d'entre eux ont été entièrement déclassés et plusieurs autres approchent des étapes finales du déclassé. Plus de 150 installations du cycle du combustible ont été définitivement mises à l'arrêt ou sont en cours de déclassé, et environ 125 ont été déclassées.

Plus de 180 réacteurs de recherche sont à l'arrêt ou en cours de déclassé, et plus de 300 réacteurs de recherche et assemblages critiques ont été entièrement déclassés.

69. Les activités de recherche-développement (R-D), essentiellement dans les pays dotés d'importants programmes électronucléaires, tels que la Belgique, l'Espagne, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, le Japon, la République de Corée et le Royaume-Uni, permettent des améliorations continues. En avril 2017, l'Agence japonaise de l'énergie atomique a ouvert le nouveau centre de recherche appelé Laboratoires de collaboration pour une science avancée du déclassé (CLADS) à Tomioka, dans la préfecture de Fukushima. Le bâtiment des travaux de recherche internationale en collaboration de Tomioka sera le cœur du CLADS où les institutions nationales et internationales mèneront leurs activités de recherche-développement. En 2017, l'entreprise française AREVA a achevé le démantèlement d'un évaporateur de produits de fission d'une usine de retraitement au moyen de la technologie laser.

70. La feuille de route à moyen et à long terme et le plan stratégique technique du Japon pour le déclassé de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ont été révisés en 2017. La contamination de l'eau due à l'écoulement d'eaux souterraines dans les bâtiments des réacteurs et leur mélange avec l'eau stagnante utilisée pour refroidir les débris de combustible reste un sérieux problème qu'on essaie de résoudre avec un système d'élimination des nucléides. Depuis 2016, des canalisations de congélation ont été installées pour que les murs étanches côté montagne bloquent les eaux souterraines, et la congélation de la dernière partie du mur a commencé en août 2017.

71. Il y a eu des progrès importants en Bulgarie, en Lituanie, en Slovaquie (figure A-6) et en Ukraine en ce qui concerne les projets de déclassé de centrales nucléaires financés par la Banque européenne pour la reconstruction et le développement.



FIG. A-6. Démolition des tours de refroidissement de la centrale nucléaire de Bohunice VI, en Slovaquie, en octobre 2017 (Photo : JAVYS).

Remédiation

72. Le Japon a régulièrement fait état de progrès dans la décontamination hors site. Fin mars 2017, les travaux de décontamination étaient achevés pour des secteurs entiers de la zone de décontamination spéciale, dans un rayon de 20 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, ainsi que dans les endroits où l'on s'attendait à ce que la dose effective annuelle supplémentaire dépasse 20 mSv pendant la première année suivant l'accident. S'agissant de la zone d'étude intensive de la contamination, où le débit de dose mesuré dans l'air était supérieur à 0,23 uSv/h (équivalant à une dose supplémentaire supérieure à 1 mSv par an dans certaines conditions), les travaux de décontamination étaient achevés dans 89 municipalités et seront terminés dans les trois municipalités restantes d'ici à fin mars 2018.

Gestion des sources radioactives scellées retirées du service

73. Un appui a encore été fourni pour les options de gestion de la fin de vie des sources radioactives scellées retirées du service dans plusieurs États Membres. Le Ghana et la Malaisie ont avancé dans

leurs projets de stockage en puits, et plusieurs autres pays ont exprimé leur intérêt pour une éventuelle mise en œuvre de cette approche. L'établissement et la tenue d'un inventaire reste une priorité dans plusieurs États Membres.

74. Des projets d'enlèvement de sources de haute activité ont été lancés en 2017, avec l'aide de donateurs, pour les pays suivants : Albanie, Bolivie, Équateur, Liban, ex-République yougoslave de Macédoine, Paraguay, Pérou, Tunisie et Uruguay. Ils devraient être achevés en 2018. Une source radioactive scellée de haute activité retirée du service a été enlevée d'un hôpital au Libéria et entreposée en sûreté et en sécurité.

75. Des opérations de conditionnement de sources radioactives scellées des catégories 3 à 5 retirées du service ont été menées à bien dans plusieurs États Membres, y compris le Ghana, le Honduras et la Malaisie. Ces missions ont permis de former les opérateurs chargés de la gestion des déchets et le personnel des organismes de réglementation, et de renforcer leur capacité de gestion sûre des sources radioactives scellées retirées du service.

76. Des progrès importants ont été accomplis dans l'incorporation d'une cellule chaude mobile au système de stockage en puits, ce qui permettra de réduire au minimum la manipulation des sources de haute activité et d'éliminer tout transport inutile. Une démonstration de cette incorporation a été faite en septembre 2017 en Afrique du Sud. En outre, les progrès se sont poursuivis dans l'assemblage d'une boîte à outils mobile en vue de faciliter les opérations de conditionnement des sources radioactives scellées des catégories 3 à 5 retirées du service. Une formation à l'utilisation de cette boîte à outils devrait être organisée à l'intention des États Membres début 2018.

77. Plusieurs États Membres ont participé au processus de conception initiale et d'évaluation pour les centres techniques qualifiés, une initiative lancée par l'Agence en 2017 pour faciliter la gestion des sources radioactives scellées retirées du service.

Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif

78. Sellafield Ltd a annoncé en février 2017 que le premier fût de 500 litres de boue radioactive (composée d'algues, de produits de corrosion et de matières portées par le vent) de la piscine d'entreposage du combustible des piles de Sellafield avait été cimenté à l'usine d'encapsulation sur le site et que les déchets étaient prêts pour le stockage définitif à long terme. La société a indiqué que le projet d'évacuation de la boue était en avance de dix ans sur le calendrier et avait coûté la moitié des 200 millions de livres sterling (249 millions de dollars) prévus.

79. Un supercompacteur unique en son genre, capable d'exercer une pression de 1 800 tonnes pour la compression de fûts de déchets de 200 litres remplis fonctionne depuis plus de 100 000 heures sur le site de l'Idaho du Ministère de l'énergie des États-Unis. Il a compacté plus de 238 000 fûts de débris de déchets au cours des 14 dernières années, ce qui a permis d'économiser, selon les estimations, 6 000 chargements par camion qui auraient été nécessaires pour transporter plus de 43 000 mètres cubes de déchets vers l'installation pilote de confinement des déchets (WIPP).

80. À la centrale nucléaire de Bradwell, au Royaume-Uni, Magnox Ltd et ses filiales sont parvenues à évacuer 65 tonnes de débris d'éléments combustibles, grâce à des techniques de traitement innovantes. Après avoir été reclassés, les déchets solides ont été stockés dans l'installation de stockage définitif pour déchets de faible activité (DFA).

81. Le premier four de fusion de 300 tonnes (sur deux) a été installé avec succès dans l'installation de traitement des déchets de faible activité à Hanford, aux États-Unis. Le Laboratoire national du Nord-Ouest Pacifique a élaboré un algorithme de formulation du verre pour les déchets de haute activité (DHA) pour ce four de fusion afin d'obtenir le mélange optimal de déchets et d'additifs pour chaque lot de déchets de haute activité à vitrifier.

82. Des chercheurs du Centre de recherche atomique Bhabha (BARC) ont annoncé la fabrication de « crayons » de césium 137 vitrifié à partir de déchets radioactifs. Cette source scellée, d'une période de 30 ans, pourrait remplacer les sources de cobalt 60 (qui ont une période plus courte, de 5,3 ans) actuellement utilisées pour l'irradiation des aliments, la curiethérapie et la stérilisation du matériel médical.

83. La mise en place d'une installation de traitement d'une capacité de 10 000 mètres cubes de déchets radioactifs solides dans la baie de Saïda, au nord de la Russie, a été approuvée à la suite de l'évaluation de l'impact environnemental. Cette installation permettra de conditionner et de gérer ce type de déchets sous les auspices de SevRAO, l'organisme chargé des déchets nucléaires dans le nord-ouest de la Russie.

84. En Suisse, l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire a approuvé la construction de l'installation d'entreposage provisoire pour les déchets de faible ou moyenne activité (DFMA) à l'Institut Paul Scherrer. Le bâtiment « Stapelplatz Ost », qui sera construit à Würenlingen, permettra d'entreposer des déchets issus des applications des radio-isotopes en médecine et dans l'industrie jusqu'à ce qu'un dépôt géologique profond soit disponible.

85. Des chercheurs de la General Nuclear Power Corporation et de l'université de Tsinghua en Chine ont mis au point ensemble un système d'irradiation par faisceau d'électrons pour le traitement des eaux industrielles usées. En irradiant l'effluent au moyen de faisceaux d'électrons, on peut réduire plus de 70 substances chimiques complexes en molécules plus petites, que l'on peut ensuite traiter et extraire avec des processus biologiques normaux.

Stockage définitif des déchets radioactifs

86. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs, excepté les déchets de haute activité et/ou le combustible nucléaire usé déclaré comme déchet, sont en service dans le monde. Elles comprennent des installations de stockage définitif en tranchées destinées aux déchets de très faible activité (en Espagne, aux États-Unis, en France et en Suède, par exemple) ou aux déchets de faible activité (DFA) dans des régions arides (en Afrique du Sud et aux États-Unis, par exemple), des installations construites en surface ou à faible profondeur destinées aux DFA (comme en Chine, en Espagne, en France, en Hongrie, en Inde, au Japon, en Pologne, en République tchèque, au Royaume-Uni et en Slovaquie) et des installations d'entreposage en structures artificielles destinées aux déchets de faible et moyenne activité (DFMA) construites dans des formations géologiques, à différentes profondeurs (en Allemagne, aux États-Unis, en Finlande, en Hongrie, en Norvège, en République de Corée et en République tchèque, par exemple). D'autres installations de stockage définitif de DFMA, notamment en Allemagne, en Belgique, en Bulgarie, au Canada, en Lituanie, en République islamique d'Iran, en Roumanie et en Slovénie, sont à différentes étapes d'autorisation ou de construction. Les solutions possibles étudiées pour le stockage définitif des déchets de matières radioactives naturelles varient en fonction des réglementations nationales.

87. Les travaux du programme de stockage définitif du combustible usé du Canada ont progressé en 2017 en ce qui concerne le choix du site d'une installation de stockage définitif en formations géologiques profondes, avec la participation au processus de choix du site de sept des 22 communautés intéressées à l'origine. S'agissant de la demande de licence pour l'installation de stockage définitif géologique des DFMA à Kincardine, le Ministère de l'environnement et du changement climatique a demandé des informations supplémentaires sur la déclaration d'impact environnemental faite par Ontario Power Generation, pour permettre à l'Agence canadienne d'évaluation environnementale de poursuivre l'examen de cette demande.

88. Le programme chinois de stockage géologique pour le futur inventaire de déchets de haute activité vitrifiés se poursuit, avec des études de sites à la fois dans des formations cristallines et dans

des formations sédimentaires. Il étudie actuellement des plans de construction d'une installation souterraine expérimentale dans une formation de roche cristalline de la région de Beishan, et d'autres études de sites de surface pour une formation sédimentaire en Mongolie-Intérieure.

89. La société finlandaise Posiva, qui est en train de construire la première installation de stockage géologique profond de combustible nucléaire usé au monde, à Olkiluoto, a examiné différentes avancées technologiques et opérationnelles, telles que des essais des systèmes in situ grandeur nature et d'autres essais concernant la construction et l'exploitation, en préparation de la mise en service à froid et à chaud, en vue d'obtenir la licence d'exploitation.

90. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Andra, a continué de mettre en œuvre des innovations technologiques, avec des démonstrations et des expériences scientifiques in situ, afin de donner une base scientifique et technique solide à sa demande de licence pour son projet d'installation de stockage en formations géologiques profondes.

91. En mars 2017, le parlement allemand a modifié la loi sur le choix des sites de stockage géologique définitif, conformément aux recommandations de sa commission sur le stockage des DHA, parmi lesquelles la nécessité de fonder les décisions relatives au choix des sites sur des critères pertinents pour la sûreté et de veiller à la pleine participation des parties prenantes. Toujours en 2017, en vertu de la loi sur les engagements relatifs à l'aval du cycle nucléaire, les exploitants des centrales nucléaires ont versé 24,1 milliards d'euros au fonds national pour le financement du stockage définitif des déchets nucléaires, transférant ainsi à l'État toute la responsabilité de l'entreposage et du stockage définitif. Les exploitants restent responsables des activités de déclassement, de traitement des déchets et de conditionnement.

92. En juillet 2017, le Ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie a publié une carte nationale des aspects scientifiques à prendre en considération pour le stockage géologique, qui constitue la première étape en vue du stockage définitif.

93. En Fédération de Russie, l'exploitant national pour la gestion des déchets radioactifs (NO RAO) a commencé à exploiter sa première installation de stockage définitif de DFA à faible profondeur à Novouralsk, dans la région de Sverdlovsk. C'est la première de plusieurs installations de ce type destinées à gérer les déchets radioactifs hérités du passé dans le pays.

94. La procédure d'autorisation environnementale concernant la demande d'autorisation de SKB pour la construction d'une installation de stockage géologique de combustible usé s'est achevée en octobre devant la Cour suédoise pour la conservation des sols et de l'environnement, qui présentera ses conclusions au gouvernement. La municipalité d'Oskarshamn, l'Autorité suédoise de sûreté radiologique et d'autres autorités ont réaffirmé qu'elles étaient favorables à l'octroi de l'autorisation en vertu du Code de l'environnement. La municipalité d'Östhammar donnera sa réponse définitive après un référendum.

95. L'organisation suisse de gestion des déchets radioactifs, Nagra, a présenté des demandes aux fins de la poursuite des analyses des propriétés géologiques et hydrogéologiques des formations rocheuses souterraines de la région Nördlich Lägern pour le choix du site du programme de dépôt géologique.

96. Aux États-Unis, le relèvement après accident à l'installation pilote de confinement des déchets pour les DFMA transuraniens a suffisamment avancé pour permettre le redémarrage des activités en avril 2017, mais à un niveau réduit par rapport à la situation d'avant l'accident de 2014.

B. Fission avancée et fusion

B.1. Fission avancée

97. L'électronucléaire est une technologie éprouvée qui est arrivée à maturité et qui contribue à améliorer la sécurité énergétique, atténue les incidences de la volatilité des prix des combustibles fossiles, accroît la compétitivité des économies et émet considérablement moins de gaz à effet de serre et d'autres polluants que les combustibles fossiles. Comme dans tout autre secteur industriel, la R-D et les innovations technologiques continues³ sont essentielles à la compétitivité et à l'attractivité de l'électronucléaire, même dans un contexte commercial en évolution, y compris pour les primo-accédants.

B.1.1. Réacteurs refroidis par eau

98. Avec plus de 17 000 années-réacteur d'exploitation commerciale, les réacteurs refroidis par eau jouent un rôle clé dans le secteur nucléaire. Plus de 95 % des réacteurs de puissance civils en exploitation et 56 des 58 réacteurs en construction sont refroidis à l'eau ordinaire ou lourde dans le monde. En 2017, trois nouveaux réacteurs refroidis par eau ont été reliés au réseau en Chine et au Pakistan, et la construction de deux tranches a débuté en Inde et en République de Corée (figure B-1). La plupart des primo-accédants choisissent des modèles refroidis par eau avancés en tant que premiers réacteurs, comme c'est le cas du Bélarus et des Émirats arabes unis. La sixième Conférence internationale sur les questions d'actualité en matière de sûreté des installations nucléaires de l'Agence, qui a eu lieu en juin 2017, a principalement porté sur la démonstration de la sûreté des centrales nucléaires avancées refroidies par eau, y compris les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires.

