

Conférence générale

GC(60)/INF/2
12 juillet 2016

Distribution générale
Français
Original : anglais

Soixantième session ordinaire

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2016

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus en 2015.
- Le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2016 couvre les domaines suivants : applications électronucléaires, fission avancée et fusion, applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, techniques nucléaires dans l'industrie, imagerie du corps en santé humaine, faits nouveaux dans la lutte contre les maladies transmises par des insectes et gestion des sols.
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations particulières faites par le Conseil des gouverneurs et d'autres observations communiquées par les États Membres.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2016

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. Avec 441 réacteurs en service à la fin de 2015, la capacité mondiale de production d'énergie nucléaire était de 382,9 GWe. Cinq réacteurs ont été définitivement mis à l'arrêt, dix ont été raccordés au réseau, soit le plus grand nombre depuis 1990, et huit ont été mis en chantier. Les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie, et en particulier en Chine. Quarante-cinq des 68 réacteurs en construction étaient dans cette région, de même que 39 des 45 réacteurs à être couplés au réseau depuis 2005.
2. Trente pays utilisent actuellement l'électronucléaire et un nombre équivalent de pays envisagent ou prévoient son inclusion dans leur bouquet énergétique, ou y travaillent activement. Sur les 30 pays exploitant des centrales nucléaires, 13 sont en train de construire de nouvelles centrales ou d'achever activement des chantiers qui avaient été suspendus, et 12 prévoient d'en faire autant. D'après les projections à l'horizon 2030 établies par l'Agence en 2015, la capacité nucléaire installée devrait croître de 2 % dans l'hypothèse basse et de 70 % dans l'hypothèse haute. Le rôle de l'électronucléaire dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre est de plus en plus reconnu. L'électronucléaire, qui a déjà largement contribué à l'atténuation du changement climatique en évitant l'émission de près de 2 milliards de tonnes de dioxyde de carbone chaque année, peut directement contribuer aux objectifs de développement durable des Nations Unies.
3. On a continué d'améliorer la sûreté dans les centrales nucléaires à travers le monde. L'Agence a publié son rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi. À une Conférence diplomatique, les Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire (CSN) ont adopté la Déclaration de Vienne sur la sûreté nucléaire, dans laquelle figuraient plusieurs principes destinés à prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et à atténuer ces conséquences si elles se produisaient.
4. La capacité mondiale annuelle d'enrichissement est restée supérieure à la demande totale et les autres activités du cycle du combustible se sont maintenues à un niveau relativement constant. Le cadre juridique de base nécessaire à la création de la banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA a été conclu avec la signature, en août 2015, de l'accord avec l'État hôte et des accords techniques connexes avec le Kazakhstan.
5. Le combustible utilisé des réacteurs nucléaires entreposé représentait près de 266 000 t de ML et s'accumule au rythme d'environ 7 000 t de ML/an. Le retraitement du combustible utilisé de réacteurs commerciaux s'est poursuivi dans dix installations dans cinq États Membres.
6. Des travaux de déclassement considérables sont prévus dans les années à venir. En effet, 157 réacteurs nucléaires de puissance dans le monde ont été définitivement mis à l'arrêt ou sont en cours de déclassement. Plus de 56 % de l'ensemble des réacteurs en service ont plus de 30 ans et environ 15 % d'entre eux ont plus de 40 ans. Si certains pourraient fonctionner plus longtemps,

nombre d'entre eux seront retirés du service au cours des deux prochaines décennies. De plus, plus de 480 réacteurs de recherche et assemblages critiques et plusieurs centaines d'autres installations du cycle du combustible ont été déclassés ou sont en cours de déclasserment.

7. La première autorisation de construction pour une installation de stockage définitif de combustible nucléaire usé en formations géologiques profondes a été accordée pour l'installation Onkalo, en Finlande. Des installations de stockage définitif pour toutes les autres catégories de déchets radioactifs sont en service dans le monde entier. Les options de stockage définitif des sources scellées retirées du service, comme leur stockage avec d'autres déchets dans des installations appropriées, le recyclage, le rapatriement ou le stockage définitif dans des puits spéciaux, sont sérieusement à l'étude dans plusieurs pays. Les opérations d'enlèvement effectuées en 2015 ont permis de mettre de nombreuses sources scellées retirées du service dans des conditions d'entreposage correctes.

8. Plusieurs États Membres ont poursuivi leurs activités de recherche, de mise au point ou d'implantation de réacteurs à fission avancés. Le développement et l'implantation de réacteurs à neutrons rapides suscite un intérêt accru dans le monde. En raison de la nécessité d'une production d'électricité flexible, il y a aussi un intérêt croissant pour les réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP) ou les réacteurs modulaires (PRM), qui améliorent la performance en matière de sûreté grâce à des dispositifs de sûreté passive et sont économiquement plus abordables. Il existe environ 50 modèles et conceptions de RFMP et PRM, et trois sont en construction.

9. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications non électriques, comme 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 de l'intérêt dans plusieurs États Membres.

10. Les activités destinées à produire de l'énergie grâce à la fusion nucléaire, le défi technique monumental du XXI^e siècle, sont en cours et les travaux de construction avancent sur le site du réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER).

11. La demande en accélérateurs de faisceaux de protons ou d'ions de forte puissance est croissante dans des domaines comme la physique des particules, la physique nucléaire et la physique utilisant des neutrons, ainsi que pour la transmutation des déchets nucléaires à longue période.

12. Environ la moitié des 246 réacteurs de recherche dans le monde et des installations critiques en exploitation dans 55 pays ont plus de 40 ans. La gestion du vieillissement, la durabilité de l'approvisionnement en combustible, les options liées à la gestion du combustible usé et l'amélioration de l'utilisation des réacteurs de recherche sont les principaux défis à relever par les communautés d'utilisateurs de réacteurs de recherche. Des initiatives comme l'Internet Reactor Laboratory, le Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche ainsi que les coalitions et réseaux régionaux visent à favoriser la coopération internationale en vue du renforcement des capacités, notamment dans le domaine de la formation théorique et pratique. Huit 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.

13. Les activités visant à réduire le plus possible l'utilisation de l'uranium hautement enrichi (UHE), y compris le rapatriement du combustible à l'UHE des réacteurs de recherche dans le pays d'origine, se sont poursuivies. Au fil des ans, les programmes de reprise de combustible à l'UHE provenant des États-Unis ou de Russie ont donné des résultats dignes d'éloges. Avec l'Ouzbékistan, 28 pays¹ qui avaient de l'UHE n'en ont plus maintenant.

¹ Plus Taïwan (Chine).

14. S'il n'y a pas eu, en 2015, de pénuries importantes d'approvisionnement en molybdène 99 (isotope médical), les difficultés d'exploitation dans les installations de traitement et les réacteurs de recherche plus anciens demeurent. En raison de l'évolution de la demande, des gains d'efficacité et d'une diversification de l'offre, les arrêts mineurs non programmés ont été bien gérés par l'industrie.

15. Les techniques nucléaires sont largement utilisées dans les procédés industriels pour étudier des phénomènes physiques et chimiques complexes, notamment l'usure, le transfert de masse, la corrosion et l'érosion. Lorsque les surfaces ne sont pas aisément accessibles ou sont cachées par des structures les recouvrant, la technique nucléaire d'activation en couche mince offre un moyen efficace de mesurer et de surveiller l'usure et la corrosion. L'activation en couche ultra mince permet de mesurer la perte de surface avec une sensibilité de quelques nanomètres.

16. On envisage d'utiliser de nouveaux produits du radiotraitement, comme les nanomatériaux synthétisés par irradiation de différentes formes et différentes tailles (nanoparticules, nanofibres, nanopores), dans la fabrication d'un emballage actif destiné aux aliments et celle de pansements, ainsi que comme vecteurs de médicaments. Un emballage « actif » ou « intelligent » ayant des propriétés supérieures de barrière contre les gaz et pouvant empêcher l'entrée d'oxygène et la sortie de gaz inertes, allongeant ainsi la durée de vie du produit alimentaire, est en cours de développement. Il est possible de fabriquer des films de ce type en y incorporant des nanoparticules spécifiques, qui peuvent aussi contenir des enzymes, des agents antibactériens et d'autres composants aidant à lutter contre la détérioration et l'altération des aliments.

17. Le besoin, dans l'industrie de l'imprimerie et de l'enrobage, de procédures réduisant la pollution et empêchant la migration de sous-produits dégradés dans les biens de consommation a été l'une des principales causes de l'arrivée d'accélérateurs de faisceaux d'électrons de basse énergie à énergies inférieures à 300 keV destinés à l'industrie de l'enrobage. L'utilisation, dans les enrobages, les encres et les adhésifs, de monomères et d'oligomères durcissables par irradiation qui se polymérisent et réticulent permet d'éviter l'utilisation de composés organiques volatiles. La mise au point récente d'une nouvelle génération d'émetteurs de faisceaux d'électrons très compacts et d'emploi facile, ayant une plage de tension d'accélération de 80 à 200 kV et des largeurs de traitement pouvant aller jusqu'à 60 cm, peut promouvoir encore l'utilisation de cette technologie.

18. Dans le domaine de la santé, la mise au point actuelle d'outils d'évaluation de la composition corporelle suscite un intérêt considérable, les données montrant que les composantes individuelles de cette composition ont une influence importante sur le risque de maladies chroniques, la progression de la maladie et la réponse au traitement. À l'heure actuelle, trois modalités d'imagerie sont utilisées pour étudier la composition corporelle : l'absorptiométrie à rayons X en double énergie (DEXA), la tomographie quantitative et l'imagerie par résonance magnétique (IRM). L'absorptiométrie à rayons X en double énergie, qui consiste à effectuer simultanément une imagerie à l'aide de rayons X à deux niveaux d'énergie, est une technique très juste et précise permettant de mesurer la densité minérale osseuse, la masse osseuse, la masse grasse, la masse de tissus maigres mous et le pourcentage de graisse.