99. La plupart des réacteurs refroidis par eau avancés ont une capacité de production accrue. Les modèles de construction récente produisent 1000 à 1700 MW par tranche, et les modèles évolutifs devraient permettre une production encore supérieure. La tendance est clairement aux sites à plusieurs tranches comportant un ou plusieurs types de réacteurs, ces configurations étant davantage propices aux économies d'échelle. Des modèles avancés de réacteurs refroidis par eau sont envisagés, étudiés et construits dans plusieurs pays en vue de la mise en place progressive de cycles du combustible plus efficaces, partiellement ou totalement fermés. L'Inde progresse dans sa stratégie en trois phases axée sur l'énergie nucléaire produite à partir de thorium, avec des réacteurs à eau lourde (REL), des réacteurs à neutrons rapides et son REL avancé basé sur un cycle du combustible au Th/²³³U. La Chine a entièrement alimenté un réacteur CANDU en exploitation avec un mélange d'équivalent uranium naturel constitué de combustible usé de réacteur à eau ordinaire (REO) et de résidus d'uranium appauvri.

100. Plusieurs États Membres mènent actuellement des activités de R-D sur les réacteurs refroidis à l'eau supercritique (RESC). Les études de conception du RESC canadien, un concept de réacteur à tubes de force doté d'un modérateur à eau lourde, et du CSR1000 chinois ont été achevées. Le concept d'un REO européen haute performance a été élaboré en Europe, et une installation d'essai de qualification de combustible en réacteur a été planifiée, conçue et analysée en collaboration avec la Chine. En Fédération de Russie, des études de fond sont en cours sur un réacteur de puissance innovant refroidi et modéré par eau (VVER), qui utilise un fluide de refroidissement à paramètres supercritiques, et sur la possibilité d'un cœur à spectre rapide.

³ Pour de plus amples informations, voir le Système d'information sur les réacteurs avancés (ARIS) de l'Agence : <https://aris.iaea.org>



FIG. B-1. La centrale nucléaire de Hanul (anciennement Ulchin) (République de Corée) comprend six tranches en exploitation et deux autres en construction (Photo : KHNP).

B.1.2. Systèmes à neutrons rapides

101. D'importants programmes de réacteurs à neutrons rapides sont mis en œuvre dans le monde depuis 1960. La troisième Conférence internationale sur le thème « Réacteurs à neutrons rapides et cycles du combustible connexes - systèmes nucléaires de prochaine génération pour le développement durable », qui a eu lieu en juin 2017 à Iekaterinbourg (Fédération de Russie), a conclu qu'un cycle fermé du combustible nucléaire s'appuyant sur des réacteurs à neutrons rapides pouvait fournir une énergie économique, sûre, durable et propre pour de nombreuses générations, en particulier en ce qui concerne la préservation des ressources et la gestion des déchets nucléaires à longue période et de haute activité. Plusieurs modèles innovants de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), 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 (RSF) est également en train d'être élaboré en tant qu'option à long terme.

102. La technologie des réacteurs à neutrons rapides la plus aboutie, le RNR-Na, a plus de 420 années-réacteur d'expérience acquise dans le cadre de la conception, de la construction et de l'exploitation de tranches expérimentales, de prototypes de tranches, et de tranches de démonstration ou commerciales dans plusieurs pays dont l'Allemagne, la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon et le Royaume-Uni.

103. L'exploitation commerciale du RNR-Na russe BN-800, a commencé en octobre 2016 (figure B-2). Le RNR-Na de recherche polyvalent MBIR, qui remplacera le réacteur expérimental BOR-60 en 2020, est en construction et sa cuve a été fabriquée en 2017. S'agissant de la technologie des métaux lourds liquides, une procédure d'autorisation est en cours pour le réacteur refroidi au plomb BREST-OD-300.



FIG. B-2. Le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium BN-800, dont l'exploitation commerciale a débuté le 31 octobre 2016 (Photos : Rosenergoatom).

104. En Inde, la construction du prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe est achevée et le premier test de criticité est prévu pour 2018. Deux autres réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides sont prévus pour le même site.

105. Le réacteur à caloporteur plomb chinois CLEAR-I, dont l'étude technique est en cours, a été choisi en 2017 comme référence pour l'élaboration de systèmes pilotés par accélérateur (SPA) et de réacteurs à neutrons rapides. Le réacteur innovant CFR-600 en est à l'étape de l'étude technique et il est prévu que son exploitation commence en 2025.

106. En décembre 2016, le Gouvernement japonais a décidé de déclasser le prototype de RNR-Na Monju, qui était en arrêt de longue durée. La mise au point du réacteur japonais à neutrons rapides refroidi au sodium innovant se poursuivra, car la technologie de réacteur à neutrons rapides est considérée comme vitale pour l'avenir du bouquet énergétique du pays.

107. En Europe, le Gouvernement français a autorisé la poursuite de la phase de conception de base du prototype de RNR-Na industriel ASTRID jusqu'à la fin de 2019. En Belgique, la construction de MYRRHA, un réacteur refroidi au plomb-bismuth pouvant fonctionner en mode sous-critique et critique en tant que SPA, est à l'examen, avec comme objectif que sa première installation de R-D soit disponible d'ici la fin de 2024. Une procédure de préautorisation est en cours pour le réacteur avancé refroidi au plomb suédois SEALER auprès de la Commission canadienne de sûreté nucléaire. L'objectif est le lancement, avant la fin de 2021, des travaux de construction de ce réacteur « pile » de 3 à 10 MWe conçu pour la production commerciale d'électricité et destiné aux populations de l'Arctique et aux exploitations minières, la tranche de démonstration devant être mise en service en 2025. D'autres concepts en cours d'élaboration sont le modèle ALFRED, un RNR-Pb européen de démonstration de Génération IV, et le modèle ALLEGRO, un RNR-G expérimental.

108. Aux États-Unis, TerraPower a achevé l'étude de conception du réacteur à onde progressive de type « breed-and-burn » et est en train de mettre au point un RSF. Westinghouse élabore actuellement un petit réacteur modulaire innovant de 450 MWe refroidi au plomb.

B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz

109. Le Royaume-Uni continue l'exploitation commerciale de 14 réacteurs avancés refroidis par gaz et mène actuellement des études sur la prolongation de la durée de vie. De nombreux États Membres sont en train de mettre au point de petits RHTRG modulaires dotés de caractéristiques de sûreté intrinsèque qui permettent de se passer des systèmes de sauvegarde les plus actifs. Un RHTRG utilisant un combustible à particules et un caloporteur à l'hélium, et fonctionnant à des températures élevées (≥ 700 °C) accroîtrait l'efficacité et pourrait alimenter le marché de la chaleur industrielle.

110. En Chine, la construction du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM) a été achevée. La centrale industrielle de démonstration de 200 MWe, composée de deux réacteurs de 250 MWth, devrait entrer en service en 2018. Les cuves sous pression des réacteurs ont été installées, et les internes du cœur et les sphères de graphite (qui font partie du cœur de démarrage) ont été chargés dans l'une des tranches. La conception d'une centrale commerciale de 600 MWe et des études de faisabilité pour cinq sites possibles sont en cours. La production a commencé à l'usine de fabrication de boulets à échelle commerciale de Baotou en 2016.

111. L'Arabie saoudite prévoit de mettre en place des RHTRG dans son projet national d'énergie atomique. Un mémorandum d'accord a été signé avec la Chine concernant l'établissement d'un partenariat stratégique à long terme pour la localisation et la propriété de la technologie. Une étude de faisabilité conjointe prenant en considération les applications de chaleur industrielle dans le secteur pétrochimique a été achevée en 2017.

112. En septembre 2017, le Ministre polonais de l'énergie a accepté le rapport d'un comité consultatif préconisant la mise en place de RHTRG, lesquels permettraient en outre de remplacer plus de 6 500 MW de la chaleur industrielle actuellement produite au moyen de sources aux hydrocarbures. Le plan proposé prévoit notamment l'accueil du réacteur expérimental européen à haute température,

d'une puissance d'environ 10 MWth, afin de favoriser l'élaboration de nouvelles technologies et la mise en valeur des ressources humaines.

113. Après avoir reçu une licence initiale de site pour son réacteur de puissance expérimental à lit de boulets de 10 MWth, l'Agence nationale indonésienne de l'énergie nucléaire cherche actuellement à financer la construction de ce réacteur.

114. Au Japon, on attend les résultats de l'examen réglementaire préalable au redémarrage du réacteur expérimental à haute température (HTTR) de 30 MWth pour effectuer d'autres tests de démonstration de la sûreté et de la technologie.

115. Les activités menées aux États-Unis étaient centrées sur la qualification du combustible à particules à trois couches isotropes en vue d'une utilisation future. Le processus d'établissement d'un nouveau cadre d'autorisation concernant les réacteurs avancés, en particulier les RHTRG, a progressé.

116. Les activités liées aux RHTRG se poursuivent à la Commission européenne avec le programme GEMINI+, en Afrique du Sud avec des travaux de R-D sur un nouveau concept avancé de réacteur à haute température (HTR) à lit de boulets, ainsi qu'en République de Corée et en Fédération de Russie avec la mise au point et le maintien de technologies cruciales. Trois projets de recherche coordonnée de l'Agence portent sur l'incertitude dans les analyses, l'élaboration des critères de conception de la sûreté et l'application de la chaleur des RHTRG pour une extraction de minerai plus propre et durable.

B.1.4. Réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires

117. De nombreux États Membres montrent un intérêt croissant pour les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP). Les composants et les systèmes de ces réacteurs de nouvelle génération dont la puissance peut atteindre 300 MWe peuvent être fabriqués en usine, puis installés sur les sites sous forme de modules. Prévus pour des marchés de niche de production d'électricité ou d'énergie dans lesquels les grands réacteurs ne seraient pas une solution viable, les RFMP peuvent répondre à un impératif de flexibilité en matière de production d'électricité pour une gamme étendue d'utilisateurs et d'applications, notamment le remplacement des centrales à combustibles fossiles vieillissantes, l'approvisionnement en énergie des pays possédant de petits réseaux électriques et des régions isolées ou non reliés au réseau, et la possibilité d'utiliser des systèmes hybrides d'énergie nucléaire et d'énergies renouvelables. Ils sont également mieux adaptés à une utilisation partielle ou spécialisée dans des applications non électriques, telles que la production de chaleur pour des procédés industriels, la production d'hydrogène et le dessalement de l'eau de mer. Même si on pense que les RFMP auront des caractéristiques de sûreté améliorées et seront plus abordables, ces propriétés n'ont pas encore été pleinement démontrées.

118. Plus de 50 modèles de RFMP appartenant à tous les grands types de réacteurs sont en cours d'élaboration, dont trois en sont à un stade avancé de construction, à savoir : le modèle argentin CAREM-25 de 27 MWe (un prototype de REP intégré CAREM de 150–300 MWe) (figure B-3), dont la mise en service de démarrage est prévue en 2019 ; le modèle chinois HTR-PM, qui devrait être opérationnel en 2018 ; et, en Fédération de Russie, une centrale nucléaire flottante sur barge dotée de deux modules REP KLT-40S de 35 MWe, dont la mise en service de démarrage est prévue en 2018.



FIG. B-3. Modèle CAREM-25 en construction (à gauche) ;
configuration finale de la centrale (à droite) (Photos : CNEA, Argentine).

119. La Commission canadienne de sûreté nucléaire a déjà reçu dix demandes d'examen de la conception avant autorisation par des vendeurs et les Laboratoires nucléaires canadiens ont fait part de leur intérêt pour devenir des plateformes de démonstration pour les RFMP. Un rapport stratégique sur le long terme publié en 2017 énonce l'objectif de la mise en place d'un nouveau RFMP sur le site de Chalk River d'ici 2026.

120. La construction de la première centrale de démonstration industrielle dotée de deux modules ACP100 de la Compagnie nucléaire nationale chinoise devrait commencer en 2018 sur le site de la centrale nucléaire de Changjiang, à Hainan. La société China General Nuclear Power Group a commencé à fabriquer les systèmes et les composants du modèle ACPR50S, un réacteur flottant offshore qui devrait être raccordé au réseau en 2022. L'Institut de recherche et de conception en ingénierie nucléaire de Shanghai a achevé la phase d'étude de conception de ses modèles CAP150 et CAP200.

121. En France, un consortium dirigé par EDF, qui regroupe notamment le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), la DCNS (Naval Group) et TechnicAtome, est en train d'élaborer un RFMP terrestre de type REP intégré de 150–170 MWe. La DCNS a également poursuivi la mise au point du modèle Flexblue, un REP immergé transportable de 160 MWe.

122. La Cité du Roi Abdallah pour l'énergie atomique et renouvelable (KACARE) a obtenu la prise en charge conjointe de la conception du SMART de 100 MWe de l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique (KAERI), après la conclusion en 2015 d'un accord sur la mise en place de deux tranches en Arabie saoudite. La Commission jordanienne de l'énergie atomique est en train de mener une étude de faisabilité concernant la construction de deux réacteurs SMART pour la production d'électricité et le dessalement de l'eau, en partenariat avec la KACARE et le KAERI.

123. La Fédération de Russie a élaboré le modèle RITM-200 de 50 MWe, un réacteur intégré destiné aux brise-glaces nucléaires qui devrait être mis en service en 2020. Le modèle SVBR-100 a été mis au point pour permettre d'atteindre des caractéristiques proches de celles des réacteurs à neutrons rapides innovants, un réacteur à neutrons rapides polyvalent refroidi à l'eutectique plomb-bismuth d'une puissance de 100 MWe. Cette technologie a déjà été utilisée dans plusieurs sous-marins nucléaires russes. L'organisme chargé de la conception travaille sur une centrale pilote, et la production en série devrait commencer en 2030.

124. Le Gouvernement du Royaume-Uni a lancé un concours en mars 2016 en vue de développer les recherches sur le potentiel des RFMP dans le cadre d'études telles que les évaluations technico-économiques, et de permettre au secteur de collaborer avec lui en ce qui concerne les facteurs et catalyseurs de la mise en place. Rolls-Royce plc travaille à la mise au point du modèle UK SMR, un REP de type boucle de 450 MWe sous forme de modules normalisés transportables.

125. En mars 2017, le Conseil national de la recherche des États-Unis a accepté pour enregistrement et examen la demande de certification de la conception du modèle NuScale, un REP intégré

de 12 modules d'une puissance de 50 MWe chacun. Nuscale Power prévoit de commencer l'exploitation commerciale de sa première centrale dans l'Idaho à l'horizon 2026 et a lancé un plan de mise en place à court terme au Royaume-Uni. La plateforme GAIN (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) du Département de l'énergie nucléaire des États-Unis soutient la mise au point du modèle SMR-160, un autre REP intégré conçu par Holtec International.

126. Le réacteur avancé alimenté (et refroidi) avec des sels fondus (RSF) est un nouveau venu sur le marché. Les RSF présentent plusieurs avantages potentiels, notamment : des températures d'exploitation plus élevées, ce qui accroît l'efficacité, une faible pression du caloporteur, le volume et la durée de vie plus faibles des déchets de haute activité, des caractéristiques de sûreté remarquables, l'élimination des problèmes liés aux effets des taux de combustion élevés des combustibles solides et des cycles du combustible flexibles (uranium, plutonium, thorium). L'une des nombreuses études de conception menées concerne le modèle IMSR400, un RSF intégré d'une puissance d'environ 190 MWe élaboré par Terrestrial Energy Canada.

127. Plusieurs difficultés restent à résoudre pour permettre une mise en place rapide des RFMP. Un solide cadre réglementaire doit être établi pour l'examen réglementaire des questions institutionnelles. Les difficultés techniques concernent notamment la dotation en personnel des salles de commande et l'ergonomie dans les centrales multi-modulaires de RFMP, la détermination de la zone d'application du plan d'urgence, l'élaboration de nouveaux codes et normes, et la constitution d'une chaîne d'approvisionnement fiable. Par ailleurs, bien que les RFMP nécessitent un investissement initial par unité moins élevé, leur coût de production d'électricité sera probablement supérieur à celui de grands réacteurs. Leur compétitivité économique doit être évaluée par rapport à celle d'autres options et renforcée grâce à des économies d'échelle. On peut raisonnablement espérer que le premier parc commercial de RFMP soit mis en service entre 2025 et 2030, et que de grands parcs soient mis en place ensuite. La collaboration et les partenariats internationaux sont essentiels pour promouvoir l'élaboration et la mise en place des RFMP.

B.1.5. Initiatives internationales portant sur des systèmes d'énergie nucléaire innovants

128. Plusieurs projets internationaux ayant trait à des systèmes d'énergie nucléaire innovants ont été lancés ces dernières décennies pour résoudre des questions comme la hausse de la demande d'énergie, la disponibilité des ressources de combustible à l'uranium, la réduction du fardeau futur des dépôts géologiques grâce au recyclage du combustible nucléaire usé, l'amélioration de l'efficacité thermique, la sûreté grâce à la conception renforcée et la résistance à la prolifération.

129. Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO), qui a été mis en place à l'Agence en 2000, réunit les concepteurs de technologies, les fournisseurs et les clients afin de leur permettre d'examiner des mesures internationales et nationales à prendre pour moderniser les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible de manière à assurer la durabilité à long terme de l'électronucléaire. L'INPRO compte actuellement 42 membres : 41 États Membres de l'AIEA et la Commission européenne.

130. Un manuel actualisé de l'INPRO sur l'évaluation de la durabilité des agresseurs environnementaux a été publié en 2016. Des évaluations des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) basées sur la méthodologie INPRO sont actuellement réalisées en Roumanie et en Ukraine, et la Chine, l'Inde et la Fédération de Russie sont en train d'effectuer des évaluations à portée limitée de leurs modèles de RNR-Na les plus récents. En 2017, le comité directeur de l'INPRO a donné son aval à la mise en place d'un nouveau service aux États Membres fondé sur les outils de modélisation, d'analyse et de formulation de feuilles de route pour des scénarios de systèmes d'énergie nucléaire élaborés dans le cadre de l'INPRO au cours des dernières années. Ce nouveau service sera proposé en complément du service NESA actuel.

131. En 2017, l'Australie a adhéré au Forum international Génération IV (GIF), un projet international de coopération consacré à l'étude de la faisabilité et des performances des réacteurs nucléaires de la prochaine génération. Les 14 membres du GIF participent à des activités de R-D en coopération portant sur au moins un des six systèmes d'énergie nucléaire suivants : les RNR-G, les réacteurs à très haute température, les RESC, les RNR-Na, les RNR-Pb et les RSF. Des réunions annuelles de coordination, qui sont organisées entre le GIF et l'AIEA sur les méthodes d'évaluation dans les domaines de l'économie et de la résistance à la prolifération, permettent des échanges d'informations sur les projets en cours.

132. En 2016, le GIF a publié un rapport intitulé *Safety Design Guidelines on Safety Approach and Design Conditions for Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor Systems*, afin de fournir des orientations aux concepteurs et aux vendeurs sur la réactivité du cœur des réacteurs à neutrons rapides et la perte de l'évacuation de la chaleur. Ce rapport fait suite aux activités du GIF lancées en 2011, en coopération avec l'Agence, pour élaborer des critères de conception de la sûreté pour les RNR-Na, critères qui ont été publiés en 2013.

133. La plate-forme technologique pour une énergie nucléaire durable (SNETP) de l'Union européenne rassemble plus de 100 parties prenantes européennes de l'industrie, de la recherche, des milieux universitaires, de la sûreté, et d'organisations gouvernementales et non gouvernementales en vue de promouvoir la recherche, le développement et la démonstration de technologies de fission avancée pour la mise en oeuvre du Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques. L'Initiative européenne pour une industrie nucléaire durable a été lancée en 2010 dans le cadre de la SNETP pour faire la démonstration de la technologie de réacteurs à neutrons rapides de Génération IV. Dans son programme stratégique de la recherche et de l'innovation, la SNETP établit des priorités entre les différents systèmes de nouvelle génération et propose que les projets suivants soient élaborés : le projet de RNR-Na ASTRID en tant que solution de référence, avec la construction d'un prototype en France aux environs de 2020 ; le modèle de RNR-Pb ALFRED, en tant que première solution de substitution, avec la construction d'un réacteur expérimental pour la démonstration de cette technologie dans un autre pays européen désireux d'accueillir ce programme, qui est appuyé par le système MYRRHA en Belgique ; et le modèle de RNR-G ALLEGRO en tant que seconde solution de substitution, qui nécessiterait également la construction d'un démonstrateur technologique dans un pays européen.

134. L'Innovation nucléaire 2050 (NI2050) de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) est l'une des récentes initiatives internationales visant à élaborer des feuilles de route en vue d'un avenir énergétique sans carbone. Cette initiative, qui réunit plusieurs pays de l'OCDE ainsi que des représentants de la SNETP, du GIF, de la WNA et de l'Agence, a pour objet d'aider à établir les priorités mondiales de R-D sur la fission nucléaire, d'encourager leur mise en oeuvre et de déterminer des possibilités de coopération renforcée.

B.1.6. Applications non électriques de l'énergie nucléaire

135. L'utilisation de l'énergie nucléaire dans des applications non énergétiques, encore appelée cogénération nucléaire, suscite un intérêt grandissant. La cogénération peut être exploitée pour le dessalement de l'eau de mer, la production d'hydrogène, le chauffage urbain, la récupération tertiaire du pétrole et d'autres applications industrielles, et peut en plus contribuer à la sécurité et à la durabilité énergétiques, ainsi qu'à la lutte contre les changements climatiques. Elle pourrait permettre d'accroître de plus de 30 % l'efficacité thermique globale d'une centrale nucléaire grâce à la réutilisation de la chaleur résiduelle, et de réduire jusqu'à 35 % les incidences du chauffage et du transport sur l'environnement si elle était introduite sur ces marchés.

136. Des études récentes montrent que la cogénération à l'aide de chaleur résiduelle peut permettre de compenser une part importante du coût 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 permettrait des économies importantes par rapport au prix de l'eau produite par dessalement dans des centrales fonctionnant au gaz ou au mazout.

137. Avec les systèmes avancés actuels de technologie de dessalement de l'eau de mer, 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 innovante du traitement, on peut considérer que le dessalement nucléaire dans les centrales nucléaires sera une option viable dans l'avenir. On considère qu'un modèle intégré hybride utilisant les technologies thermique et membranaire est optimal pour utiliser la chaleur rejetée par les condenseurs des centrales nucléaires ou extraite sous forme de vapeur industrielle de qualité inférieure des derniers étages d'une turbine à basse pression et transmise à un système de dessalement par distillation à effets multiples. Cela pourrait permettre de réduire la consommation énergétique, le volume d'eau de mer utilisé et le coût du rejet. Plusieurs États Membres, dont l'Arabie saoudite, la Chine, l'Égypte, la Jordanie et le Pakistan, ont exprimé ou renouvelé leur intérêt pour le dessalement nucléaire. Plusieurs modèles de réacteurs en cours d'élaboration, tels que le SMART en République de Corée, exploiteront la chaleur résiduelle pour le dessalement de l'eau de mer.

138. Étant donné les progrès réalisés en ce qui concerne les modèles de réacteurs à haute température et la production nucléaire d'hydrogène, et en particulier l'électrolyse de la vapeur à haute température, la production nucléaire d'hydrogène pourrait jouer un rôle croissant dans l'avenir de l'économie de l'hydrogène et contribuer à la lutte contre les changements climatiques. Les réacteurs nucléaires à basse température actuels pourraient également permettre de 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.

139. Que ce soit pour le chauffage urbain ou pour d'autres usages, les centrales nucléaires peuvent permettre de produire de la chaleur industrielle ou de la vapeur en quantité suffisante avec un bon rapport coût-efficacité, compte tenu des techniques actuelles qui permettent de transporter d'importantes quantités de chaleur (de l'ordre du GW) sur de longues distances (environ 100 km). Le prix de la chaleur fournie au client pourrait être compétitif dès que la quantité de chaleur récupérée d'une centrale nucléaire dépasse un certain seuil.

B.2. Fusion

140. Le projet ITER a enregistré des progrès sensibles, et la construction et l'assemblage des éléments sur le site sont désormais plus visibles (figure B-4). D'importants composants continuent d'arriver et d'autres sont en cours de fabrication. Les principales activités de l'équipe portent sur l'achèvement de la conception, l'intégration technique et la sûreté nucléaire. Parallèlement, un vaste programme de R-D mené par les parties prenantes au projet appuie l'achèvement des éléments exposés au plasma, du système de chauffage et de génération de courant, et des systèmes de diagnostic et de contrôle. Après plusieurs révisions du calendrier, l'ITER et sept organismes nationaux sont arrivés à la conclusion que du plasma serait produit pour la première fois avant la fin de l'année 2025.

141. Une autre étape majeure franchie dans le domaine de l'énergie de fusion est la production de plasma, pour la première fois, par le stellarator optimisé Wendelstein 7-X (W7-X) à l'Institut Max Planck de physique des plasmas en Allemagne (figure B-4). Cet appareil vise principalement à démontrer la possibilité d'une production stable de plasma selon des paramètres adéquats pour la fusion, et à confirmer ainsi que le stellarator est un concept viable pour les centrales à fusion. Après achèvement de la principale phase de construction du W7-X et sa mise en service,

l'exploitation du plasma a été réalisée trois jours par semaine de décembre 2015 à mars 2016, ce qui représente 10 semaines d'exploitation. Les bobines produisant le champ magnétique et leur structure d'appui interne du cryostat ont été maintenues à une température cryogénique (100 K) tout au long de la campagne (dans un champ magnétique, la température de fonctionnement des bobines du W7-X est de 4 K), alors que la puissance du champ magnétique était augmentée et diminuée tous les jours où le plasma était exploité.



FIG. B-4. À gauche : le site de l'ITER en octobre 2017 (Photo : ITER IO). À droite : vue extérieure du stellarator Wendelstein 7-X (Photo : Institut Max Planck de physique des plasmas).

142. Plusieurs programmes de R-D sur l'ingénierie, l'intégration, la conception de centrales, les matériaux et la sûreté en lien avec la fusion se sont poursuivis. D'importants travaux de R-D portant sur une source de neutrons de fusion sont en cours en Chine, en Europe et au Japon. Les activités de validation technique et d'étude de projet menées conjointement par l'Europe et le Japon à l'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion (IFMIF) visent à effectuer une étude technique détaillée, complète et pleinement intégrée ainsi qu'à valider l'exploitation continue et stable de chacun des prototypes de sous-système de l'IFMIF. Les performances de l'installation de cibles au lithium, des résonateurs demi-onde bas bêta et d'autres sous-systèmes ont été validées. La validation du prototype d'accélérateur linéaire de l'IFMIF devrait être achevée en 2019.

143. Les sources compactes de neutrons de fusion chinoises, qui sont encore en construction, devraient produire un flux de neutrons rapides pouvant atteindre $10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ d'ici la fin de l'année 2018.

144. L'Agence est en train d'élaborer des normes et des lignes directrices pour les techniques de test sur les petits spécimens, qui seront utilisées, avec des sources de neutrons spécialement prévues pour la fusion, dans le cadre des procédures de sélection et de qualification des matières.

C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

145. Les accélérateurs de faisceaux d'ions sont le plus souvent utilisés dans le cadre d'études environnementales, d'applications biomédicales, de la caractérisation du patrimoine culturel, de l'établissement de la provenance, de la science des matériaux et de la datation au carbone⁴.

⁴ Voir le Portail des connaissances sur les accélérateurs de l'AIEA pour plus d'informations : <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators>

Microscopie nucléaire de cellules entières à très haute résolution

146. Associés à un système de focalisation élaboré, les accélérateurs de faisceaux d'ions ayant des énergies d'ions de quelques mégaélectronvolts peuvent émettre des faisceaux de quelques dizaines de nanomètres de diamètre. Cela permet d'obtenir des images de cellules biologiques entières à des résolutions bien inférieures à la limite de diffraction optique.

147. Les faits marquants récents ayant trait aux systèmes de focalisation et aux instruments de détection de rayonnements optiques ont permis des progrès dans le domaine de l'imagerie biologique à l'aide de microsondes nucléaires. La figure C-1 montre une image structurale et fluorescente d'une cellule HeLa entière cultivée dans un milieu contenant des nanodiamants fluorescents. La taille du point utilisée pour l'imagerie était de 30 nm, soit l'une des plus petites tailles de faisceau obtenue pour des ions de 1,6 MeV. Ces progrès permettent de comprendre les effets des rayonnements sur des cellules vivantes individuelles et d'élaborer de nouveaux traitements et médicaments.

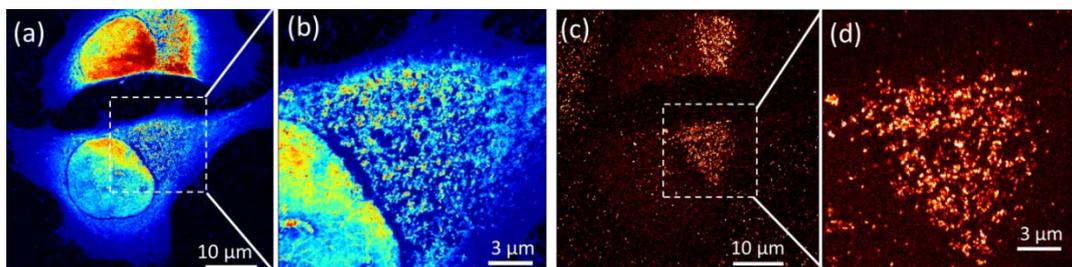


FIG. C-1. Absorption de nanodiamants par des cellules HeLa. (a) et (b) Images d'une microscopie ionique en transmission à balayage montrant les différences de densité et sur lesquelles le noyau cellulaire est clairement visible. (c) et (d) Imagerie par fluorescence induite par faisceaux d'ions indiquant l'emplacement des nanodiamants (Photos : A/P Andrew Bettioli, Centre des applications des faisceaux d'ions, Université nationale de Singapour).

Datation à l'aide de faisceaux d'ions

148. Les techniques par faisceaux d'ions s'avèrent aussi très utiles pour les enquêtes criminelles et les questions de sécurité sanitaire des aliments et de santé, ainsi que pour l'étude des objets du patrimoine culturel et des échantillons de l'environnement. La détermination de l'âge absolu par la datation au carbone permet de détecter des falsifications et est aujourd'hui un outil largement utilisé pour l'étude du patrimoine culturel (figure C-2). Elle est basée sur la mesure des concentrations résiduelles de carbone 14 d'un échantillon par spectrométrie de masse par accélérateur. L'AIEA a lancé en 2017 un projet de recherche coordonnée pour mieux faire connaître ce thème et combler le fossé entre les professionnels des techniques nucléaires d'analyse et les milieux de la criminalistique.