19. Récemment, des systèmes permettant de scanner l'ensemble de la surface corporelle en deux ou trois dimensions (2D ou 3D) ont été proposés comme nouvelles plateformes pour déterminer la composition corporelle, leur grande facilité d'accès, leur faible coût et la richesse des données régionales faisant de ces systèmes une option attrayante pour déterminer la composition corporelle régionale. Les mesures obtenues avec des scanners de surface en 3D se sont avérées très précises, tandis que les mesures de la forme corporelle en 2D sont obtenues avec une caméra numérique standard. Il a récemment été démontré que l'indice de masse grasse et l'indice de masse maigre pouvaient être obtenus à partir de simples silhouettes du corps entier, que peuvent facilement fournir des caméras traditionnelles comme celles présentes dans les téléphones portables, ce qui rend les mesures optiques de la composition corporelle en 2D très appropriées pour diverses applications sur le terrain.

20. L'utilisation intégrée de méthodes basées sur les rayonnements, la génétique et les symbiotes pour lutter contre les moustiques vecteurs de maladies peut aider à réduire le poids de cette maladie. Des projets pilotes montrent que la technique de l'insecte stérile (TIS) peut être combinée à d'autres méthodes de lutte pour réduire efficacement des populations de moustiques. Une production en masse est nécessaire pour la TIS et d'autres interventions de réduction de populations de ce type, mais il est essentiel que seuls les moustiques mâles soient lâchés, car ce sont les femelles qui transmettent la maladie. La séparation des sexes en vue d'éliminer les femelles de la ligne de production est possible à une petite échelle en se basant sur le dimorphisme sexuel et en ajoutant des produits dans les repas de sang, mais des souches de sexage génétique efficaces et robustes pour une élimination facile et sûre des moustiques femelles à l'échelle d'un élevage en masse sont nécessaires. Des efforts sont actuellement faits pour trouver de nouveaux marqueurs létaux morphologiques ou conditionnels pour les espèces *Anopheles arabiensis*, *Aedes albopictus* et *Aedes aegypti* afin de mettre au point des souches de sexage génétique efficaces.

21. Parallèlement à la TIS traditionnelle utilisant l'irradiation, on étudie actuellement *Wolbachia*, un genre de bactéries symbiotiques héritées de la mère fréquemment présent chez les insectes, en tant qu'outil complémentaire pour réduire, en se basant sur une incompatibilité cytoplasmique, des populations importantes de moustiques vecteurs de maladies dans certaines zones (technique de l'insecte incompatible ou TII). En l'absence de souches de sexage génétique robustes, la proposition de combiner la TIS et des méthodes utilisant *Wolbachia* semble avoir d'énormes potentialités comme méthode de lutte contre des populations de moustiques vecteurs de maladies offrant efficacité et biosécurité, car elle élimine les risques liés au lâcher de femelles fertiles vecteurs de maladies. Une approche dynamique de la réduction des populations, intégrant la TIS et d'autres méthodes compatibles dans un programme de lutte contre les insectes ravageurs à l'échelle d'une zone, peut être la seule façon de gérer durablement des populations de moustiques et, potentiellement, de lutter contre les nombreuses maladies qu'ils transmettent.

22. La dégradation des sols causée par des pratiques de gestion agricole inappropriées entraîne une perte de sols fertiles et des rendements de culture médiocres. De plus, la perte de terres arables ainsi que la sédimentation et la pollution des cours d'eau et des lacs constituent une menace environnementale, sociale et économique importante. Jusqu'à 1,4 milliard de personnes pourraient être touchées par la dégradation des terres, tandis que les pertes des écosystèmes ont été estimées à 10,6 billions de dollars É.-U. par an.

23. Les stratégies qui aident à évaluer l'érosion des sols et à quantifier l'efficacité de la conservation des sols utilisent depuis longtemps des radionucléides provenant des retombées, comme le césium 137, qui résulte d'essais d'armes thermonucléaires du passé, ainsi qu'à des radio-isotopes géogènes, comme le plomb 210, et à des radio-isotopes cosmogènes, comme le béryllium 7A, qui sont des radio-isotopes naturels. Une technique de criminalistique faisant appel aux isotopes stables récemment mise au point et basée sur les signatures d'isotopes stables de composés spécifiques présents dans des biomarqueurs organiques propres au sol permet d'identifier les sources de sédiments et de quantifier leurs apports respectifs. L'examen en parallèle des informations fournies par les isotopes stables de composés spécifiques sur l'origine des sédiments et des informations que donnent les radionucléides provenant des retombées sur les sols et la redistribution des sédiments offre aux chercheurs une méthode exacte et efficace pour déterminer l'origine des sédiments afin de repérer les zones sujettes à l'érosion des sols. L'utilisation de ces méthodes isotopiques intégrées pourrait permettre aux communautés agricoles d'adopter des mesures d'atténuation spécifiques et efficaces pour réduire le plus possible la perte de fertilité des sols, la baisse de productivité des cultures et la détérioration de la qualité de l'eau.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2016

Rapport principal

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2015, il y avait 441 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité totale de 382,9 GWe² (voir le tableau A-1). Cela représente une augmentation de quelque 6,6 GWe de la capacité totale par rapport à 2014.
2. Parmi les réacteurs en service, 81,6 % sont modérés et refroidis par eau ordinaire, 11,1 % modérés et refroidis par eau lourde, 3,4 % refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite, et 3,2 % refroidis par gaz. Deux d'entre eux sont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide.
3. Le 10 septembre 2015, Sendai-1 a été le premier réacteur nucléaire de puissance à redevenir pleinement opérationnel au Japon depuis l'accident de Fukushima Daiichi, suivi de Sendai-2 le 15 octobre 2015. L'Autorité japonaise de réglementation nucléaire a approuvé le redémarrage d'Ikata-3 en mai 2015, lequel a également été approuvé par l'Assemblée préfectorale d'Ehime en octobre 2015.
4. En 2015, cinq tranches de réacteurs ont été déclarées comme étant définitivement mises à l'arrêt au Japon (Genkai-1, Mihama-1 et 2, Shimane-2 et Tsuruga-1), de même que le réacteur de Grafenrheinfeld en Allemagne et le réacteur Wylfa-1 au Royaume-Uni.
5. En 2015, dix nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau, soit le nombre le plus élevé depuis 1990. Huit de ces réacteurs (Changjiang-1, Fangchenggang-1, Fangjiashan-2, Fuqing-2, Hongyanhe-3, Ningde-3, Yangjiang-2 et Yangjiang-3) se trouvent en Chine, un (Shin-Wolsong-2) en République de Corée et un (Beloyarsk-4) en Fédération de Russie.
6. Il y a eu huit mises en chantier en 2015 : Fangchenggang-3, Fuqing-5 et 6, Hongyanhe-5 et 6, et Tianwan-5 en Chine, K-2 au Pakistan et Barakah-4 aux Émirats arabes unis.
7. Au 31 décembre 2015, 68 réacteurs étaient en construction. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (fig. A-1.), en Chine en particulier. Sur le nombre total de réacteurs en construction, 45 se trouvent en Asie, de même que 39 des 45 nouveaux réacteurs couplés au réseau depuis 2005.

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

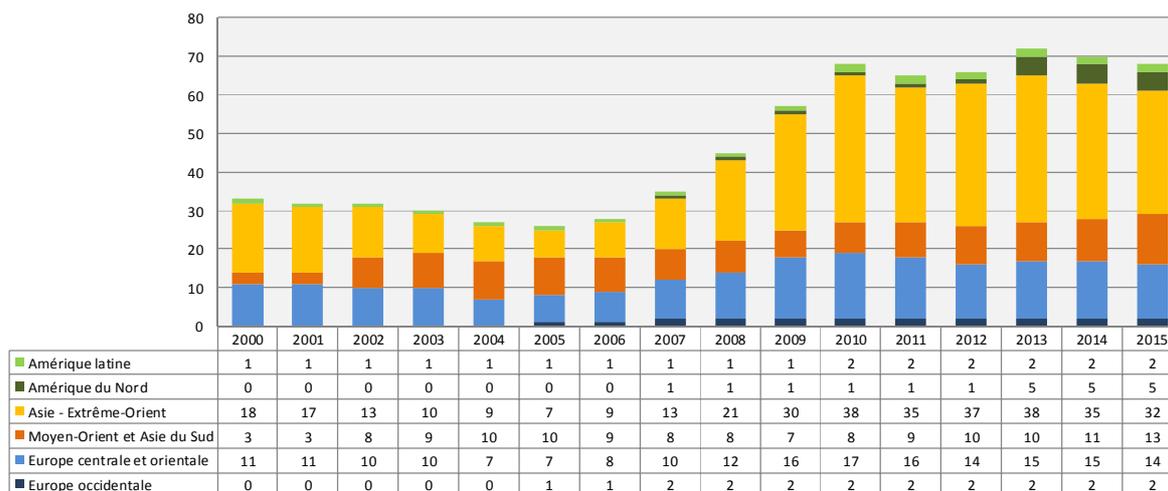


FIG. A-1. Nombre de réacteurs en construction par région.
(Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance <http://www.iaea.org/pris>)