FIG. C-2. Échantillon de la célèbre Louve capitoline exposée au Centre for Dating and Diagnostics de l'université du Salento, à Lecce (Italie) (photo de gauche). La statue de bronze était considérée comme une œuvre étrusque datant d'environ 500 avant J.-C., jusqu'à ce que l'on prélève des échantillons des noyaux du moule original puis sélectionne des résidus organiques par microscope optique ; il est ensuite ressorti de la datation au carbone au poste final de l'accélérateur (photo de droite) que la statue avait été conçue entre 1100 et 1200 après J.-C. et s'avère donc seize cents ans plus jeune qu'on ne le pensait. (Photos : G. Quarta, L. Calcagnile, université du Salento).

SESAME offre sa première lumière synchrotron à ses utilisateurs

149. Le rayonnement synchrotron pour les sciences expérimentales et appliquées au Moyen-Orient (SESAME) a émis sa « première lumière » en janvier 2017 et a été inauguré en mai (figure C-3). La nouvelle installation de recherche implantée en Jordanie est dotée d'une source de rayonnement synchrotron de troisième génération, de 2,5 GeV – la première en son genre au Moyen-Orient –, qui peut émettre des rayonnements de haute brillance sur des longueurs d'ondes allant de l'infrarouge aux rayons X durs, servant dans un large éventail d'applications dans les domaines de la biologie, des matériaux avancés, du patrimoine culturel et de la physique des matières condensées. SESAME, dont l'UNESCO est le chef de file international, bénéficie de l'appui de nombreux États Membres de l'AIEA, de l'Union européenne et du CERN.



FIG. C-3. Anneau d'entreposage intérieur de SESAME, équipé d'aimants de courbure et de focalisation à travers lesquels les faisceaux d'électrons passent lorsqu'ils subissent des accélérations (photo de gauche) et premier faisceau produit, visualisé par le système d'acquisition de données dans la salle de commande de SESAME (Photos : AIEA).

C.2. Réacteurs de recherche

150. Au 31 décembre, sur les 797 réacteurs de recherche civils qui ont été construits dans 67 pays⁵, 254 étaient en service dans 55 pays⁶. La Fédération de Russie possède le plus grand nombre de réacteurs de recherche en service (59), suivie des États-Unis d'Amérique (50), de la Chine (17) et du Japon (9). Il y a dans le monde 57 réacteurs de recherche fonctionnant à des puissances de 5 MW ou supérieures et produisant donc des flux de neutrons élevés supportant des produits et services à haute capacité.

151. Les réacteurs de recherche sont indispensables pour fournir des radio-isotopes à la médecine et à l'industrie, des faisceaux de neutrons à la recherche sur les matériaux et aux essais non destructifs, des services d'analyse et d'irradiation aux secteurs public et privé ainsi que des services en vue de l'étude du patrimoine culturel et de l'environnement (tableau C-1). Ils apportent une contribution stratégique à l'éducation et à la formation. Étant donné que de nombreux réacteurs de recherche vieillissants sont mis à l'arrêt, les installations restantes et nouvelles doivent être utilisées de façon efficace, bien gérées et exploitées de manière durable. L'AIEA encourage les exploitants de réacteurs de recherche à élaborer ou à actualiser des plans stratégiques pour l'utilisation de leurs installations. Au cours des trois dernières années, 41 installations ont soumis des plans stratégiques à l'Agence pour demander conseil.

⁵ Source : base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

⁶ Plus Taïwan (Chine).

152. La moitié des réacteurs de recherche en service ont plus de 40 ans. Leur cycle de vie peut atteindre ou dépasser 60 ans, mais il est extrêmement important de mettre en place en temps voulu des programmes adéquats de gestion du vieillissement, de rénovation et de modernisation. Le financement de ces installations a tendance à tarir et la planification de la relève s'avère limitée ; c'est pourquoi des systèmes de gestion rationnels et des programmes d'exploitation et de gestion de la durée de vie deviendront indispensables pour qu'elles puissent remplir leurs missions de manière rentable. Le déclassement de plusieurs des 122 réacteurs de recherche définitivement mis à l'arrêt dans 27 États Membres devrait commencer dans un futur proche.

153. Des nouveaux réacteurs de recherche sont en construction dans les pays suivants : Arabie saoudite, Argentine, Fédération de Russie, France, Inde, République de Corée et Ukraine (un ADS). Plusieurs États Membres ont des plans officiels de construction, dont les pays suivants : Bélarus, Belgique, Bolivie, États-Unis, Nigeria, Pays-Bas, Tadjikistan (achèvement du réacteur Argus-FTI), Thaïlande, Viet Nam et 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. Le réacteur jordanien de recherche et de formation – réacteur de recherche polyvalent d'une puissance de 5 MW – à l'Université jordanienne des sciences et des technologies a été mis en service et a obtenu sa licence d'exploitation en novembre 2017. S'étant conformés aux prescriptions de sûreté imposées après Fukushima, l'assemblage critique de puissance nulle et le réacteur de recherche de 5 MW de l'Université de Kyoto (KUCA et KUR) ainsi que le réacteur de recherche de puissance nulle de l'Université de Kindai (UTR) ont été remis en service en 2017. En décembre, le réacteur de recherche polyvalent HANARO (30 MW) en République de Corée a repris ses opérations après avoir été mis à l'arrêt pendant plus de trois ans pour mise en conformité du bâtiment du réacteur.

Tableau C-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde^a

Type d'application	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	Nombre d'États Membres dotés de telles installations
Enseignement et formation	157	53
Analyse par activation neutronique	114	52
Production de radio-isotopes	83	43
Neutronographie	68	38
Irradiation de matériaux et de combustible	62	26
Diffusion neutronique	44	29
Géochronologie	25	22
Transmutation (dopage de silicium)	23	16
Transmutation (pierres précieuses)	18	11
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	14	11
Travaux de recherche innovants sur l'énergie nucléaire	15	10
Autres ^c	118	37

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

^b Sur les 238 réacteurs de recherche considérés (217 en service, 21 en arrêt provisoire en novembre 2017).

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

154. Les États Membres qui envisagent de renforcer ou de préserver leur capacité nucléaire nationale en vue de leurs programmes en science et technologie, dont l'électronucléaire, continuent de manifester de l'intérêt pour la mise en place de réacteurs de recherche. Ainsi, l'Agence a consolidé et développé en 2017 ses quatre instruments et outils : le réacteur-laboratoire par Internet, un outil de formation à distance principalement destiné à la formation universitaire (des séances se sont poursuivies en 2017 pour l'Afrique, l'Europe, l'Amérique latine et les Caraïbes) ; les écoles régionales sur les réacteurs de recherche, qui offrent une formation de base, et l'Initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale (EERRI) qui propose des cours pratiques avancés, principalement à l'intention des jeunes professionnels (en 2017, une école régionale a été organisée conjointement par la Thaïlande et le Viet Nam, et le treizième cours de l'EERRI a été donné en Autriche, en République tchèque et en Hongrie) ; le programme des centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR), qui dispense des formations spécifiques, avancées pour des jeunes professionnels ou des professionnels expérimentés (le SCK•CEN en Belgique et le Ministère américain de l'énergie – Laboratoire national de l'Idaho et Laboratoire national d'Oak Ridge – ont été désignés en 2017).

155. La sûreté, la fiabilité et la rentabilité continues de la gestion et de l'entreposage du combustible nucléaire usé provenant de réacteurs de recherche constituent des défis pour plusieurs États Membres, tout comme la détermination de solutions durables pour la partie terminale du cycle du combustible nucléaire, lesquelles doivent satisfaire aux prescriptions et contraintes en matière de non-prolifération, de politique nationale, d'économie et d'environnement et permettre de résoudre les problèmes techniques. De nombreux pays qui possèdent un ou plusieurs réacteurs de recherche et ont un petit programme nucléaire voire pas du tout sont confrontés au problème du stockage définitif de quantités relativement faibles de combustible nucléaire usé et pourraient être obligés de prendre une décision quant à l'avenir de leurs réacteurs de recherche, au vu de la durée limitée des programmes internationaux de reprise du combustible nucléaire usé provenant de réacteurs de recherche. Une action collective coordonnée par l'AIEA est en cours pour élaborer des modèles de prise de décisions afin d'aider les États Membres à choisir la solution la plus adaptée à leur situation.

156. À ce jour, 97 réacteurs de recherche et deux 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 2017, le réacteur source de neutrons miniature (RSNM) au Ghana a été converti à l'utilisation d'UFE à la place d'UHE et son combustible irradié à l'UHE a été réexpédié en Chine. Au Nigeria, un appui est fourni en vue de la conversion du RSNM. La conversion des réacteurs de recherche à haute performance et à haut flux requiert le développement et la qualification de combustibles à UFE à haute densité (par exemple à l'uranium et au molybdène). Malgré des progrès considérables accomplis, des travaux supplémentaires s'avèrent nécessaires sur les essais d'irradiation, les examens après irradiation et les techniques de fabrication avant que ces combustibles ne puissent être mis sur le marché.

157. À la fin 2017, le programme de renvoi de combustible à l'UHE provenant des États-Unis avait achevé le retrait de quelque 1 300 kg de combustible à l'UHE neuf et usé de réacteurs de recherche, et le programme de rapatriement de combustible d'origine russe avait achevé d'en retirer environ 2 250 kg.

158. En France, AREVA a élargi l'éventail des combustibles usés de réacteurs de recherche à traiter, avec notamment le combustible au silicure, qui a été retraité pour la première fois en 2017.

159. Les brèves pannes rencontrées en 2017 par certaines installations d'irradiation et de traitement de cibles de molybdène 99 dans le monde n'ont pas entraîné de pénuries d'approvisionnement importantes au point d'avoir un impact sur les patients, les fluctuations ayant 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. L'arrêt de la production régulière de molybdène 99 par le réacteur NRU au Canada en 2016 n'a eu aucun effet négatif sur l'offre mondiale. Le remplacement de l'UHE par de l'UFE dans les processus de production de molybdène 99 se poursuit. En 2017, l'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires a achevé la construction de sa nouvelle installation de production. La société NTP Radioisotopes (Afrique du Sud) a annoncé la conversion intégrale de ses processus en vue de l'utilisation d'UFE. Deux autres grands producteurs, à savoir l'Institut des radioéléments en Belgique et Curium aux Pays-Bas (fusion d'IBA Molecular et de Mallinckrodt Nuclear Medicine LLC) continuent de faire des progrès dans le remplacement de l'UHE par de l'UFE dans leurs processus de production.

D. Alimentation et agriculture

D.1. Préparation des interventions d'urgence nucléaire dans l'alimentation et l'agriculture

D.1.1. Difficultés liées aux interventions d'urgence nucléaire

160. Identifier rapidement les zones de production alimentaire touchées et veiller à ce que les produits potentiellement contaminés n'arrivent pas jusqu'au consommateur font partie des difficultés à surmonter en cas d'urgence nucléaire. Toutefois, le traitement des données de contamination radioactive influe sur le temps de réponse et la précision de l'intervention. Dans les situations d'urgence nucléaire potentiellement de grande ampleur, plusieurs laboratoires de différentes institutions pourraient intervenir, en fournissant des informations de toutes sortes, souvent obtenues par des méthodes très variées. Une gestion efficace et efficiente du grand volume de données, souvent diverses, peut déterminer la qualité de l'intervention.

161. On y parvient par exemple en utilisant un système informatique solide d'aide à la décision qui recueille et centralise toutes les informations pertinentes et traite les données en temps réel.

D.1.2. Nouvelles avancées dans les systèmes d'aide à la décision pour la conduite d'intervention d'urgence

162. De nouvelles avancées concernant les outils informatiques et les algorithmes des systèmes d'aide à la décision améliorent la gestion en temps réel de grands volumes de données et l'appui intégré à la prise de décisions. Le recours aux technologies mobiles pour le recueil de données sur le terrain ou en laboratoire réduit le risque d'erreur humaine et permet d'accélérer le traitement des informations.

163. Le système informatique moderne d'aide à la décision fournit une aide visuelle claire pour améliorer les capacités d'intervention. Les exemples comprennent la possibilité de représenter graphiquement la phase de collecte des données (cartes indiquant le statut de la collecte ou de l'analyse des échantillons), la phase d'analyse/de validation (cartes montrant la concentration/le dépôt de particules radioactives) et la phase décisionnelle (tableau de bord montrant les points où on pourrait imposer des restrictions alimentaires). Des cartes de contamination alimentaire peuvent être immédiatement mises à disposition pour permettre à toutes les parties concernées de prendre des décisions en connaissance de cause. L'établissement de cartes dont la légende comporte des gammes de couleurs prédéfinies peut faciliter la communication des risques entre les parties prenantes et la population.

164. La possibilité d'évaluer visuellement les données en temps réel aide à mettre en balance les coûts et les avantages des scénarios d'intervention possibles. Les valeurs de seuil et les niveaux d'action, déterminés par chaque partie prenante au cours du processus de prévision des scénarios, tiennent compte des différents niveaux de risque dans les propositions de restrictions à imposer en ce qui concerne l'agriculture et le déplacement des aliments. Grâce à ces fonctions d'aide à la prise de décisions, les parties prenantes peuvent se concentrer plus sur les questions les plus importantes à résoudre, c'est-à-dire la sécurité sanitaire des aliments et la sécurité des consommateurs.

D.1.3. DSS4NAFA

165. Le DSS4NAFA est un système informatique d'aide à la décision basé sur le nuage, élaboré par la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture pour guider les interventions des États Membres de l'Agence et de la FAO en cas d'urgence nucléaire touchant l'alimentation et l'agriculture (figure D-1). Il optimise la collecte, la gestion et la visualisation des données grâce à des algorithmes ultramodernes. Le DSS4NAFA se distingue d'autres systèmes par ses caractéristiques spécifiques, à savoir le fait, d'une part qu'il utilise une technologie moderne comme les outils mobiles et les techniques avancées de visualisation géographique pour résoudre les problèmes logistiques rencontrés dans une situation d'urgence nucléaire, d'autre part qu'il contient un composant d'analyse des données convivial qui propose des mesures d'intervention. Il est construit de façon modulaire, et comprend plusieurs composants informatiques qui, tout en étant intégrés, peuvent être échangés séparément, ce qui rend le système très flexible et adaptable. La version bêta de cet outil sera disponible en 2018.



FIG. D-1. Utilisation de systèmes informatiques modernes pour optimiser les données et intervenir en cas d'urgence nucléaire touchant l'alimentation et l'agriculture. Aperçu général du fonctionnement du DSS4NAFA (Source : FAO/AIEA).

166. Le DSS4NAFA est un système innovant servant à évaluer et à interpréter des données relatives à la contamination radioactive dans l'alimentation et l'agriculture, ainsi qu'à renforcer les capacités d'intervention d'urgence des autorités chargées de la sécurité sanitaire des aliments. Il aide les décideurs à déterminer les points d'échantillonnage, ainsi qu'à répartir les tâches d'échantillonnage et

d'analyse en laboratoire. Le DSS4NAFA contient de puissants outils d'interprétation visuelle intégrant les données multidimensionnelles, de l'échelle locale à l'échelle internationale, qui sont recueillies et traitées au cours d'une urgence nucléaire.

167. Après réception de données sur la concentration de radionucléides, le tableau de bord relatif aux restrictions alimentaires regroupe les informations, y compris l'étendue spatiale et la résolution temporelle de l'accident, et suggère des restrictions sur les aliments et les cultures basées sur le niveau de risque et des niveaux de tolérance spécifiques. Le DSS4NAFA simplifie la gestion logistique de la collecte des données, prévoit des scénarios d'analyse des données et propose des mesures de restriction à l'intention des décideurs.

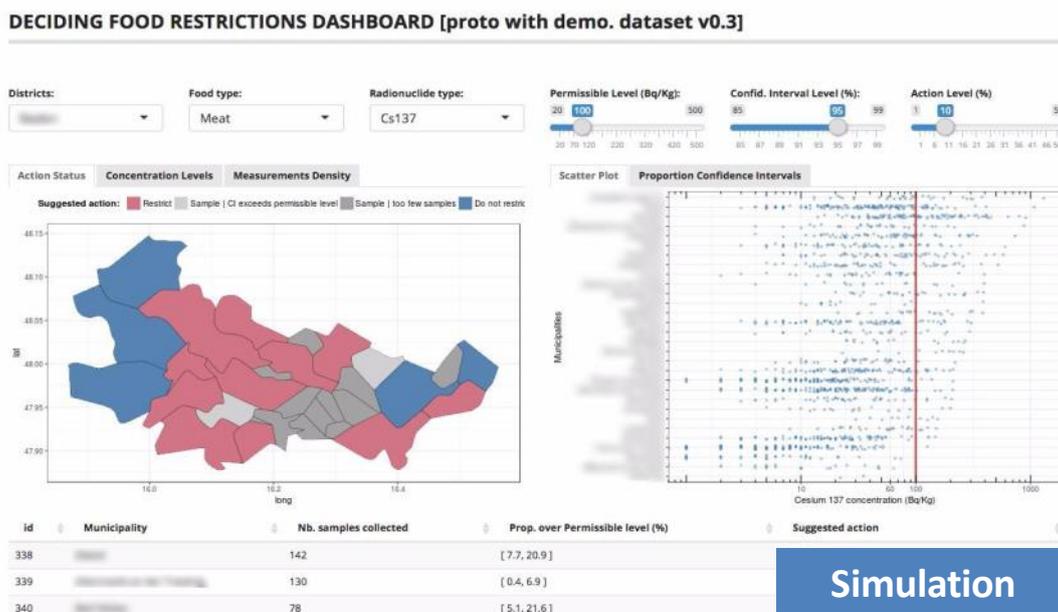


FIG. D-2. Le tableau de bord relatif aux restrictions, un module spécialisé du DSS4NAFA, aide les décideurs en proposant des mesures d'action sur la base des informations ayant trait aux concentrations de radionucléides et d'intervalles de confiance ajustables. Les parties prenantes ont trois possibilités : i) imposer des restrictions sur les produits alimentaires et les cultures, ii) ne pas imposer de telles restrictions, ou iii) développer l'échantillonnage.
(Source : FAO/AIEA)

168. Le DSS4NAFA peut traiter un important volume de données, sans risquer de surcharger l'utilisateur. Des exemples pratiques de son utilisation comprennent la visualisation des données de contamination dans l'espace et dans le temps, l'optimisation, à l'aide d'images graphiques interactives, de l'utilisation des appareils d'échantillonnage et des laboratoires d'analyse, et la détermination, au moyen du tableau de bord, des zones où des restrictions alimentaires sont nécessaires.

169. La plateforme du système est accessible sur place grâce à une application pour téléphones intelligents, ou depuis un bureau, via une interface, ce qui permet de rationaliser son utilisation ainsi que la communication. L'association de ces fonctionnalités rassemble toutes les parties prenantes au processus et renforce les capacités d'intervention d'urgence.

D.2. Recours à l'irradiation pour l'élaboration de nouveaux vaccins efficaces contre les maladies animales et les zoonoses

170. L'accroissement de la productivité du bétail aide des millions de familles dans le monde à augmenter leur revenu. La disponibilité et l'accessibilité de vaccins efficaces réduisent le poids des maladies et sont essentielles à l'élevage. La vaccination peut permettre de prévenir de nombreuses maladies transmises des animaux à l'homme et vice versa (zoonoses).

171. Elle réduit aussi le recours à la thérapeutique dans le domaine de l'élevage et contribue à réduire la charge antiparasitaire ainsi que la résistance aux antimicrobiens. Même si les progrès biotechnologiques réalisés au siècle dernier ont permis de mettre au point de nombreux nouveaux vaccins pour le bétail, plusieurs maladies infectieuses transfrontières dévastatrices continuent de nuire à l'élevage, en raison du manque de vaccins efficaces ou de la faible efficacité de ceux qui sont actuellement sur le marché.

172. L'une des meilleures façons de fabriquer un vaccin est d'utiliser des agents pathogènes entiers non infectieux pour induire une immunité. Les technologies des rayonnements sont appliquées de multiples manières rationnelles pour élaborer des vaccins (figure D-3). Une méthode consiste à soumettre les agents pathogènes tels que les virus à une forte dose d'irradiation aux rayons gamma (25–30 kGy) pour les inactiver complètement. Cette méthode est souhaitable dans les cas d'organismes hautement pathogènes, lorsque ceux-ci ne doivent pas être injectés vivants à l'hôte. Toutefois, l'inactivation par irradiation ne détruit pas les antigènes, contrairement aux méthodes chimiques, qui sont souvent employés pour la fabrication de vaccins.

173. Une autre solution consiste à utiliser une faible dose d'irradiation pour bloquer la réplication de l'organisme ou sa capacité morbide, pendant que celui-ci reste métaboliquement actif. Cela s'explique par la destruction partielle ou l'apparition de certaines mutations du matériel génétique. C'est pourquoi on dit que ces vaccins sont « métaboliquement actifs » et « à réplication défectueuse »⁷.

174. Une troisième méthode consiste à utiliser un agent pathogène irradié pour augmenter ou améliorer l'immunogénicité d'un autre micro-organisme apparenté ou non contenu dans le vaccin.

175. Les composés qui renforcent l'efficacité des vaccins sont appelés des adjuvants et sont souvent employés dans leur préparation. Les technologies des rayonnements peuvent aussi servir indirectement à accroître l'efficacité et la sûreté des vaccins. Par exemple, des vaccins existants peuvent être irradiés pour garantir qu'il n'y ait aucun organisme infectieux, contaminant, dans la formulation utilisée pour l'inoculation. On peut également irradier les adjuvants des vaccins pour modifier leur structure (polymérisation, par exemple) afin de renforcer l'effet immunologique ou protecteur.

176. Depuis les années 1950, les scientifiques ont essayé de fabriquer des vaccins en irradiant des pathogènes. Cependant, les techniques d'irradiation étaient traditionnellement employées pour surirradier les pathogènes et ainsi détruire les structures nucléique et protéique de ces candidats-vaccins. Notre compréhension récente de l'utilisation des technologies d'irradiation est fondée sur le fait qu'on a découvert que les irradiateurs modernes pouvaient générer efficacement des doses d'irradiation plus fortes et plus spécifiques. Parallèlement, notre connaissance du système immunitaire étant aujourd'hui plus étendue, nous disposons d'outils et de techniques plus sophistiquées pour évaluer les réponses immunitaires à la vaccination.

⁷ Magnani, D.M., Harms, J.S., Durward, M.A., Splitter G.A., Nondividing but metabolically active gamma-irradiate *Brucella melitensis* is protective against virulent *B. melitensis* challenge in mice, *Infect. Immun.* 77 11 (2009) 5181-5189.

177. Ajoutés aux avancées réalisées dans les études de génomique, ces développements ont favorisé la renaissance de la recherche sur les vaccins irradiés et l'élaboration de nouveaux vaccins efficaces. Par exemple, les nouveaux irradiateurs à faisceaux d'électrons peuvent générer une dose d'irradiation pouvant atteindre 30 kGy en quelques minutes, ce qui empêche l'accumulation de sous-produits indésirables tels que les radicaux libres, lesquels sont inévitables lorsque la durée de l'irradiation est plus longue.

178. Des composés radioprotecteurs découverts récemment aident aussi à protéger les structures responsables de l'antigénicité des vaccins. Parmi eux, le complexe décapeptide Mn²⁺ (MDP), un composé isolé des bactéries résistantes aux rayonnements, préserve les protéines immunogènes des virus et des bactéries exposés à de plus hautes doses de rayons gamma en séquestrant les radicaux libres produits durant l'irradiation⁸.

179. Les avancées technologiques et les méthodes créatives de fabrication de vaccins susmentionnées ont dépassé la phase de simples expériences de base. En médecine humaine, des sporozoïtes métaboliquement actifs et non répliatifs prélevés sur des moustiques irradiés ont été utilisés pour induire une immunité contre le paludisme. Un essai de validation convaincant et des normes de sûreté élevées sont nécessaires pour qu'un candidat-vaccin puisse être utilisé dans des essais cliniques effectués sur des êtres humains.

180. Le vaccin irradié contre le paludisme a non seulement atteint le stade des essais cliniques, mais il s'est aussi avéré hautement efficace contre des infections ultérieures⁹. L'irradiation a également été utilisée pour l'inactivation complète du virus VIH-1, dont la sûreté a été démontrée dans le cadre d'un essai clinique sur des êtres humains et qui a stimulé la production d'anticorps anti-VIH.

181. En s'appuyant sur ces progrès et les nouvelles connaissances en matière d'utilisation sélective et contrôlée de l'irradiation, de nombreux établissements publics et privés ont redoublé d'efforts pour élaborer des « radio-vaccins ». Les études menées par des scientifiques du Fraunhofer Institute for Cell Therapy and Immunology (IZI) en Allemagne ont montré que l'irradiation d'électrons de basse énergie permettait de conserver les propriétés antigéniques des virus tels que l'herpès équin et le syndrome reproducteur et respiratoire porcin, et même les réponses immunitaires de protection contre la grippe¹⁰.

182. Des recherches effectuées à l'université du Wisconsin (Madison) et à l'université Purdue aux États-Unis ont montré que la vaccination de souris au moyen de bactéries *Brucella* irradiées et métaboliquement actives les empêchait de tomber malade lorsqu'elles étaient exposées à une infection d'épreuve. La brucellose, une maladie animale contagieuse débilitante ayant un impact économique important, est aussi une zoonose. Il existe seulement quelques exemples d'expériences couronnées de succès en ce qui concerne l'élaboration de vaccins irradiés contre des maladies animales. D'autres travaux en cours sur l'élaboration de tels vaccins contre des maladies animales transfrontières concernent notamment la fièvre aphteuse et la septicémie hémorragique.

183. L'AIEA a lancé une nouvelle série de projets de recherche dans ce domaine, en créant un projet de recherche coordonnée réunissant six contreparties (Bangladesh, Égypte, Éthiopie, République

⁸ Gayen, M., et al., Deinococcus Mn²⁺-peptide complex: A novel approach to alphavirus vaccine development, *Vaccine*. 35 29 (2017) 3672-3681.

⁹ Sissoko, M.S., et al., Safety and efficacy of PfSPZ Vaccine against *Plasmodium falciparum* via direct venous inoculation in healthy malaria-exposed adults in Mali: a randomised, double-blind phase 1 trial, *Lancet Infect. Dis.* 17 5 (2017) 498-509.

¹⁰ Fertey, J., et al., Pathogens inactivated by low-energy-electron irradiation maintain antigenic properties and induce protective immune responses, *Viruses* 8 11 (2016) E319.

islamique d'Iran, Sri Lanka et Soudan) dans le but d'examiner de nouvelles méthodes pour la production expérimentale de vaccins irradiés (figure D-4).

184. Des scientifiques de ces pays étudient divers agents pathogènes animaux ou zoonotiques et ont élaboré des concepts éprouvés de doses d'irradiation différentielle en vue de l'élaboration de candidats-vaccins. Des expériences sont en cours en vue de déterminer si ceux-ci pourraient protéger un animal exposé à l'agent pathogène infectieux. La première avancée rapportée a trait à un prototype de vaccin irradié contre *Haemonchus contortus*, un parasite gastro-intestinal des ruminants. Les animaux mis à l'épreuve étaient protégés à 100% après deux doses orales de larves irradiées de ce parasite.

185. L'AIEA est en train de mener des expériences visant à mettre au point des prototypes de vaccins irradiés contre deux virus du porc affectant gravement l'élevage de porc, à savoir la grippe porcine et le syndrome reproducteur et respiratoire porcine. En outre, elle élabore et fournit actuellement des outils qui mesurent les réponses immunitaires induites par un vaccin à base d'organismes irradiés. Des techniques sont en train d'être élaborées pour mesurer l'immunité à médiation cellulaire, un domaine de l'immunologie animale peu développé mais important dans l'étude des maladies virales.

186. En outre, l'Agence élabore actuellement un répertoire d'anticorps monoclonaux reconnaissant les marqueurs immunitaires bovins, qui sera distribué aux laboratoires des États Membres. En ce qui concerne des agents pathogènes spécifiques, des scientifiques ont récemment découvert des « points chauds » du génome des trypanosomes touchés par les faibles doses d'irradiation. Cette découverte permettra d'élaborer des médicaments et des vaccins contre un parasite qui a des effets importants sur la production animale dans les pays en développement.

187. La technique d'irradiation différentielle étant à présent un concept éprouvé et reconnu, les chercheurs se concentrent désormais sur le développement des processus et l'augmentation de la production de vaccins. Sanaria, une société de biotechnologie qui fait des expériences sur les vaccins antipaludiques irradiés, explore l'utilité des robots dans la production de vaccins, tandis que l'Institut Fraunhofer en Allemagne essaie d'élaborer une procédure technique automatisée innovante permettant de pratiquer l'irradiation par faisceaux d'électrons à l'échelle industrielle pour la production de vaccins. Certains participants au projet de recherche coordonnée ont pris des initiatives visant à élaborer un vaccin irradié sous forme sèche en vue la thermostabilité, ce qui pourrait permettre de le livrer dans les régions reculées sans maintenir la chaîne du froid.

188. Bien que de nombreux faits marquants ayant trait aux technologies des vaccins irradiés ne soient qu'à l'étape de la recherche, les découvertes actuelles témoignent clairement du potentiel de l'application de ces technologies à l'élaboration de vaccins efficaces contre de nombreux virus, bactéries et parasites pathogènes. L'investissement dans ces technologies permettra de lutter contre de nombreuses maladies et pourrait avoir des effets majeurs sur l'économie et la santé dans les pays en développement.

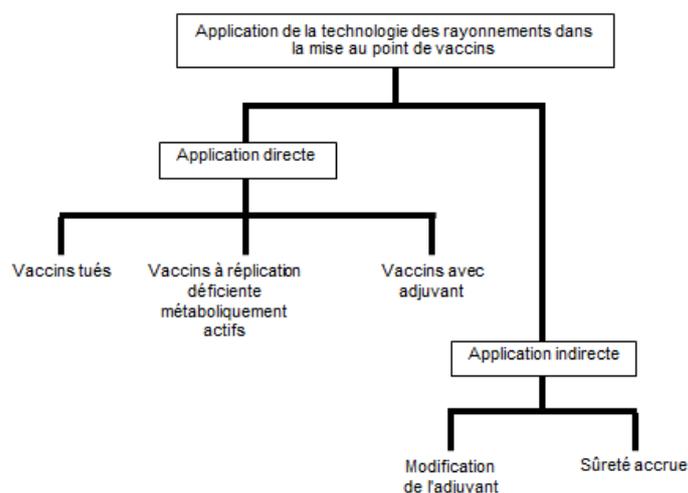


FIG. D-3. Les technologies des rayonnements peuvent servir à élaborer de nouveaux vaccins et à améliorer l'efficacité et la sûreté de ceux existants (Source : AIEA/FAO).