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service et en construction dans le monde
(au 31 décembre 2015)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2015		Expérience d'exploitation totale en 2015	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			11,0	4,7	62	3
ALLEMAGNE	8	10 799			86,8	14,1	816	7
ARGENTINE	3	1 632	1	25	6,5	4,8	76	2
ARMÉNIE	1	375			2,6	34,5	41	8
BÉLARUS			2	2 218				
BELGIQUE	7	5 913			24,8	37,5	275	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 245	13,9	2,8	49	3
BULGARIE	2	1 926			14,7	31,3	159	3
CANADA	19	13 524			95,6	16,6	693	6
CHINE	31	26 774	24	24 128	161,2	3,0	209	2
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	24	21 733	4	5 420	157,2	31,7	474	0
ÉMIRATS ARABES UNIS			4	5 380				
ESPAGNE	7	7 121			54,8	20,3	315	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	99	99 185	5	5 633	798,0	19,5	4 111	4
FÉDÉRATION DE RUSSIE	35	25 443	8	6 582	182,8	18,6	1 191	4
FINLANDE	4	2 752	1	1 600)	22,3	33,7	147	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	419,0	76,3	2 048	4
HONGRIE	4	1 889			15,0	52,7	122	2
INDE	21	5 308	6	3 907	34,6	3,5	439	6
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			3,2	1,3	4	4

JAPON	43	40 290	2	2 650	4,3	0,5	1 739	0
MEXIQUE	2	1 440			11,2	6,8	47	11
PAKISTAN	3	690	3	1 644	4,3	4,4	64	8
PAYS-BAS	1	482			3,9	3,7	71	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 930			25,3	32,5	146	10
ROUMANIE	2	1 300			10,7	17,3	27	11
ROYAUME-UNI	15	8 918			63,9	18,9	1 559	7
SLOVAQUIE	4	1 814	2	880	14,1	55,9	156	7
SLOVÉNIE	1	688			5,4	38,0	34	3
SUÈDE	10	9 648			54,5	34,3	432	6
SUISSE	5	3 333			22,2	33,5	204	11
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	82,4	56,5	458	6
Total ^{b, c}	441	382 855	68	67 442	2 441,3		16 536	7

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

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

6 tranches en service (5032 MWe) et 2 en construction (2 600 MWe) ;

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

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

8. Sur les 441 réacteurs nucléaires de puissance en service, 250 sont exploités depuis 30 ans ou plus. Lorsqu'un réacteur arrive à la fin de sa durée de vie nominale, il est soumis à un examen de sûreté et à une évaluation du vieillissement de ses structures, systèmes et composants essentiels en vue de valider ou de renouveler sa licence d'exploitation au-delà de sa durée de vie opérationnelle initiale.

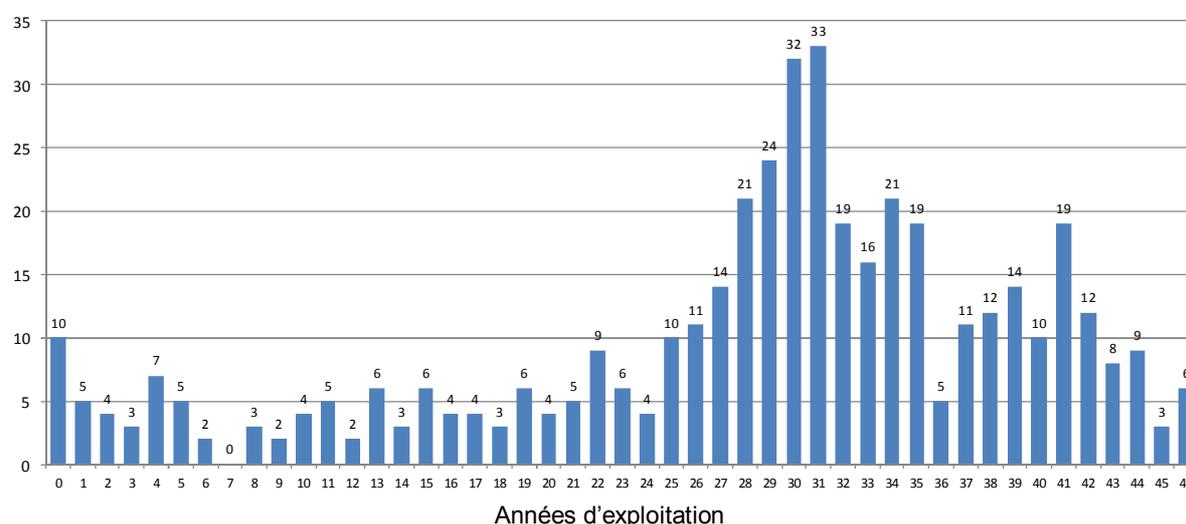


FIG. A-2. Répartition des réacteurs de puissance en exploitation par ancienneté en décembre 2015.
(Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance <http://www.iaea.org/pris>)

9. Aux Émirats arabes unis, la Société de l'énergie nucléaire a demandé en mars l'octroi d'une licence d'exploitation au nom de Nawah, qui sera l'organisme exploitant et le titulaire de licence pour la tranche 1 de la centrale nucléaire de Barakah. L'Autorité fédérale de réglementation nucléaire devrait délivrer une licence d'exploitation en octobre 2016 pour le chargement du combustible et la mise en service à chaud de cette tranche. Les tranches 2, 3 et 4, actuellement en construction, devraient être mises en service en 2018, 2019 et 2020, respectivement. L'Agence a effectué une

mission du Service intégré d'examen de la réglementation en février, une mission d'examen de la préparation aux situations d'urgence en mars, et une mission du Service consultatif international sur la protection physique en mai 2015.

10. Au Bélarus, les travaux de construction des deux tranches (Ostrovets-1 et Ostrovets-2) de la première centrale nucléaire du pays se sont poursuivis. Leur mise en service est prévue en 2018 et 2020, respectivement.

11. La Turquie continue de développer l'infrastructure de son programme électronucléaire et a mis la dernière main à un projet de loi sur l'énergie nucléaire régissant de manière exhaustive les questions relatives à la sûreté, à la sécurité et aux garanties.

12. Le Bangladesh a créé la Compagnie de la centrale nucléaire de Rooppur, qui sera futur exploitant, et a engagé des négociations avec la Fédération de Russie sur un accord de crédit et un contrat général d'ingénierie et de construction. Ayant prévu de choisir une technologie et un site pour sa première centrale nucléaire d'ici 2019, de commencer les travaux de construction d'ici 2022 et de mettre en service la première tranche d'ici 2029, la Pologne a établi un cahier des charges et mené des négociations sur un mécanisme d'appui gouvernemental devant être adopté d'ici 2018. Le Viet Nam a mis en œuvre des projets nationaux sur la mise en valeur des ressources humaines et l'information active du public et a continué de réviser sa loi sur l'énergie atomique, qui devrait être soumise pour approbation en 2016.

13. Dans le cadre de missions d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire effectuées au Nigeria (juin), au Kenya (août) et Maroc (octobre), les progrès accomplis par les pays en ce qui concerne le développement de leur infrastructure nucléaire ont été reconnus et des recommandations sur les mesures à prendre ont été formulées. En juin 2015, la Jordanie a signé des contrats avec la société russe Atomstroyexport en vue de réaliser une étude sur l'approvisionnement en eau et de mener des activités de supervision des sites. La Compagnie jordanienne d'énergie nucléaire a été créée en octobre. Des propositions pour une analyse du réseau, une étude du marché de l'électricité et des services consultatifs techniques, juridiques et financiers pour la mise au point de projets font actuellement l'objet d'une évaluation technique. En novembre, l'Égypte a signé un accord avec la Société nationale d'énergie atomique « Rosatom » pour la construction de quatre réacteurs.

14. Dans de nombreux pays qui envisagent l'option électronucléaire, l'accent est mis sur la prise d'une décision en toute connaissance de cause, l'élaboration de l'infrastructure juridique et réglementaire complète nécessaire à l'appui d'un programme électronucléaire et la mise en valeur des ressources humaines requises.

15. La participation des parties prenantes reste un aspect important pour les pays à toutes les étapes du développement de l'infrastructure nucléaire étant donné qu'elle permet aux États Membres de répondre aux préoccupations à un stade précoce et d'expliquer la raison d'être de leur programme électronucléaire, les activités prévues et les progrès accomplis dans le cadre de celui-ci. En 2015, l'Agence a aidé à organiser des missions d'experts concernant la participation des parties prenantes en Arabie saoudite, en Égypte, en Indonésie et au Kenya, ainsi que des réunions internationales en Finlande et au Japon.

A.1.1. Pays qui développent leur parc électronucléaire

16. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a délivré à la Tennessee Valley Authority une licence d'exploitation d'une durée de 40 ans, soit jusqu'en octobre 2055, pour la

tranche 2 de la centrale nucléaire de Watts Bar. Cette centrale est la première à se conformer aux instructions de la NRC ayant trait à Fukushima sur les stratégies d'atténuation des accidents.

17. L'EPR de Flamanville-3, en France, est en cours de construction, et devrait être achevé et raccordé au réseau d'ici la fin de 2018. En réponse à une demande de l'Autorité française de sûreté nucléaire, une série de tests sont effectués pour confirmer que les caractéristiques métallurgiques et mécaniques du couvercle et du fond de la cuve sous pression sont conformes aux prescriptions.