FIG. D-4. Une scientifique élabore un vaccin irradié en République islamique d'Iran (à gauche) et une chercheuse prélève du sang sur un ovin au Soudan (à droite) pour évaluer l'efficacité d'un vaccin. (Photos : Farahnaz Motamedi-Sedeh, Institut de recherche en sciences et technologies nucléaires, République islamique d'Iran, et Mihad Alawad, Laboratoire central de recherche vétérinaire, Soudan)

D.3. Recours aux empreintes multi-isotopiques pour déterminer les sources de contaminants agricoles passant des sols aux plans d'eau

189. L'AIEA s'emploie actuellement à élaborer des protocoles et des lignes directrices pour retracer les sources de polluants agricoles, ainsi que des pratiques innovantes de gestion des sols et de l'eau visant à réduire les polluants agricoles dans l'environnement.

190. La pollution des cours d'eau par l'agriculture a des effets directs néfastes sur la santé humaine, la biodiversité et la pêche. L'expansion et l'intensification des systèmes agricoles sous l'effet de la demande toujours croissante d'aliments mènent souvent à une surexploitation et à une utilisation abusive des produits agrochimiques tels que les pesticides et les engrais organiques et inorganiques. À

l'échelle mondiale, le développement de la production végétale est principalement attribuable à une utilisation intensive des produits agrochimiques et des systèmes d'irrigation, entraînant le transfert des polluants agricoles des sols aux plans d'eau. Dans la plupart des pays à revenu élevé et de nombreux pays émergents, la pollution d'origine agricole dépasse déjà celle des ménages et du secteur industriel comme cause majeure de dégradation des eaux intérieures et côtières. Au sein de l'Union européenne, 38 % des plans d'eau sont fortement menacés par la pollution agricole¹¹ (figure D-5). Aux États-Unis, l'agriculture est la première source de pollution des cours d'eau, la deuxième source pour les zones humides et la troisième pour les lacs¹².

191. La détermination et la répartition des sources constituent les principales lacunes des connaissances ayant trait à la pollution des agroécosystèmes, un domaine qui nécessite davantage de données et de recherches ainsi qu'une meilleure intégration des méthodes. La détermination et la répartition de ces contributions sont essentielles pour que les agences et autorités nationales puissent élaborer des politiques et des pratiques de gestion appropriées et cibler leurs interventions. Lorsque la pollution d'un agroécosystème provient de sources multiples, les techniques conventionnelles, comme la quantification de l'élément polluant et les bilans de masse, ne sont pas assez efficaces pour mesurer la contribution relative des différentes sources. Il convient donc de recourir à des méthodes complémentaires pour combler ces lacunes. Venant compléter les techniques conventionnelles, les isotopes stables des principaux éléments chimiques sont essentiels pour caractériser et quantifier les sources et le transport des solutés à travers le sol et les plans d'eau dans les agroécosystèmes.

192. Des isotopes stables des éléments chimiques comme l'azote, le carbone, l'oxygène, le soufre et l'hydrogène ont été utilisés avec succès pour tracer et surveiller les sources et le transport des solutés et de l'eau dans les agroécosystèmes¹³. Les études ont montré que la signature isotopique de chaque élément, qui est unique en fonction de l'origine de la source de pollution, peut donc être utilisée pour caractériser la source. Afin de retracer et de surveiller les sources de phosphore, un engrais important pour accroître la productivité des cultures, allant des sols aux plans d'eau, on analyse la signature isotopique de l'oxygène 18 dans le phosphate inorganique ($\delta^{18}\text{O-PO}_4$). L'application de l'analyse isotopique de composés spécifiques aux micro-polluants repose sur la capacité à surveiller les changements dans la composition des isotopes stables entre la source et l'exutoire, et donc à quantifier l'étendue de la transformation chimique ou biochimique dans les agroécosystèmes^{14,15,16}. Les multiples sources de pollution de ce type d'écosystème peuvent avoir plusieurs signatures isotopiques, ce qui rend leur recensement et leur répartition difficiles, voire impossibles, à l'aide un seul traceur isotopique.

¹¹ WWAP (Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau) (2015). Rapport mondial 2015 de l'ONU sur la mise en valeur des ressources en eau : L'eau pour un monde durable. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

¹² Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) (2016). Évaluation de la qualité de l'eau et informations relatives à la charge totale maximum quotidienne. https://ofmpub.epa.gov/waters10/attains_index.home.

¹³ Skrzypek G., Mydłowski A., Dogramaci S., Hedley P., Gibson J.J., Grierson P.F. (2015). Estimation of evaporative loss based on the stable isotope composition of water using Hydrocalculator. *Journal of Hydrology* 523: 781-789. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.010>.

¹⁴ Tamburini F., Pfahler, V., von Sperber, C., Frossard E., Bernasconi, S.M. (2014). Oxygen isotopes for unravelling phosphorous transformations in the soil-plant systems: a review. *Soil Science Society of America Journal* 78: 38-46.

¹⁵ Granger, S.J., Harris, P., Peukert, S., Gou, R., Tamburini, F., Blackwell, M.S.A., Howden, J.K., McGrath, S. (2017). Phosphate stable oxygen isotope variability within a temperate agricultural soil. *Geoderma* 285: 64-75.

¹⁶ Elsner M., Imfeld, G. (2016). Compound-specific isotope analysis (CSIA) of micro pollutants in the environment - current developments and future challenges. *Curr. Opin. Biotechnol.* 41:60-72.

193. La caractérisation complète des multiples sources potentielles des macronutriments et des micropolluants des agroécosystèmes complexes nécessite une approche intégrée à plusieurs traceurs. Les signatures des isotopes stables du carbone, de l'oxygène, de l'azote et du soufre présents dans les solutés caractérisent la part des diverses sources, tandis que celles des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène présents dans les molécules d'eau caractérisent le cycle hydrologique (sources d'eau et pertes par évaporation). L'approche intégrée de l'analyse des solutés et de l'eau permet de séparer les voies de dispersion des polluants et d'écoulement de l'eau. L'avantage des techniques d'isotopes stables est qu'elles offrent une solution analytique de substitution bon marché par rapport à la surveillance à grande échelle habituellement laborieuse et longue, qui nécessite des infrastructures bien établies. La Division mixte FAO/AIEA a par conséquent lancé un projet de recherche coordonnée visant à élaborer et à valider des lignes directrices sur l'utilisation de plusieurs isotopes stables comme traceurs pour surveiller les polluants d'origine agricole dans les sols, l'eau et les nutriments, à l'échelle d'un champ comme d'un paysage.

194. Intégrée aux techniques conventionnelles, cette approche devrait faciliter l'adoption de mesures de remédiation appropriées dans les États Membres et permettre des pratiques de gestion des terres améliorées et plus durables.



FIG. D-5. À gauche : Diagramme schématisé de polluants agricoles dans un agroécosystème. (Photo : Gwenaël Imfeld, CNRS, France). À droite : Qualité de l'eau du delta du Danube contaminée par les polluants (Photo : AIEA-FAO).

E. Santé humaine

E.1. La radiothérapie stéréotaxique : une technique radiothérapique de haute précision

195. La radiochirurgie stéréotaxique (RCS) est une technique d'irradiation non chirurgicale avancée qui consiste à diriger des rayonnements ciblés précisément sur une tumeur et certaines zones d'anomalies fonctionnelles du cerveau. La radiothérapie stéréotaxique corps entier (RSCE), parfois appelée radiothérapie stéréotaxique d'ablation, est une extension de la même technique, qui permet d'exposer des zones extracrâniennes à des rayonnements.

196. En RCS comme en RSCE, la dose entière est administrée en une à cinq séances, alors qu'en radiothérapie classique, elle est administrée en petites fractions quotidiennes, étalées sur plusieurs

semaines. Ces deux techniques constituent d'importantes solutions de remplacement à la chirurgie invasive, notamment pour les patients qui ne peuvent pas subir d'intervention chirurgicale ou dont les tumeurs et les anomalies sont difficiles à atteindre ou proches d'organes vitaux. Elles ne requièrent pas d'incision, entraînent un inconfort minime, la période de rétablissement est plus courte et les risques généralement liés à la chirurgie, comme des infections, sont réduits.

197. Le recours à la RCS ou à la RSCE nécessite des compétences en ce qui concerne le site de l'affection et le matériel requis. Les procédures de RCS et de RSCE devraient donc être conçues spécifiquement en fonction du site et du matériel utilisé.

E.1.1. Prescriptions techniques

198. Il faut disposer d'effectifs suffisants pour garantir la sûreté et la qualité d'un programme de RCS ou de RSCE. La marge d'erreur de ces techniques est inférieure à celle de la radiothérapie classique, car les doses utilisées par fraction sont plus élevées et le nombre de fractions est plus faible. La machine employée pour administrer un tel traitement doit donc satisfaire aux prescriptions techniques les plus strictes, y compris en ce qui concerne la tolérance et à la mise en service mécaniques. Avant de démarrer le traitement lui-même, le processus est entièrement testé de bout en bout sur un fantôme. La RCS et la RSCE comprennent généralement les étapes suivantes : imagerie, immobilisation et planification et administration du traitement (voir descriptions ci-dessous).

Imagerie tridimensionnelle et localisation quadridimensionnelle de la tumeur

199. L'imagerie de haute résolution définit l'emplacement, la taille et la forme de la tumeur, aide à déterminer les coordonnées exactes de la cible (la tumeur) dans l'organisme et guide la planification du traitement. La tomographie à émission de positons (PET)/CT, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la tomographie à émission de positons (PET)/CT sont utilisées à cette fin. En règle générale, la tomographie à émission de positons, qui est la technique d'imagerie de référence, fournit des informations précises sur la densité électronique et n'entraîne habituellement qu'une très faible distorsion spatiale. Pour de nombreuses cibles de RSCE, comme les poumons et l'abdomen, la PET-CT et, en cas de lésions cérébrales ou hépatiques, l'IRM sont les outils d'imagerie préférés, car elles permettent de mieux distinguer les tissus sains et les tissus anormaux que la tomographie.

Immobilisation, positionnement et maintien de la position du patient

200. Durant l'imagerie et le traitement, la position de la tumeur peut changer en raison de la respiration ou des mouvements du corps, tout comme la forme et la taille de la tumeur aussi peuvent changer. Étant donné que ce type de traitement doit être exécuté avec une précision mathématique, des appareils d'immobilisation adaptés sont nécessaires pour immobiliser le patient et ainsi limiter au minimum le mouvement de la cible durant le traitement. Il existe de nombreuses méthodes pour évaluer, gérer et surveiller les mouvements respiratoires pendant une RSCE : scanners lents, tomographie quadridimensionnelle, compression abdominale, synchronisation ou encore techniques de blocage de la respiration. La tomographie quadridimensionnelle permet de reconstruire un volume cible interne tenant compte de la position de la tumeur à tous les stades du cycle respiratoire. Il est aussi possible de suivre une cible dynamique en temps réel.

Faisceaux de rayons gamma ou de rayons X fortement concentrés

201. La RCS et la RSCE peuvent être réalisées à l'aide d'un accélérateur linéaire, un scalpel gamma ou un accélérateur de particules chargées. Les accélérateurs linéaires permettent de traiter de plus grandes tumeurs en une (RCS) ou plusieurs séances (radiochirurgie stéréotaxique).

202. Inventé en 1951 en Suède par le neurochirurgien Lars Leksell, le scalpel gamma a été le premier outil utilisé pour la RCS. Il contient des sources de cobalt multiples qui créent des faisceaux de rayons gamma fortement concentrés, tous orientés vers la zone ciblée. C'est l'outil idéal pour traiter les

lésions intracrâniennes de petite ou moyenne taille, généralement de moins de 4 cm, en évitant d'exposer certaines structures telles que l'appareil optique et le tronc cérébral à de fortes doses.

203. Le principal avantage de la RCS par protons à particules lourdes chargées est que les faisceaux s'arrêtent à une certaine profondeur en fonction de leur énergie. L'absence de dose à la sortie et la précision du profil des faisceaux des protons permettent une irradiation ciblée, avec une dose intégrale plus faible que celle administrée par rayonnement photonique. Cette forme de traitement est toutefois onéreuse.

E.1.2. Personnel requis

204. La RCS et la RSCE nécessitent une équipe de professionnels multidisciplinaires hautement qualifiés, y compris des radio-oncologues, des physiciens médicaux, des techniciens en radiothérapie, des radiologues, des neurochirurgiens et des neurophysiciens. L'équipe de traitement est dirigée par des radio-oncologues qui partagent parfois ce rôle avec des neurochirurgiens.

205. Le radio-oncologue définit la cible à traiter et les tissus sains, prescrit la bonne dose de rayonnements, approuve le plan de traitement et interprète les résultats des procédures de radiochirurgie. Le physicien médical veille à administrer la dose précise de rayonnements et, grâce à un système informatisé de planification du traitement, établit un plan de traitement et détermine le temps d'exposition ainsi que la configuration des faisceaux en vue de traiter la (les) cible(s) à la dose prescrite. Le technicien en radiothérapie positionne le patient sur la table de traitement et actionne l'appareil.

E.1.3. Indications

206. De nombreux troubles cérébraux bénins, malins et fonctionnels sont traités par RCS. La RSCE est utilisée dans diverses indications : cancer du poumon au stade précoce chez des patients médicalement inopérables ou qui refusent la chirurgie ; métastases pulmonaires ; cancer primitif du foie ; métastases hépatiques ; cancer limité à la prostate ; cancer du pancréas ; métastases surrénales ; cancer primitif du rein chez des patients médicalement inopérables ; certaines métastases ganglionnaires intrathoraciques et intra-abdominales ; cancers cervico-faciaux récidivants et primaires ; tumeurs de la moelle épinière et métastases osseuses.

207. Après le traitement, les tumeurs bénignes diminuent de volume en 18 mois à 2 ans, tandis que les tumeurs malignes et métastatiques diminuent de volume plus rapidement. De nombreuses tumeurs restent stables et inactives, sans évoluer, et peuvent, avec le temps, soit se stabiliser, soit régresser. Étant donné que la RCS et la RSCE sont des méthodes non invasives et généralement utilisées en ambulatoire (un jour à une semaine), elles peuvent non seulement faire économiser des ressources hospitalières, mais aussi permettre aux patients de reprendre plus vite leurs activités quotidiennes. Les effets secondaires du traitement dépendent du siège de la tumeur et de la dose administrée. Heureusement, les effets secondaires de la RCS et de la RSCE devraient rester dans des limites acceptables.

E.1.4. Contributions de l'Agence

208. L'Agence a lancé en 2014, dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée, une étude aléatoire sur la RSCE et la chimioembolisation intra-artérielle du carcinome hépatocellulaire, à laquelle participent onze centres de cancérologie de la région Asie-Pacifique, d'Afrique et d'Europe. En outre, elle appuie un projet régional d'application clinique de la RSCE et aide les États Membres à démarrer ou à moderniser des services de RSCE. De nombreux radio-oncologues, physiciens médicaux et radiothérapeutes des pays participants ont été formés à divers aspects de la RSCE, y compris l'assurance et le contrôle de la qualité.

209. La RCS et la RSCE sont des méthodes largement acceptées et de plus en plus utilisées. Les résultats d'études cliniques rigoureusement menées ont démontré leur rôle dans diverses situations cliniques. Par ailleurs, elles sont évaluées dans le cadre de nombreux essais cliniques, soit individuellement soit conjointement avec des agents spécifiques ou l'immunothérapie, pour de nombreux cancers primaires et secondaires. Des données précliniques montrent que l'immunothérapie peut intensifier la réaction de la tumeur locale induite par les rayonnements et, de même, qu'une dose élevée de rayonnements peut accroître les effets systémiques de l'immunothérapie, ce qui fait de la RCS et la RSCE des méthodes idéales à utiliser en association avec l'immunothérapie. La RCS et la RSCE pourraient être plus économiques que la radiothérapie classique dans de nombreuses situations cliniques.

E.2. Neuropsychiatrie : la révolution de l'imagerie moléculaire dans la maladie d'Alzheimer

E.2.1. Contexte

210. La démence est une maladie neurodégénérative progressive, en grande partie irréversible, caractérisée par des troubles des fonctions mentales, et nuit à la mémoire, au raisonnement, au comportement et à la capacité d'accomplir les activités de la vie quotidienne. Les deux tiers des quelque 47 millions de personnes qui en souffrent dans le monde vivent dans des pays en développement.

211. Ses symptômes cliniques caractéristiques peuvent être difficiles à diagnostiquer aux premiers stades de la maladie. Toutefois, les techniques nucléaires peuvent aider à déterminer le processus à l'origine de la maladie, plusieurs années avant l'apparition de symptômes.

212. On distingue de nombreux types de démence, mais la maladie d'Alzheimer reste la plus fréquente, avec environ 60 à 70 % des cas dans le monde. Les autres types courants sont notamment la démence vasculaire ou à infarctus multiples (environ 25 % des cas), la démence à corps de Lewy (15 % des cas) et la démence frontotemporale. La démence peut aussi être causée par des maladies telles que le parkinson, la syphilis et la maladie de Creutzfeldt–Jakob. Un patient peut souffrir de plusieurs formes de démence.

213. Les maladies comme l'alzheimer, la maladie la plus redoutée après le cancer, représentent un lourd fardeau dans le monde entier et ont un impact médical et socioéconomique considérable. La démence est l'une des principales causes d'invalidité et de dépendance chez les personnes âgées dans le monde.

214. Il n'existe aucun remède connu à cette maladie, mais diverses approches spécifiques peuvent aider à prendre en charge les symptômes, planifier les soins et conseiller les soignants et les membres de la famille, selon la cause de la maladie. En outre, certains médicaments peuvent s'avérer bénéfiques aux premiers stades de la maladie et retarder son évolution, tandis que d'autres mesures peuvent améliorer la qualité de vie des personnes atteintes de démence et de leurs aidants. Auparavant, il faut un diagnostic différentiel plus précis pour améliorer les soins aux patients.

215. La démence est habituellement diagnostiquée en examinant les antécédents médicaux et les résultats de tests cognitifs conçus pour montrer une activité intellectuelle consciente, telle que la pensée, le raisonnement ou la mémoire. La détection de troubles cognitifs éventuels constitue la première étape pour déterminer si le patient doit subir d'autres examens.

E.2.2. Diagnostic

216. La médecine nucléaire, aussi appelée imagerie moléculaire, s'est considérablement développée au cours des dernières décennies. Depuis les années 1990, la tomographie à émission de positons (PET), qui est une technologie d'imagerie cérébrale utilisant des radiopharmaceutiques au fluorodésoxyglucose (FDG), et la tomographie d'émission monophotonique (SPECT) en perfusion cérébrale sont des outils essentiels au diagnostic clinique de divers troubles cérébraux, tels que la maladie d'Alzheimer et d'autres formes de démence.

217. L'imagerie moléculaire est utile dans les cas complexes de démence et, lorsque d'autres pathologies coexistent avec celle-ci, il est difficile de déterminer au premier abord à quelle maladie est lié un symptôme observé. Un accident vasculaire cérébral est une comorbidité fréquente qui peut perturber les fonctions cérébrales, et dont certains symptômes ressemblent à ceux de la démence neurodégénérative. L'imagerie moléculaire permet aux médecins de distinguer ces maladies.

218. La tomographie à émission de positons (PET) est une technique bien établie de diagnostic des troubles neurodégénératifs, notamment la démence. L'utilisation de FDG permet d'examiner le métabolisme cérébral du glucose et donc d'établir un diagnostic précoce approprié et un diagnostic différentiel, de déceler très tôt la démence progressive, de surveiller la progression de la maladie et d'évaluer la réaction aux traitements médicamenteux.

219. Les traceurs offrent aussi de nouvelles perspectives pour l'étude des neuropathologies de la démence sous-jacente, telles que l'accumulation de protéines amyloïdes ou de protéines Tau et la présence d'inflammations ou de troubles vasculaires. L'imagerie par PET réalisée avec différents traceurs fournit des biomarqueurs fiables de la démence, ce qui peut aider à diagnostiquer divers troubles cognitifs, notamment en présence de plusieurs maladies.

220. Récemment, des établissements de soins de nombreux pays ont commencé à offrir un service d'imagerie amyloïde par PET. Celle-ci permet la détection précise *in vivo* des plaques amyloïdes, qui constituent l'un des principaux processus pathologiques de la maladie d'Alzheimer. Ce type d'examen, très spécifique pour l'observation des dépôts de protéines anormales dans le cerveau, peut servir à améliorer les recommandations en matière de diagnostic et de traitement. Des essais sont actuellement réalisés dans plusieurs centres pour évaluer sa valeur clinique.

221. D'autres nouvelles techniques d'imagerie par PET visent à évaluer la protéine Tau et les inflammations. La protéine Tau est une protéine liée à un microtubule qui est essentielle à la stabilité et au fonctionnement des neurones. Sa phosphorylation excessive et son agrégation anormale interviennent dans diverses maladies neurodégénératives, connues sous le nom de « tauopathies », dont la plus connue est la maladie d'Alzheimer.

222. Ces techniques aident non seulement à soigner les patients au quotidien, mais permettent aussi d'obtenir des connaissances essentielles du processus de la maladie qui favoriseront les progrès thérapeutiques.

E.2.3. Initiatives mondiales et sensibilisation

223. On dénombre plusieurs initiatives mondiales concernant le problème de la démence. Certaines des plus importantes concernent : la détermination de cette maladie comme priorité mondiale, l'évolution rapide de la neuro-imagerie et la recherche médicale de nouveaux traitements de remplacement. En outre, certaines organisations ont même mis la démence dans leurs programmes de travail, comme le G7 avec son Action mondiale contre la démence, l'OMS avec sa Conférence ministérielle sur l'action mondiale contre la démence et, plus récemment, la Fondation Bill et Melinda Gates.

224. L'Agence participe à des projets et des activités visant à sensibiliser à l'importance de la démence et d'autres maladies neurologiques. Ces activités comprennent des projets de recherche coordonnée, des cours régionaux et des ateliers nationaux portant sur l'importance des techniques de médecine nucléaire pour l'imagerie des maladies cérébrovasculaires et neurologiques telles que la démence. L'Agence a mis en place un groupe dans le domaine de la neuro-imagerie (IAEA Neuroimaging Consortium) pour étudier la valeur de la neuro-imagerie avec des techniques modernes telles que la PET-CT en vue de diagnostiquer correctement tout trouble cognitif léger et de déterminer si la présence de comorbidités comme les infections au VIH, les maladies cérébrovasculaires et les traumatismes crâniens conduit à des diagnostics moins précis qu'en l'absence de ces comorbidités. Les preuves scientifiques sont actuellement limitées pour ce groupe de patients et tout nouvel élément d'information sera donc apprécié par les États Membres. Les ateliers du programme de l'AIEA en faveur des spécialistes de médecine nucléaire, organisés à la Faculté de médecine de l'Université d'Osaka (Japon), ont porté sur l'importance des techniques de médecine nucléaire pour l'imagerie des maladies cérébrovasculaires et neurologiques telles que les tumeurs cérébrales, l'épilepsie et la démence. Des ateliers sur la neuro-imagerie visant à améliorer les compétences de médecins spécialistes de médecine nucléaire concernant l'interprétation des études de neurologie nucléaire, y compris la démence, ont également eu lieu en Argentine, au Brésil, aux Philippines, en Slovénie et en Thaïlande.

225. En appui à la formation médicale continue, une section du site web Human Health Campus de l'AIEA sur la neuro-imagerie propose des études de cas, des exposés, des recommandations d'ouvrages et de lignes directrices, un guide sur l'établissement de rapports d'imagerie médicale ainsi que le matériel didactique utilisé dans les cours organisés par l'Agence.

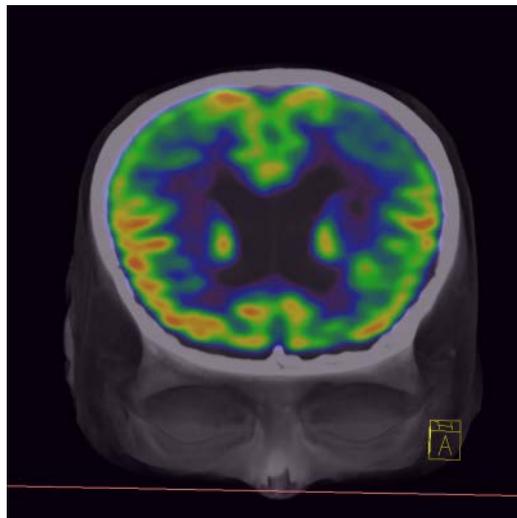


FIG. E-1. Reconstruction volumétrique d'un examen par PET/CT sur une femme diabétique de 65 ans atteinte de la maladie d'Alzheimer. L'examen de médecine nucléaire a été réalisé au ^{18}F -FDG afin de déterminer le type de démence et l'étendue de la maladie (Photos : Dr Ivan Diaz, Institut national de neurologie et de neurochirurgie, Mexique).

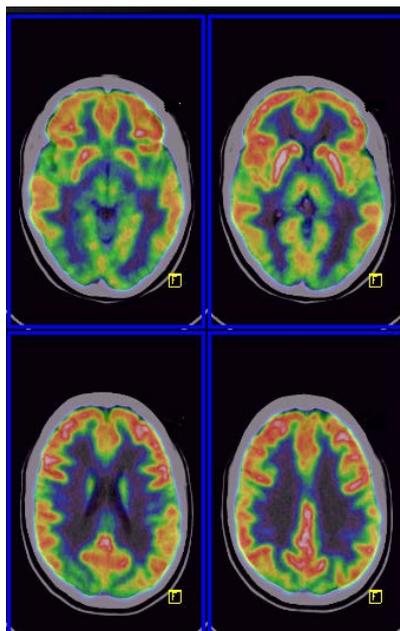


FIG. E-2. Patient âgé de 75 ans ayant des antécédents d'hypertension artérielle et présentant des signes cliniques de démence. L'examen de médecine nucléaire a été réalisé au ^{18}F -FDG afin de déterminer le type de démence et l'étendue de la maladie et confirme les changements liés à la maladie d'Alzheimer (Photos : Dr Ivan Diaz, Institut national de neurologie et de neurochirurgie, Mexique).

F. Environnement

F.1. Techniques nucléaires dans la recherche sur les plastiques marins

226. Les océans couvrent plus de 70 pour cent de la surface de la Terre et contribuent incontestablement à faire de la planète un environnement hospitalier et à atténuer certains des effets négatifs des changements climatiques. S'ils sont bien gérés, ils peuvent aussi jouer un rôle important dans la fourniture d'emplois et de moyens de subsistance à des pans entiers de la population mondiale. Malheureusement, c'est aussi dans les océans que finit une bonne partie de la pollution terrestre, y compris divers rejets agricoles, municipaux et industriels de contaminants organiques et inorganiques. En conséquence de ces activités, on trouve aujourd'hui des fragments de plastique de toutes tailles partout dans les océans, où les animaux marins, tels que les organismes benthiques, le zooplancton, les mollusques, les poissons, les oiseaux marins et les baleines, peuvent ingérer les particules de plus petite taille. Si l'on en sait plus sur l'impact très médiatisé et visible des macro-plastiques sur les organismes marins, les dégâts potentiels causés par les micro-plastiques, habituellement définis comme des particules de moins de 5 mm de diamètre^{17,18}, sont, eux, beaucoup moins clairs (figure F-1).

¹⁷ Andrady, A.L., Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* **62**, 1596–1605. Cette publication est citée plusieurs fois dans la partie F.

¹⁸ United Nations Environment Programme, *Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. UNEP, Nairobi (2016). Cette publication est citée plusieurs fois dans la partie F.



FIG. F-1. Des débris de plastique, y compris des micro-plastiques, sont aujourd'hui présents partout dans les océans et peuvent être ingérés et bioaccumulés par divers organismes marins, et ainsi constituer un risque pour la santé humaine (Photo : J.L. Teyssie/AIEA).

227. Afin d'aider à étayer et à élaborer des stratégies et des outils d'atténuation améliorés, l'Agence utilise des techniques nucléaires et isotopiques pour évaluer l'impact d'agresseurs environnementaux courants ou d'apparition récente, y compris les effets des plastiques sur les organismes marins. De telles techniques sont en train d'être mises au point pour quantifier les mouvements des micro-plastiques marins et des contaminants organiques qui leur sont associés dans les écosystèmes côtiers et marins et leurs réseaux alimentaires interdépendants. Certains contaminants organiques présents dans l'eau de mer se retrouvent piégés sur les surfaces en plastique ; ces micro-plastiques et les contaminants qui leur sont associés font peser des menaces supplémentaires sur les organismes marins¹⁹. Les techniques nucléaires permettent d'étudier la « cinétique de la sorption », c'est-à-dire la façon dont les polluants organiques s'attachent à des micro-plastiques hôtes, ainsi que les processus et les taux de dégradation des contaminants. Utilisées dans des aquariums expérimentaux contrôlés, ces méthodes permettent d'obtenir des données quantitatives qui peuvent offrir une perspective unique sur les impacts biologiques des micro-plastiques marins.

228. Les plastiques marins sont des polymères organiques synthétiques dont la production est généralement peu coûteuse et qui sont conçus pour être très durables. Tous les plastiques finissent par devenir fragiles et se décomposer en plus petits fragments qui peuvent se dégrader davantage lorsqu'ils sont exposés durablement à un rayonnement ultraviolet. Les polymères les plus abondants dans l'océan sont le polyéthylène à haute densité et à faible densité, le polychlorure de vinyle, le polystyrène, le polypropylène et le téréphtalate de polyéthylène. Ensemble, ils représentent plus de 95 % de la production mondiale de plastiques²⁰. Étant donné qu'ils sont spécialement conçus pour résister à la corrosion, la plupart de ces plastiques sont considérés comme difficiles à dégrader et persistent dans l'environnement marin pendant 100 ans ou plus.

229. On trouve des particules de micro-plastiques dans de nombreux organismes marins, y compris des espèces dont nous sommes tributaires et qui entrent dans notre régime alimentaire ordinaire, par exemple de nombreux mollusques et poissons. En raison de leur petite taille, ces particules de plastique peuvent se déposer dans certains organes internes, où elles peuvent devenir des vecteurs

¹⁹ Law, K.L., Thompson, R.C., Microplastics in the seas. Science 345, 144-145. Il est fait référence à cette publication plusieurs fois dans la partie F.