18. Nucleoeléctrica Argentina et la Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) ont conclu des négociations sur les contrats techniques et commerciaux en vue de la construction en Argentine d'un quatrième réacteur, Atucha 3, de type CANDU dont les travaux dureront huit ans. Un accord-cadre entre les deux organismes prévoit également la construction d'un réacteur à eau sous pression (REP) de conception chinoise (Hualong One), qui sera le cinquième réacteur du pays.

19. En Finlande, Fennovoima a déposé une demande de permis de construire auprès du Ministère de l'emploi et de l'économie pour son projet de centrale Hanhikivi. Le traitement de la demande devrait durer au moins deux ans. Fennovoima voudrait commencer à construire la centrale basée sur un réacteur de puissance refroidi et modéré par eau, de conception russe et d'une puissance de 1 200 MWe (VVER-1200), en 2018, et de la mettre en service en 2024.

A.1.2. Pays qui exploitent des centrales nucléaires

20. Les décisions concernant la durée de vie utile dépendent principalement des conditions sur le marché de l'électricité et des prévisions de développement de l'activité, parfois, des facteurs sociaux et politiques. En Suède, quatre réacteurs jugés non rentables seront fermés plus tôt qu'initialement prévu. Ringhals-2 sera mis définitivement à l'arrêt en 2019, suivi de Ringhals-1 en 2020, bien que la mise à l'arrêt de ces deux réacteurs ait été initialement prévue autour de 2025. Une décision définitive sur la date de mise à l'arrêt d'Oskarshamn-1 sera prise une fois que le calendrier de déclassement aura été établi. Oskarshamn-2, qui est hors service depuis juin 2013 en raison d'un vaste programme de modernisation, ne sera pas redémarré.

21. Aux États-Unis, Entergy fermera sa centrale nucléaire à tranche unique de Pilgrim dans le Massachusetts, en juin 2019 au plus tard. Elle prévoit également de mettre à l'arrêt la centrale nucléaire de FitzPatrick dans l'État de New York fin 2016 ou début 2017, invoquant comme raison une viabilité économique en baisse.

22. En République de Corée, Kori-1, le plus ancien réacteur en exploitation, en service depuis 1978 et rénové en 2007, a reçu l'autorisation de rester opérationnel jusqu'en 2017. La Compagnie coréenne d'énergie hydroélectrique et nucléaire ayant annoncé qu'elle ne demanderait pas de renouvellement de la licence jusqu'en 2027, Kori-1 sera le premier réacteur du pays à entrer en phase de déclassement à sa mise à l'arrêt en juin 2017.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

23. D'après les projections de l'Agence en 2015 (fig. A-3), la capacité nucléaire installée dans le monde devrait, dans l'hypothèse haute, passer de 381,7 GWe à 632 GWe d'ici à 2030, ce qui représente une augmentation d'environ 70 % en 15 ans. Dans l'hypothèse basse, elle serait de 385 GWe à l'horizon 2030, c'est-à-dire qu'elle se maintiendrait approximativement au niveau actuel. Ces chiffres tiennent compte des mises à l'arrêt – la capacité effective nouvellement ajoutée au cours des 15 prochaines années étant d'environ 150 GWe dans l'hypothèse basse et de 300 GWe dans l'hypothèse haute. Si l'on applique ces projections à plus long terme, la capacité nucléaire installée devrait, à l'horizon 2050, s'établir à 964 GWe dans l'hypothèse haute et afficher une croissance nette nulle dans l'hypothèse basse.

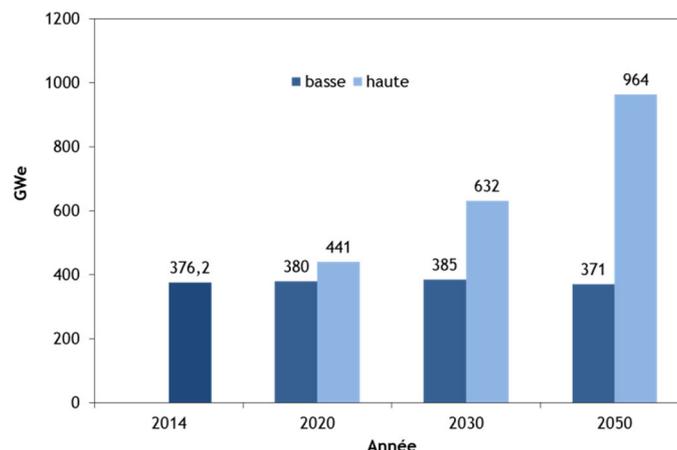


FIG. A-3. Projections concernant la capacité nucléaire installée dans le monde (source : Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, collection Données de référence de l'AIEA n° 1, 2015)

24. Les scénarios de projection haute de l'AIEA, de l'Agence internationale de l'énergie de l'OCDE (AIE) et l'Association nucléaire mondiale (WNA) indiquent tous que la croissance s'établira aux alentours de 600 à 700 GWe d'ici à 2030, tandis que les scénarios de projection basse mettent en évidence de plus grandes incertitudes en ce qui concerne la croissance (fig. A-4).

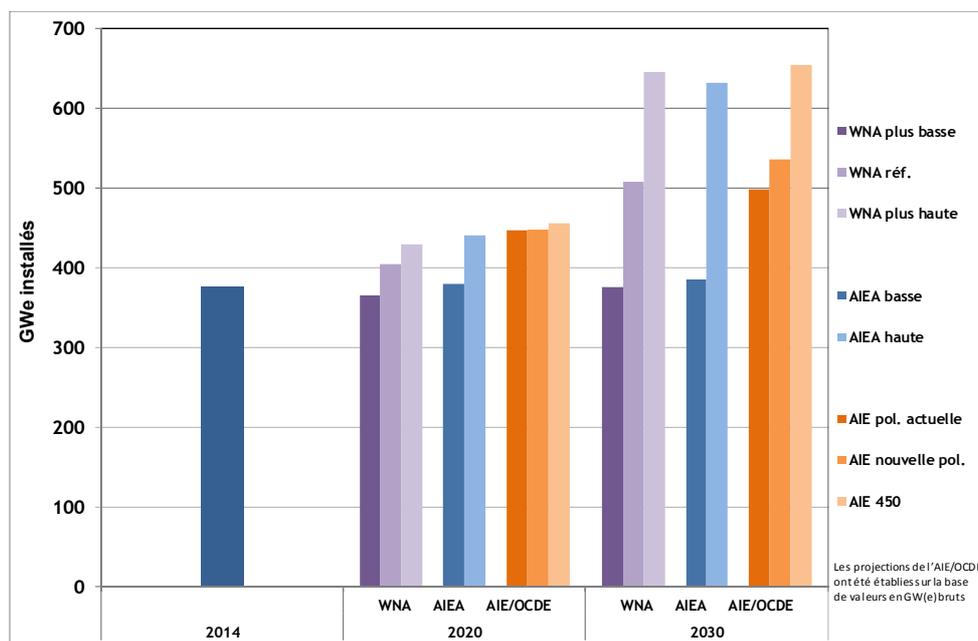


FIG. A-4. Comparaison des projections les plus récentes de l'AIEA aux scénarios 2014 de l'AIE/OCDE et aux projections 2013 de la WNA.

25. L'électronucléaire a sensiblement contribué à atténuer les changements climatiques en évitant le rejet de près de deux milliards de tonnes de dioxyde de carbone par an. Pour qu'il aide à limiter le réchauffement climatique à 2 °C à l'horizon 2100, sa capacité devrait correspondre à la projection haute de manière à éviter près de 6,5 milliards de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. La 21^e Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP21) a abouti à l'Accord de Paris, qui ne préconise et n'exclut aucune forme particulière d'énergie. Cela permet aux pays de constituer des portefeuilles énergétiques à faible

intensité de carbone pour compenser les émissions de carbone. En outre, l'Accord de Paris appuie le développement durable. L'électronucléaire peut contribuer directement à atteindre deux des objectifs de développement durable de l'ONU, à savoir l'objectif 7, « Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable », et l'objectif 13, « Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions ».

A.3. Cycle du combustible

A.3.1. Partie initiale

Ressources et production d'uranium

26. Les prix au comptant de l'uranium sont restés bas en 2015, fluctuant entre 77 \$/kg U et 86 \$/kg U, après avoir atteint leur niveau le plus bas à la mi-2014, à environ 60 \$/kg U. Cette faiblesse des prix a considérablement limité la capacité des entreprises à mobiliser des fonds pour la prospection, les études de faisabilité, le lancement de projets de construction et l'extension de ceux déjà en cours.

27. La WNA estime que la production d'uranium a été d'environ 57 000 t U en 2015, ce qui correspond plus ou moins à la production de 2014. Actuellement, de l'uranium est produit dans plus de 15 pays. Un certain nombre de nouveaux projets sont à divers stades d'avancement dans certains pays producteurs et dans plus de 25 pays primo-accédants potentiels, dont quelquesuns reprendront l'extraction d'uranium après une longue interruption.

28. Le Kazakhstan est resté le premier pays producteur d'uranium au monde, place qu'il doit presque exclusivement à ses mines de lixiviation *in situ*. Après avoir crû rapidement entre 2000 et 2012, la production n'a récemment connu que des augmentations modestes et s'est établie à 23 800 t U en 2015.

29. Les activités de prospection menées dans le bassin d'Athabasca par le Canada, deuxième producteur mondial, ont continué de donner des résultats encourageants, notamment avec la découverte du gisement d'uranium Triple R, qui, selon les estimations, permettrait de produire 38 770 t U sur les 14 années de durée de vie de la mine. La mine de Cigar Lake, dont la teneur en uranium est la plus élevée au monde, a commencé sa production commerciale en mai et devrait atteindre sa pleine capacité de production de 6 900 t U par an d'ici à 2017.

30. La phase de mise en service de la nouvelle mine d'uranium d'Husab en Namibie a été achevée en 2015, et la production devrait commencer en 2016. À pleine capacité, le rendement de cette mine pourrait atteindre les 5 770 t U par an, et sa durée de vie dépassera probablement les 20 ans. L'exploitation des mines d'uranium namibiennes de Rössing et de Langer Heinrich s'est poursuivie en 2015.

31. En Australie, la mine de lixiviation *in situ* de Four Mile ouverte en 2014 a accru sa production et atteint une capacité de 1 000 t U par an. Dans le cadre du projet Ranger, les travaux sur une possible extension souterraine aux deux mines à ciel ouvert du site ont été interrompus et ne reprendront pas. La production de l'année 2015 a été inférieure à 2 500 t U, contre 4 000 à 6 000 t U par an entre 1997 et 2009.

32. Les objectifs fixés pour la première phase d'un projet de raffinerie expérimentale visant à extraire de l'uranium et des métaux des terres rares du gisement de Kvanefjeld, au Groenland (Royaume du Danemark), ont été atteints, voire dépassés. Selon les estimations annoncées en février, ce gisement renfermerait 228 100 t U et 11,13 millions de tonnes d'oxyde de terres rares au total. Les ressources

non classiques d'uranium, comme les gisements de Kvanefjeld, élargissent de manière importante la base de ressources. Aux États-Unis, l'eau de mer fait l'objet d'études comme autre source d'uranium non classique. Par le passé, le thorium a été utilisé comme combustible nucléaire dans le cadre de démonstrations, mais il reste encore beaucoup à faire avant de pouvoir envisager sa commercialisation. Les ressources mondiales de thorium sont estimées à environ six à sept millions de tonnes.

Conversion et enrichissement

33. Le Canada, la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Royaume-Uni exploitent à l'échelle commerciale des usines de conversion d'octoxyde de triuranium (U_3O_8) en hexafluorure d'uranium (UF_6). Un procédé de volatilisation des fluorures par voie sèche est utilisé aux États-Unis, mais toutes les autres installations de conversion emploient un procédé par voie humide. La capacité annuelle mondiale de conversion est aux alentours de 60 000 t U sous forme d' UF_6 . La demande totale de services de conversion (en supposant une teneur de rejet de 0,25 % d'uranium 235) est actuellement aussi comprise entre 60 000 et 64 000 tonnes par an.

34. La capacité mondiale d'enrichissement est actuellement d'environ 60 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande totale s'élevant à approximativement 50 millions d'UTS par an. Des services commerciaux d'enrichissement sont fournis par cinq sociétés : la CNNC en Chine, AREVA en France, la Société nationale d'énergie atomique « Rosatom » dans la Fédération de Russie, l'USEC aux États-Unis et URENCO en Europe et aux États-Unis.

35. De petites installations de conversion et d'enrichissement sont en service en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran.

36. Aux États-Unis, la NRC a approuvé une modification de licence autorisant URENCO à agrandir son usine d'enrichissement d'Eunice au Nouveau-Mexique. URENCO entend ainsi porter à 10 millions d'UTS sa capacité, qui est actuellement de 3,7 millions d'UTS. Cependant, le Ministère de l'énergie des États-Unis a annoncé que le financement de son programme d'enrichissement d'uranium serait réduit de quelque 60 %. Les activités seront désormais limitées à la mise au point de la nouvelle technologie d'enrichissement d'uranium par centrifugation American Centrifuge à Oak Ridge, Tennessee.

37. La déconversion d' UF_6 appauvri en oxyde d'uranium ou en tétrafluorure d'uranium (UF_4) permet d'entreposer à long terme de l'uranium appauvri sous une forme plus stable. La capacité mondiale totale actuelle de déconversion est restée à environ 60 000 tonnes d' UF_6 par an. Les principales installations en exploitation sont l'usine d'AREVA du Tricastin (France), deux usines d'Uranium Disposition Services à Portsmouth et Paducah (États-Unis), et l'usine de déconversion W-ECP à l'Usine électrochimique (ECP) de Zelenogorsk (Fédération de Russie). International Isotopes construit une usine dans le Nouveau-Mexique (États-Unis). URENCO ChemPlants, au Royaume-Uni, a reporté à 2017 la date d'entrée en service de l'usine de déconversion et de gestion des résidus qui est actuellement en construction à Capenhurst. Quand elle sera achevée, l'installation traitera le stock d'uranium appauvri d'URENCO en Europe.

38. Le gouvernement d'Australie méridionale a mis en place la première Commission royale sur le combustible nucléaire du pays. Cette commission est chargée d'étudier les possibilités de développement des activités du cycle du combustible.

A.3.2. Fabrication de combustible

39. La demande annuelle actuelle de services de fabrication de combustible pour réacteurs à eau ordinaire (REO) s'est maintenue aux alentours de 7 000 t d'uranium enrichi en assemblages

combustibles, mais devrait atteindre environ 8 000 t U par an dans un avenir proche. Pour les réacteurs à eau lourde sous pression (RELP), les besoins étaient de 3 000 t U par an. Plusieurs fournisseurs sont actuellement en concurrence pour la plupart des types de combustibles. La capacité mondiale de fabrication s'est maintenue à environ 13 500 t U par an (uranium enrichi) pour les combustibles des REO et à environ 4 000 t U par an (uranium naturel) pour les combustibles des RELP. Le combustible pour REO est actuellement fabriqué en Allemagne, au Brésil, en Chine, en Espagne, aux États-Unis d'Amérique, en Fédération de Russie, en France, en Inde, au Japon, au Kazakhstan, en République de Corée, au Royaume-Uni et en Suède. L'uranium naturel utilisé pour la fabrication des combustibles destinés aux RELP est purifié et converti en dioxyde d'uranium (UO_2) dans des installations situées en Argentine, au Canada, en Chine, en Inde et en Roumanie. En avril 2015, AREVA a lancé l'utilisation de combustible ATRIUM 11 dans deux REB aux États-Unis. La nouvelle conception offre une meilleure souplesse d'exploitation, particulièrement utile pour les installations dans lesquelles on a opté pour des augmentations de la puissance de la centrale nucléaire ou pour des stratégies d'optimisation du facteur de capacité.

40. Aux États-Unis, la NRC a donné son autorisation à la centrale nucléaire de Perry (Ohio) pour qu'elle commence à utiliser le combustible GNF2 pour réacteur à eau bouillante de haute performance (REB) de Global Nuclear Fuel. Ce combustible devrait offrir un meilleur rendement énergétique tout en abaissant les coûts globaux du cycle du combustible et en réduisant la quantité totale d'uranium contenu dans les recharges de combustible et le taux moyen d'enrichissement de cet uranium. La société a également lancé en 2015 son assemblage combustible de nouvelle génération pour REB, le GNF3 (fig. A-5), qui offre une meilleure rentabilité, des performances accrues et une plus grande souplesse de fonctionnement.



FIG. A-5. Le combustible GNF3 de nouvelle génération pour REB. (Photo : Global Nuclear Fuel)

41. Arizona Public Service Company (États-Unis) a signé un contrat avec Westinghouse Electric Company pour la fabrication et la livraison de son combustible de nouvelle génération destiné à trois réacteurs nucléaires situés à Palo Verde (Arizona). Baptisé CE16NGF, ce nouveau combustible est équipé d'un matériau de gainage et d'absorbants consommables de pointe, et sa conception structurelle perfectionnée améliore le rendement et la fiabilité du combustible, tout en accroissant sa durée de vie utile.

42. Aux États-Unis, un groupe d'entreprises de services publics a présenté à la NRC, en mai 2015, une déclaration d'intérêt officielle concernant l'examen de la conception innovante de combustible métallique mise au point par Lightbridge. Le combustible est constitué d'un alliage unique de zirconium et d'uranium, et il se présente sous la forme d'une barre multilobée et torsadée. Cette conception améliore les propriétés de transfert thermique du combustible, qui peut ainsi fonctionner à une densité de puissance supérieure à celle des combustibles à l'oxyde d'uranium utilisés actuellement. Ce combustible doit être soumis à des essais d'irradiation au réacteur de recherche de Halden (Norvège) à partir de 2017.

43. Plusieurs laboratoires de recherche industriels et universitaires étudient actuellement divers concepts de combustible résistant aux accidents. Au Japon, Toshiba et IBIDEN ont mis au point une nouvelle technique qui permet de fabriquer les gaines des assemblages combustibles destinés aux REO à partir de carbure de silicium, et non plus de zircaloy. Ce revêtement sera testé dans un réacteur de recherche en 2016 en vue d'une commercialisation d'ici 2025. Au Royaume-Uni, le Laboratoire nucléaire national et l'Université de Manchester ont lancé un projet de recherche portant notamment sur de nouvelles gaines en céramique composite qui pourraient considérablement améliorer les capacités thermiques du combustible nucléaire.

44. Des essais d'irradiation visant à qualifier les éléments combustibles destinés au réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM) de démonstration [un réacteur à haute température refroidi par gaz en construction à Shidaowan (Chine)], ont été menés à bien aux Pays-Bas. En avril, la République islamique d'Iran a annoncé l'ouverture de sa première installation de production de combustible nucléaire, laquelle produira un combustible semblable à celui utilisé à la centrale nucléaire de Bushehr.