²⁰ Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin 62, 2588-2597.

efficaces pour le transfert chimique de contaminants²¹. Aux effets néfastes de la simple ingestion de micro-plastiques, peuvent s'ajouter des effets toxiques secondaires lorsque les contaminants piégés passent des micro-plastiques à l'intérieur des organes, où ils peuvent ensuite subir des transformations biochimiques (figure F-2). Comme exemple d'incidences biologiques négatives des micro-plastiques, on peut citer les perturbations endocriniennes (altération de l'expression génétique) qui ont été observées chez certains poissons qui avaient ingéré par inadvertance des composés plastiques²². Il y a encore dans notre compréhension de la destinée des micro-plastiques et de leurs contaminants associés ainsi que de leur toxicité chez l'homme, d'importantes lacunes que les nouveaux travaux de recherche menés par l'Agence tenteront de combler.



FIG. F-2. La recherche se poursuit sur l'ingestion des micro-plastiques par le biote marin, y compris les moules, les vers, les poissons et le zooplancton (comme ici). Cole, M. et al. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton, Environ. Sci. Technol., 2013, 47 (12), pp 6646–6655.

230. Les techniques nucléaires de laboratoire fourniront de nouvelles informations cruciales sur les interactions et les incidences d'un large éventail de micro-particules de plastique et des contaminants toxiques associés, parmi lesquels les polluants organiques persistants (POP) et des éléments en trace, tels que le mercure, le cadmium et le plomb.

231. Les radio-isotopes sont particulièrement indiqués pour quantifier les mouvements et les incidences biologiques des micro-plastiques ainsi que des contaminants associés. On peut concevoir des expériences qui utilisent des radio-isotopes comme traceurs pour les micro-plastiques en utilisant les concentrations ambiantes et des organismes marins importants sur le plan commercial. On peut ainsi utiliser des particules de micro-plastique radiomarquées pour suivre des taux réalistes d'absorption dans un organisme, y compris des informations sur les processus de dégradation des micro-plastiques au fil du temps. De même, on peut aussi utiliser ces techniques de marquage isotopique pour évaluer quantitativement les transformations biochimiques survenant dans l'organisme ainsi que la biocinétique de l'épuration ultérieure.

232. Pour compléter l'analyse, on peut utiliser des méthodes complémentaires, telles que la spectrométrie de masse des composés chimiques spécifiques ou la spectrométrie de masse à couplage

²¹ Engler, R.E., The Complex Interaction between Marine Debris and Toxic Chemicals in the Ocean. Environmental Science and Technology 46, 12302–12315.

²² Lusher, A.L., Hollman, P.C.H., Mendoza-Hill, J.J., Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 615. Rome.

inductif à haute résolution, qui utilisent la signature isotopique des contaminants pour remonter à leurs sources et suivre leurs cheminements. Ainsi, les techniques nucléaires et isotopiques peuvent offrir un moyen unique de répondre à des questions importantes restées jusque-là sans réponse concernant les incidences biologiques des micro-plastiques, parmi lesquelles, par exemple, les effets potentiels sur les espèces aquatiques à différents stades de leur vie, l'évaluation des incidences sur les populations, les communautés et les écosystèmes, la compréhension de la cinétique de l'internalisation (par exemple le transfert à travers la paroi intestinale), et une meilleure connaissance du rôle des micro-plastiques comme vecteurs importants d'exposition et de bioaccumulation des polluants organiques persistants et des métaux en trace adsorbés.

233. Les informations recueillies grâce à ces nouvelles recherches permettront de mieux comprendre le rôle des micro-plastiques et des contaminants organiques associés dans des organismes marins importants sur les plans social et commercial, et contribueront à renforcer les programmes des États Membres relatifs à la sécurité alimentaire et à la sécurité sanitaire des produits de la mer, qui doivent reposer sur une étroite surveillance, en temps voulu, de la sécurité sanitaire des aliments.

G. Production de radio-isotopes et technologies des rayonnements

G.1. Alphathérapie : nouvelles applications thérapeutiques de radiopharmaceutiques contenant des émetteurs de particules alpha

234. Les radiopharmaceutiques thérapeutiques contiennent des radio-isotopes émetteurs de particules énergétiques qui déposent leur énergie assez rapidement sur la matière qu'elles rencontrent – une propriété appelée transfert linéique d'énergie (TLE) élevé. La distance parcourue par le rayonnement de particules et la vitesse à laquelle il dépose son énergie sur la matière dépendent de l'énergie et de la masse de la particule en question. À énergie égale, les particules bêta, essentiellement des électrons, pénètrent beaucoup plus profondément que les particules alpha. Autrement dit, les particules alpha, qui sont près de 7 300 fois plus lourdes que les électrons, déposent leur énergie dans un rayon bien plus petit que les particules bêta de même énergie. Le TLE des particules alpha est donc beaucoup plus élevé que celui des particules bêta.

235. La première génération de radiopharmaceutiques thérapeutiques, marqués avec des radio-isotopes émetteurs de particules bêta, tels que l'iode 131, est utilisée depuis plusieurs décennies pour la prise en charge des patients souffrant de cancer et d'autres maladies. Les particules bêta tuent efficacement les cellules cancéreuses en raison de leur longue portée d'action, généralement en millimètres dans le tissu, mais elles peuvent encore détériorer les cellules voisines saines même dans des conditions optimisées. Par contre, les particules alpha ont un TLE plus élevé et pénètrent moins profondément dans le tissu vivant, généralement de seulement quelques micromètres. Elles constituent donc un meilleur choix pour irradier spécifiquement les cellules ciblées, dont la taille s'exprime généralement en micromètres. La thérapie par radiopharmaceutique alpha serait efficace si le radiopharmaceutique émetteur de particules alpha était proche du noyau cellulaire ciblé, compte tenu de la nature intracellulaire de la cible. La difficulté consiste donc ici à rapprocher l'émetteur de particules alpha d'assez près des cellules ciblées pour les éliminer comme souhaité.

236. On trouvera au tableau 1 une liste de différents radionucléides émetteurs de particules alpha qui pourraient être utilisés dans des radiopharmaceutiques. Ces dernières décennies, de nombreuses tentatives d'élaboration de radiopharmaceutiques émetteurs de particules alpha efficaces ont débouché sur des résultats très prometteurs.

Tableau G-1. Radionucléides émetteurs de particules alpha et leurs applications

Radionucléide	Période	Production	Application
^{225}Ac	10 j	Chaîne de désintégration de ^{233}U ^{229}Th (désintégration alpha) ^{226}Ra (p,2n)	Thérapie systémique par radio-isotopes vectorisés par des peptides
^{224}Ra	3,66 j	^{228}Th (désintégration alpha)	Soins palliatifs pour les patients souffrant du cancer du sein ou de la prostate avec métastases osseuses
^{223}Ra	11,4 j	Chaîne de désintégration de ^{227}Ac ^{227}Th (désintégration alpha)	
^{213}Bi	45,6 min	Chaîne de désintégration de ^{227}Ac 1. Générateur Ac/Bi	Thérapie systémique par radio-isotopes vectorisés par des peptides
^{212}Bi	60 min	Chaîne de désintégration de ^{227}Ac Générateur Ra-Bi/Pb	Thérapie systémique par radio-isotopes vectorisés par des peptides (potentiellement)
^{211}At	7,2 h	^{209}Bi (alpha, 2n)	Radio-immunothérapie

G.1.1. Radium 223

237. Le chlorure de radium 223 fait partie des radiopharmaceutiques émetteurs de particules alpha de première génération. Il est intéressant parce que c'est une molécule chimique inorganique simple qui est facile à préparer et à comprendre. En 2013, le chlorure de radium 223 a reçu l'agrément de l'Office de contrôle des produits alimentaires et pharmaceutiques (FDA) des États-Unis pour utilisation dans l'atténuation des douleurs osseuses ; il est depuis commercialisé sous le nom Xofigo. Le radium, chimiquement similaire au calcium, s'accumule naturellement très facilement dans les tissus osseux. Le chlorure de radium 223 est un excellent radiopharmaceutique thérapeutique pour l'atténuation des douleurs chez les patients ayant des métastases osseuses. Il est utilisé aujourd'hui pour la prise en charge de patients atteints du cancer de la prostate ou de l'ovaire avec métastases. Toutefois, en raison du faible nombre de producteurs et de la complexité technique de sa production, le radium 223 est disponible en quantités limitées, coûte cher et est peu accessible dans la plupart des pays, en particulier les pays en développement.

G.1.2. Générateur actinium 225/bismuth 213

238. L'expérience acquise avec le chlorure de radium 223 a stimulé la recherche visant à élaborer des radiopharmaceutiques qui pourraient servir à cibler des tumeurs autres que les métastases osseuses grâce à des molécules de ciblage, comme les peptides et les anticorps. La quête d'un radionucléide émetteur de particules alpha polyvalent qui pourrait servir à marquer les peptides/anticorps a conduit à étudier le bismuth 213, un émetteur alpha d'une période de 45,6 minutes, en tant que radionucléide « théragnostique », c'est-à-dire ayant un rôle à la fois diagnostique et un rôle thérapeutique. Compte tenu de la courte période du bismuth 213 et des obstacles à sa production directe, un générateur actinium 225/bismuth 213 est la meilleure approche pour produire du bismuth 213 pour utilisation dans les radiopharmacies hospitalières. Ce générateur est disponible avec une haute activité spécifique et, en raison de propriétés chimiques et physiques favorables, est déjà utilisé dans de nombreuses études précliniques et dans plusieurs essais cliniques. Ce système démontre la faisabilité, la sûreté et l'efficacité thérapeutique de l'alphathérapie ciblée utilisant des peptides et des immunomolécules comme agents de ciblage²³. Les méthodes de production d'actinium 225 au moyen d'un générateur de radionucléides actinium 225/bismuth 213 sont bien établies dans certains instituts de recherche. Toutefois, ce générateur n'est pas encore largement disponible en raison du petit nombre de producteurs. La production actuelle dans les instituts de recherche est juste suffisante pour répondre aux besoins limités des essais cliniques en cours²⁴. Il faut effectuer une évaluation du marché et avoir une vue d'ensemble de la demande pour avoir une idée claire du niveau réel de la demande.

G.1.3. Actinium 225

239. Le récent marquage direct de l'actinium 225 et son utilisation dans des applications cliniques ont montré qu'il avait un fort potentiel comme radiopharmaceutique théragnostique. L'actinium 225 attaché à une partie de cellule permettant le ciblage du cancer de la prostate, à savoir l'antigène membranaire prostatique spécifique (PSMA), a servi dans le traitement de patients souffrant d'un cancer de la prostate avancé. Les résultats (présentés à la figure G-1) ont attiré l'attention du monde entier sur ce radiopharmaceutique. L'un des problèmes de la préparation et la distribution du PSMA actinium 225 concerne la production et la disponibilité de l'actinium 225, car toutes les méthodes de production présentent des inconvénients. Des solutions doivent être trouvées à tous ces inconvénients afin de satisfaire la demande potentiellement élevée d'actinium 225 prévue dans un avenir proche. Les Laboratoires nucléaires canadiens construisent actuellement un générateur fonctionnant à partir de mCi de thorium 229, qui est capable de produire plusieurs dizaines de mCi d'actinium 225 par an.

²³ Morgenstern, A., Bruchertseifer, F., Apostolidis, C., Bismuth-213 and actinium-225 -- generator performance and evolving therapeutic applications of two generator-derived alpha-emitting radioisotopes, *Curr Radiopharm.* 5(3) (2012) 221-227.

²⁴ McDevitt, M.R. et al., An ²²⁵Ac/²¹³Bi generator system for therapeutic clinical applications: construction and operation, *Appl Radiat Isot.* 50 (1999) 895-904.

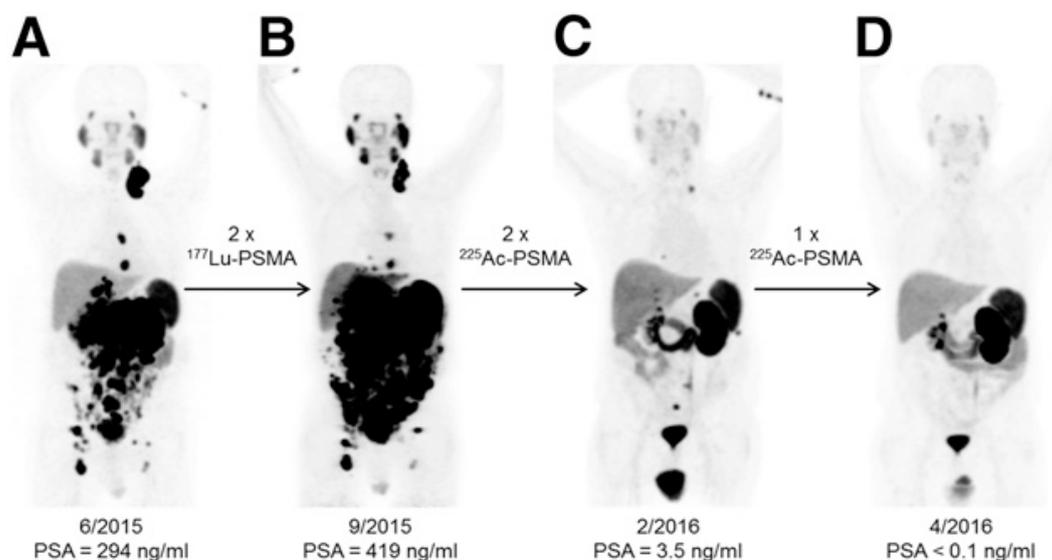


FIG. G-1. PET-CT au ⁶⁸Ga-PSMA-11 d'un patient : étendue tumorale initiale (A) ; le bilan d'extension complet après deux cycles de ¹⁷⁷Lu-PSMA-617 émetteur de particules bêta a montré une progression (B). En comparaison, le bilan d'extension complet après le deuxième (C) et le troisième (D) cycles de ²²⁵Ac-PSMA-617 émetteur de particules alpha a montré une réponse impressionnante²⁵.

G.1.4. Astate 211

240. L'astate 211 est un autre émetteur de particules alpha bien connu dont les propriétés sont propices à une utilisation comme radiopharmaceutique. C'est un radionucléide halogénure, difficile à produire parce que sa production nécessite des cyclotrons accélérateurs de particules alpha, qui sont rarement disponibles, et que les rendements et l'efficacité de marquage sont faibles. Ces problèmes ont limité l'utilisation de ce radionucléide au cours de la dernière décennie²⁶ et jusqu'à présent, aucun essai clinique de radiopharmaceutiques fondé sur ce radionucléide n'a été rapporté. Par conséquent, les problèmes à résoudre pour la production et la disponibilité de ce radionucléide et pour faciliter un processus de production systématique de radiopharmaceutique²⁷ restent entiers.

241. Les succès récents enregistrés dans l'utilisation de radiopharmaceutiques émetteurs de particules alpha ont suscité un vif intérêt pour l'utilisation de ces molécules dans le traitement des cancers. Il est aujourd'hui pertinent et opportun d'étudier leur utilisation de manière continue partout dans le monde.

²⁵ Clemens Kratochwil, C. et al., ²²⁵Ac-PSMA-617 for PSMA-Targeted α-Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer, *J Nucl Med* 57 (2016) 1941–1944.

²⁶ Elgqvist, J., Targeted alpha therapy: part I. *Curr Radiopharm.* 4(3) (2011) 176.

²⁷ IAEA, Report of the Technical Meeting on Alpha emitting radionuclides and radiopharmaceuticals for therapy (2013) http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/TM-44815-report-Alpha-Therapy.pdf



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(62)/INF/2