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

46. L'Inde et la Fédération de Russie fabriquent du combustible MOX destiné aux réacteurs à neutrons rapides. En Fédération de Russie, le Combinat chimique et minier a achevé les préparatifs de la mise en circulation d'un lot d'assemblages standard de combustible MOX destiné au réacteur Beloyarsk 4 de type BN-800. Les nouvelles lignes de production construites l'année dernière ont permis d'atteindre en 2015 une capacité de production annuelle de 20 assemblages combustibles, l'objectif étant d'arriver à produire 400 assemblages par an d'ici 2017. L'usine J-MOX (Japon), qui aura une capacité de 130 t de ML par an, est en chantier et son exploitation commerciale devrait débuter en 2019.

A.3.3. Assurance de l'approvisionnement

47. Avec la conclusion en 2015 du cadre juridique convenu avec le Kazakhstan, le projet de banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA est passé de la phase des évaluations et études de faisabilité à celle de la mise en œuvre proprement dite. Après approbation par le Conseil des gouverneurs, l'accord avec l'État hôte et deux accords techniques subsidiaires ont été signés à Astana (Kazakhstan) le 27 août 2015. Le premier accord technique subsidiaire porte sur l'exploitation de l'installation et il a été conclu entre l'Agence et l'Usine métallurgique d'Ulba, qui sera l'exploitant de la banque d'UFE de l'AIEA. Le second accord technique subsidiaire a été conclu avec le Ministère de l'énergie au sujet des arrangements spéciaux devant être mis en œuvre pour la création de la banque d'UFE de l'AIEA. Dans le cadre de cet accord, un comité de coordination conjoint coprésidé par l'Agence et le Kazakhstan a été créé. Il est convenu d'un plan d'activités spécifiques pour les 90 jours à compter de la date de signature. L'accord avec l'État hôte prévoit que la sûreté et la sécurité soient assurées dans le cadre du système de réglementation nucléaire du Kazakhstan, et le plan d'activités spécifiques contient une feuille de route à suivre pour démontrer la conformité aux dispositions applicables des normes de sûreté et des documents d'orientation sur la sécurité nucléaire, comme l'exige l'accord avec l'État hôte. D'importants travaux techniques se poursuivent dans les domaines de la sûreté, en particulier de la sûreté sismique, et de la sécurité. Une étude de faisabilité portant sur les

différents types possibles d'installations d'entreposage a été achevée et la construction d'un nouveau bâtiment est envisagée. Plus tôt, en juin 2015, également après approbation par le Conseil des gouverneurs, un accord de transit a été signé avec la Fédération de Russie.

48. 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.3.4. Partie terminale

49. À la fin de 2015, la quantité de combustible usé entreposé s'élevait à environ 266 000 t de ML et cette quantité augmente à raison de 7 000 t de ML par an, approximativement. Si le combustible usé est entreposé en majeure partie dans des piscines situées sur le site du réacteur, il existe 147 installations d'entreposage hors du site du réacteur qui sont réparties dans 27 pays (fig. A-6). Ce sont le Canada et les États-Unis qui ont les plus importants stocks de combustible usé entreposé à sec, ces deux pays ayant chacun un tiers de leurs stocks nationaux entreposés dans des installations de ce type. L'Allemagne possède plus de 1 000 châteaux métalliques à double usage chargés pour l'entreposage à sec et il est prévu que l'intégralité de son stock de combustible usé soit entreposé à sec avant la fin de 2022.

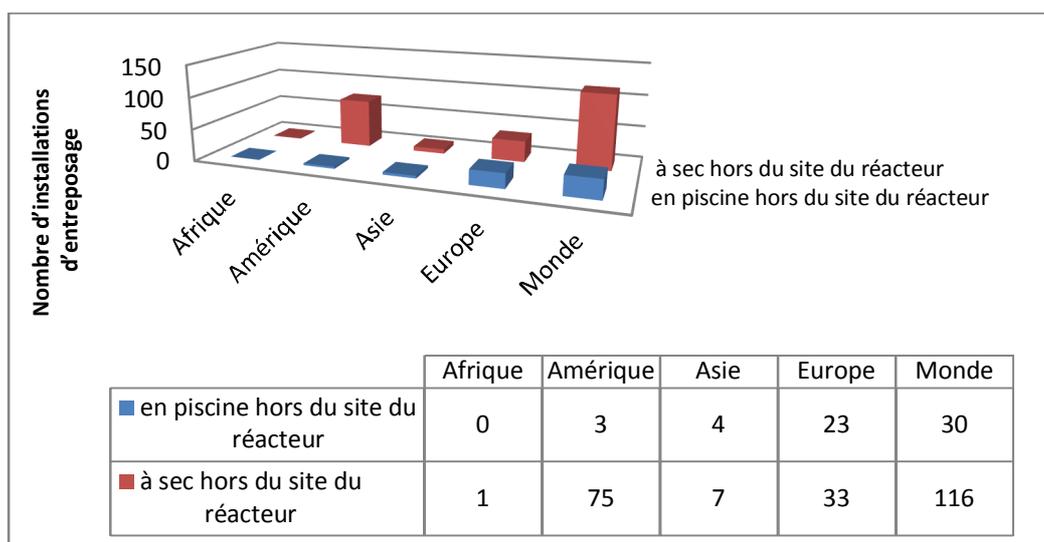


FIG. A-6. Répartition mondiale des installations d'entreposage de combustible usé hors du site du réacteur.

50. Douze pays prévoient actuellement de construire des installations d'entreposage à sec, en ont commencé la construction ou sont en train d'en mettre en service. Les projets les plus importants sont en Espagne, en Fédération de Russie, au Japon et en Ukraine. À l'installation de Zheleznogorsk (Fédération de Russie), qui dispose de la plus importante capacité d'entreposage à sec au monde, deux nouvelles casemates d'entreposage à sec ont récemment été construites [l'une destinée à recevoir du combustible issu de réacteurs de grande puissance à tubes de force (RBMK) et l'autre du combustible issu de VVER], en plus de celle déjà achevée en 2012. Ces nouvelles casemates devraient recevoir du combustible usé en 2016.

51. Aux États-Unis, Waste Control Specialists a déposé auprès de la NRC une demande de licence pour l'exploitation d'une installation indépendante d'entreposage de combustible usé à Andrews, Texas. AREVA doit jouer un rôle moteur dans la conception, la construction et l'exploitation de l'installation proposée. Holtec International et Eddy-Lea Energy Alliance ont annoncé la signature d'un mémorandum d'accord pour la conception et la construction d'une installation centralisée

d'entreposage de combustible usé pouvant stocker jusqu'à 75 000 t de ML grâce au système d'entreposage à sec souterrain à sécurité maximale de Holtec International. Si elle est approuvée, cette installation sera implantée dans le sud-est du Nouveau-Mexique.

52. La situation mondiale en matière de retraitement du combustible usé provenant de réacteurs commerciaux est restée inchangée en 2015, ce type de retraitement étant toujours effectué dans dix installations situées en Chine, en Fédération de Russie, en France, en Inde et au Royaume-Uni. La France et le Royaume-Uni disposent des plus importantes capacités opérationnelles et retraitent quelque 1 000 t de ML par an. La France et la Fédération de Russie proposent toutes deux des services de retraitement à des clients étrangers. À l'installation de Mayak (Fédération de Russie), la capacité de traitement annuelle est passée à 200 t de ML par an et plusieurs technologies de retraitement de combustibles non classiques, comme le combustible au béryllium et à l'uranium, ont été testées. L'Inde possède trois installations de retraitement de combustible des réacteurs de puissance et une installation expérimentale d'une capacité de 60 t de ML par an pour le combustible à l'oxyde de thorium. En Chine, l'usine de retraitement expérimentale dont dispose le pays peut retraiter jusqu'à 50 t de ML par an. En novembre, la CNNC et AREVA ont signé un accord pour la construction d'une installation de recyclage et de traitement de combustible usé d'une capacité de 800 t de ML par an dans la province de Gansu (Chine). Les travaux devraient commencer en 2020 et s'achever en 2030. Le site comprendra également une installation d'entreposage de combustible usé d'une capacité de 3 000 t de ML. Le Japon ne possède à l'heure actuelle aucune usine de retraitement commerciale, mais l'usine de Rokkasho en est à la phase active de mise en service et d'examen de la sûreté, et il est prévu qu'elle entre en service en mars 2016, avec une capacité de 800 t de ML par an.

53. Dans la Feuille de route à moyen et long terme pour le déclassement des tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO, publiée en juin 2013, il était prévu que l'enlèvement du combustible entreposé dans la piscine de la tranche 3 de la centrale ait lieu pendant le premier trimestre de 2015. Ce calendrier n'a pas pu être respecté en raison de plusieurs problèmes, notamment de difficultés liées à l'enlèvement de la console de la machine de manutention du combustible (enlevée en août 2015) et du matériel connexe, ainsi qu'à la décontamination du plancher de service de la tranche 3 à un niveau de dose ciblé d'1 mSv/h. En juin 2015, la Feuille de route a été révisée compte tenu de l'évolution de la situation sur le terrain. L'enlèvement du combustible de la piscine de la tranche 1 a ainsi été reporté à 2020 et celui de la piscine de la tranche 3 à 2017.

A.3.5. Déclassement, remédiation environnementale et gestion des déchets radioactifs

Déclassement des installations nucléaires

54. On compte 441 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, 157 à l'arrêt ou en cours de déclassement, dont 17 entièrement déclassés³.

55. Plus de 320 installations du cycle du combustible sont en service, environ 170 sont à l'arrêt ou en cours de déclassement et 125 sont entièrement déclassées. On dénombre également 246 réacteurs de recherche en service et plus de 180 à l'arrêt ou en cours de déclassement. Plus de 300 réacteurs de recherche et assemblages critiques ont été entièrement déclassés.

56. Une solide expérience a été acquise en matière de déclassement depuis le début du siècle, les progrès les plus notables ayant été faits principalement dans des pays dotés de programmes électronucléaires de longue date, notamment l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Royaume-Uni. Ainsi, la segmentation d'une cuve sous pression du réacteur de la centrale nucléaire José Cabrera (Espagne), le lancement de la deuxième phase du déclassement de la centrale nucléaire de Bohunice V1 (Slovaquie) et l'achèvement du

³ Données tirées du Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS) de l'AIEA (<http://www.iaea.org/pris>)

programme fédéral cible à grande échelle intitulé « Sûreté nucléaire et radiologique en 2008 et pour la période allant jusqu'en 2015 » (Fédération de Russie), qui comprend d'importantes activités de déclassement et de remédiation environnementale, sont des programmes qui illustrent les progrès importants du déclassement en 2015.

57. Au Royaume-Uni, le déclassement des dix centrales nucléaires de première génération, de type Magnox, se poursuit. La mise à l'arrêt, en décembre 2015, de la centrale de Wylfa (située dans le comté d'Anglesey, au pays de Galles) a marqué la fin de l'ère des réacteurs Magnox, qui avait commencé en août 1956 avec le couplage au réseau de la première centrale nucléaire de dimension industrielle à Calder Hall (située dans le comté de Cumbria, en Angleterre). La phase de déchargement du combustible, qui précède celle du déclassement, commence à présent pour la centrale de Wylfa, qui avait été mise en service en 1971. Le déclassement des deux réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal alcalin et du réacteur d'essai de matériaux de Dounreay, ainsi que des deux derniers réacteurs de recherche de Winfrith, se poursuit également.



*FIG. A-7. Travaux de déclassement à Sellafield (Royaume-Uni).
(Photo : Autorité du déclassement nucléaire/Sellafield Ltd.)*

58. Des projets suivent également leur cours en Bulgarie, en Lituanie et en Slovaquie, où des centrales nucléaires ont été mises à l'arrêt avant la fin de leur durée de vie nominale. Ils bénéficient de l'appui financier de la Banque européenne pour la reconstruction et le développement.

Gestion des sources radioactives scellées retirées du service

59. Les options de stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service, notamment leur stockage avec d'autres déchets dans des installations appropriées, les options de recyclage et de rapatriement, de plus en plus nombreuses, ou le stockage dans des puits spéciaux sont des solutions que plusieurs pays, dont le Ghana, la Malaisie et les Philippines, étudient sérieusement. Un argumentaire de sûreté générique a été élaboré en faveur du stockage en puits de sources des catégories 3 à 5, et un autre est en cours d'élaboration pour les sources de catégories 1 et 2. Le Canada a annoncé à l'Agence qu'il contribuerait financièrement à la mise en œuvre de programmes de stockage en puits au Ghana et aux Philippines. Des mesures ont d'ores et déjà été prises en ce sens.

60. En 2015, plusieurs opérations consistant à enlever des sources radioactives scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et à les placer sous contrôle dans des conditions de stockage adéquates ont été menées à bien. Ainsi, trois sources de catégories 1 et 2 ont été enlevées du Honduras et une source de catégorie 1 du Maroc. Par ailleurs, une source française fabriquée de catégorie 1 a été rapatriée du Liban, et quatre autres devraient l'être en 2016 - du Cameroun, du Liban et de Tunisie.

61. De grands progrès ont été faits dans l'association de la cellule chaude mobile de la Nuclear Energy Corporation of South Africa à un modèle de stockage en puits, l'objectif étant de limiter le

plus possible la manipulation de sources et d'éviter des transports inutiles. Par ailleurs, une boîte à outils mobile a été mise au point pour faciliter les opérations de conditionnement des sources des catégories 3 à 5 et préparer le stockage en puits. Des opérations de conditionnement de sources scellées retirées du service ont été menées à bien au Bangladesh, au Chili, à Madagascar, au Paraguay, au Pérou, aux Philippines et à Sri Lanka, du personnel local et régional ayant été formé à cette fin.

62. L'Agence a donné accès au Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes à un grand nombre de personnes dans les États Membres, facilitant ainsi le recensement desdites sources trouvées sur le terrain. En 2015, on s'est attaché à fournir davantage d'informations sur les sources et les dispositifs, pour que le catalogue n'en soit que plus utile.

Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif

63. En ce qui concerne les installations anciennes, des progrès notables ont été faits à Sellafield (Royaume-Uni), en particulier pour ce qui est des deux bassins à ciel ouvert. L'extraction de la totalité des fûts de la piscine d'entreposage du combustible des piles a permis d'éliminer le risque de criticité associé à la piscine et de réduire le stock radioactif de 50 %.

64. La piscine d'entreposage Magnox (première génération) de Sellafield a été construite dans les années 1950 pour stocker, refroidir et préparer le combustible nucléaire usé issu de réacteurs Magnox en vue de son retraitement. Elle a cessé d'être exploitée en 1992 et contient à présent, entre autres, 1 400 mètres cubes de boues radioactives. En mars 2015, une étape importante a été franchie lorsque, pour la première fois, des boues radioactives ont été transférées de la piscine d'entreposage Magnox à un entrepôt qui venait d'être mis en service.

65. Au Royaume-Uni, depuis qu'une stratégie nationale relative aux déchets de faible activité a été publiée, les nouvelles solutions de traitement et de stockage définitif des déchets se sont multipliées. En conséquence, en 2015, 85 % des déchets de faible activité produits par l'industrie nucléaire ont été évacués du dépôt national pour être traités selon différentes méthodes - notamment le recyclage des métaux, l'incinération ou le stockage définitif des déchets de très faible activité dans des décharges autorisées.

66. La Géorgie a mis en service, à titre expérimental, un atelier de transformation des déchets destiné à les réduire au minimum et à atténuer les risques posés par ceux hérités du passé. Dans le cadre du déclassement d'une station cryogénique et du réacteur nucléaire de recherche IRT-M à basse température refroidi par hélium, il s'agit d'éliminer les contaminants radioactifs superficiels des tuyaux d'acier au moyen d'un appareil de découpe plasma et d'une installation personnalisée de décontamination par projection d'abrasif.

67. Les structures commerciales d'incinération et de fusion des métaux en place dans plusieurs pays, comme la Suède et les États-Unis, restent des moyens économiques d'assurer des services transfrontières de traitement des déchets radioactifs. Ainsi, dans certains cas, les compagnies d'électricité nucléaire canadiennes et les Laboratoires nucléaires canadiens peuvent envoyer certains déchets radioactifs de faible activité résultant de l'exploitation ou provenant d'anciens sites à des prestataires de services homologués aux États-Unis, et récupérer un volume de déchets radioactifs bien moindre.

68. La centrale nucléaire de Novovoronezh (Fédération de Russie) met en service un four à plasma d'une capacité de 250 kg par heure. Ce four servira à traiter des déchets solides après le déclassement des deux premières tranches de la centrale nucléaire. En outre, une installation de bitumage des déchets radioactifs liquides à la centrale nucléaire de Kalinin a atteint sa capacité nominale, ce qui permet de réduire le volume d'un facteur dix et de répondre aux besoins de toutes les centrales nucléaires russes.

69. Il est essentiel que les États Membres détenant des déchets radioactifs en attente de stockage définitif les entreposent dans de bonnes conditions de sécurité et de sûreté. Aux Pays-Bas, l'Organisation centrale pour les déchets radioactifs (COVRA) a reçu l'autorisation de construire un nouveau bâtiment d'entreposage provisoire d'uranium appauvri et d'agrandir l'installation nationale d'entreposage provisoire de déchets de haute activité (HABOG).

70. À la centrale nucléaire d'Ignalina, la Lituanie a commencé à exécuter des essais en inactif sur une installation de gestion et d'entreposage de déchets radioactifs solides conçue pour transformer les déchets que la centrale a produits dans le passé.

71. La Belgique a reçu du Royaume-Uni le dernier des 123 fûts contenant des déchets liquides à haute activité, immobilisés dans le ciment, résultant du retraitement de combustible usé. En attendant leur stockage définitif, ces déchets de niveau moyen à longue période seront entreposés à Dessel, dans une installation conçue à cet effet.

72. Au Centre de recherche atomique Bhabha (Inde), un processus de sorption mis au point récemment a permis de séparer de grandes quantités de césium 137 de déchets de haute activité pour produire des crayons de césium 137 vitrifié qui seront utilisés pour l'irradiation de sang.

73. Les enquêtes auxquelles a donné lieu l'événement radiologique survenu en février 2014 dans l'installation pilote de confinement des déchets du Nouveau-Mexique (États-Unis) ont permis de désigner l'incompatibilité des déchets (nitrates en contact avec de la matière organique) comme la cause la plus probable de l'incident. Cette conclusion rappelle combien il est important que tous les programmes de gestion des déchets radioactifs prévoient des procédures de caractérisation complètes et fiables afin que leur conformité avec les exigences relatives à l'acceptation des déchets soit assurée.

74. Le Royaume-Uni a inauguré une installation nationale, MIDAS, mise en place par l'université de Sheffield, en partenariat avec le Département britannique de l'énergie et du changement climatique, pour contribuer à la gestion des déchets radioactifs produits au cours du cycle du combustible nucléaire. Cette installation permet aux concepteurs de technologies d'avoir accès à des équipements de pointe, notamment à des laboratoires spécialisés dans la transformation des déchets à haute température, à des études du comportement à long terme de déchets conditionnés et à des analyses chimiques et radiochimiques.

75. Les mesures prises pour gérer les grandes quantités d'eau contaminée et les infiltrations d'eaux souterraines sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima continuent de porter leurs fruits. Ainsi, plus d'un million de mètres cubes d'eau ont été traités contre le césium, un des principaux polluants, et des dispositions sont prises pour que le renforcement des systèmes avancés de traitement des liquides permette aussi d'éliminer le strontium. Par ailleurs, la mise en service d'un système de détournement des eaux souterraines destiné à maîtriser les infiltrations d'eaux souterraines dans le bâtiment du réacteur et de la turbine a été couronnée de succès : en effet, ce système a permis de ramener ces infiltrations à environ 25 % (soit 100 m³) par jour. La construction du mur de glace autour des tranches 1 à 4 se poursuit.

Stockage définitif des déchets radioactifs

76. Des installations de stockage définitif destinées à toutes les catégories de déchets radioactifs, à l'exception des déchets de haute activité (DHA) et du combustible usé, sont en service partout dans le monde. Ainsi, on trouve des installations de stockage définitif en tranchées destinées aux DTFA (en Espagne, aux États-Unis, en France et en Suède, par exemple) ou, dans des régions arides, aux DFA (en Afrique du Sud, en Argentine, aux États-Unis et en Inde, notamment), des installations construites en surface ou à faible profondeur destinées aux DFA (comme en Chine, en Espagne, en France, 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, Finlande, en Hongrie et en Suède, notamment).

77. D'autres dépôts destinés aux DFMA sont à différents stades de la procédure d'autorisation, notamment en Allemagne (Konrad), en Belgique (Dessel), en Bulgarie (Radiana), au Canada (Kincardine), en Lituanie (Stabatiškės), en Roumanie (Saligny) et en Slovénie [Vrbina (Krško)].

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

79. En Finlande, l'organisation de gestion des déchets Posiva a reçu une autorisation de construction pour l'installation de stockage géologique du combustible nucléaire usé à Olkiluoto. Grâce à cette autorisation, les travaux de construction peuvent commencer vers la fin de 2016 et l'installation de stockage définitif devrait être opérationnelle en 2023.

80. En Suède, l'autorité chargée de la sûreté radiologique, à laquelle la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a présenté les résultats préliminaires de l'examen réglementaire en cours de sa demande d'autorisation, a déclaré que SKB avait prouvé qu'elle avait des chances de satisfaire aux normes en vigueur en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection.

81. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs élabore actuellement un rapport de sûreté, sous une forme synthétique, concernant Cigéo, son projet de stockage géologique de déchets de haute activité, en vue d'instruire sa demande d'autorisation de création, qu'elle prévoit de déposer en 2017.

82. Le projet canadien de construction d'un dépôt géologique profond destiné à des DFMA d'Ontario Power Generation sur le site nucléaire de Bruce, à Kincardine (Ontario), a fait l'objet en mai d'une recommandation favorable du groupe d'examen mixte, créé en 2012 pour examiner l'installation proposée. Face à l'opposition que les parties prenantes, préoccupées par la relative proximité du Lac Huron, ont manifestée dans le pays et par-delà les frontières, le Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique a reporté à 2016 la décision officielle, attendue en décembre 2015.

83. La Chine anticipe des besoins en matière de stockage géologique liés au retraitement de 140 000 tonnes de combustible usé provenant d'un parc de 48 réacteurs. Un tunnel est en construction à titre expérimental sur le site de Beishan, qui préfigure la construction d'une première installation souterraine de recherche dans le cadre de son programme de stockage géologique.

84. En Allemagne, la responsabilité du stockage définitif des déchets radioactifs a changé de mains depuis que deux organisations fédérales ont été créées, une société chargée de gérer les déchets nucléaires et un bureau chargé de réglementer la gestion de ces déchets. Afin de baliser l'évolution future du dépôt géologique profond du pays, une commission nationale créée en 2013 pour en choisir le site devrait, dès 2016, formuler des recommandations sur les critères de sélection des sites et les modalités de participation des parties prenantes et déterminer si d'autres modes de stockage géologique sont possibles.

85. En République islamique d'Iran, le dépôt en surface ou à faible profondeur destiné à des déchets de faible activité est en cours de mise au point sur le site de Talmesi. Le choix du site ayant été validé, l'installation d'entreposage centralisée y a été construite.

86. Le Japon a demandé à la société chargée de la gestion des déchets nucléaires de revoir les critères régissant le choix des sites des dépôts géologiques profonds destinés aux déchets de haute activité, et a organisé une campagne d'information visant à sensibiliser à ces questions.

87. En août, la République de Corée a inauguré son dépôt souterrain de type silo à Wolsong (fig. A-8). La deuxième phase de la construction de l'installation de stockage définitif a commencé ; elle devrait s'achever en 2019. Le site de Wolsong devrait abriter 800 000 fûts de déchets de faible activité et de déchets de moyenne activité et rester en service pendant 60 ans.

88. La Fédération de Russie avance sur la voie de la construction d'un dépôt géologique profond à Krasnoyarsk et a autorisé la construction d'une installation souterraine expérimentale pour étudier encore la formation de Nizhnekamsky.

89. Les deux premières casemates d'une nouvelle installation de stockage définitif de déchets de faible activité située à Dounreay, dans le nord de l'Écosse (Royaume-Uni), ont commencé à recevoir des déchets. Elles sont conçues pour contenir tous les déchets solides de faible activité et ceux résultant de la démolition consécutive au déclassement des réacteurs à neutrons rapides et des usines de retraitement du site, de manière à limiter au maximum le transport de déchets de cet emplacement reculé. Le dépôt de déchets de faible activité du site de Driggs a obtenu le renouvellement de son permis environnemental. En 2014, le gouvernement britannique a publié un livre blanc intitulé « *Implementing Geological Disposal* » (Le stockage géologique), qui définit un modèle de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité. Ce livre blanc trace les grandes lignes d'une méthode de recensement des sites envisageables d'une installation de stockage géologique, qui serait fondée sur une collaboration avec les populations intéressées et commencerait par une phase d'échanges avec les parties prenantes.

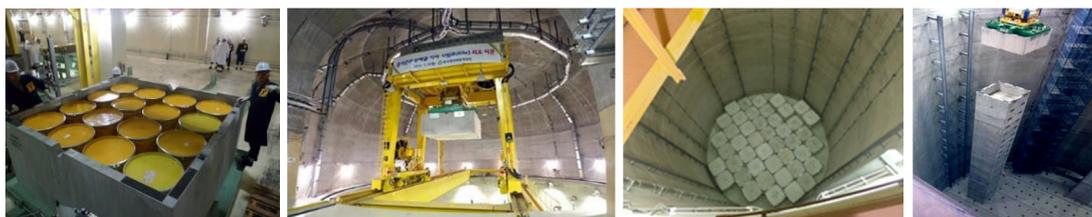


FIG. A-8. Conteneurs de déchets et premières activités de stockage définitif à Wolsong.
(Photos : Korea Radioactive Waste Agency)

90. Aux États-Unis, le Ministère de l'énergie a lancé un appel d'offres auprès des entités qui souhaitaient proposer un site d'essais, une entreprise de forage et une équipe de gestion du site dans l'optique du forage d'un puits expérimental de 5 000 mètres de profondeur prévu dans le cadre de la caractérisation du site. Il s'agira de creuser un (ou plusieurs) puits dans un socle de roches cristallines, à une profondeur d'environ 5 000 mètres, de placer des conteneurs de déchets à 3 000 mètres de profondeur puis de sceller le puits à la surface.

A.4. Sûreté

91. On a continué d'améliorer la sûreté des centrales nucléaires à travers le monde, notamment en tirant des enseignements de l'accident de Fukushima Daiichi, en améliorant l'efficacité de la défense en profondeur, en renforçant les capacités de préparation et de conduite des interventions d'urgence, en maintenant et en améliorant la création de capacités et en protégeant les personnes et l'environnement contre les rayonnements ionisants.

92. Les mesures prises par les États Membres, le Secrétariat et d'autres parties prenantes pour renforcer le dispositif de sûreté nucléaire ont continué de s'inscrire dans le cadre du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire. L'Agence a continué de partager et de diffuser les enseignements tirés de l'accident en analysant certains points techniques. Elle a organisé, en coopération avec l'Agence pour l'énergie nucléaire (OCDE/AEN), la réunion d'experts internationaux sur le renforcement de l'efficacité de la recherche-développement à la lumière de l'accident survenu à la centrale nucléaire de

Fukushima Daiichi, et la réunion d'experts internationaux sur l'évaluation et le pronostic face à une situation d'urgence nucléaire ou radiologique.

93. L'Agence a publié son rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi, qui comprend cinq volumes techniques détaillés. Ce rapport est le fruit d'une coopération internationale active entre cinq groupes de travail réunissant quelque 180 experts de 42 États Membres, dotés ou non de programmes électronucléaires, et de plusieurs organismes internationaux.

94. Donnant suite à la décision prise par les Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire lors de leur sixième Réunion d'examen, le Directeur général a organisé, en février, une conférence diplomatique qui avait pour objet d'examiner une proposition d'amendement de la Convention déposée par la Suisse. La Conférence a adopté à l'unanimité la Déclaration de Vienne sur la sûreté nucléaire, qui énonce des principes destinés à aider les Parties contractantes à mettre en œuvre les objectifs de la Convention, à savoir de prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et d'atténuer celles-ci le cas échéant.

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

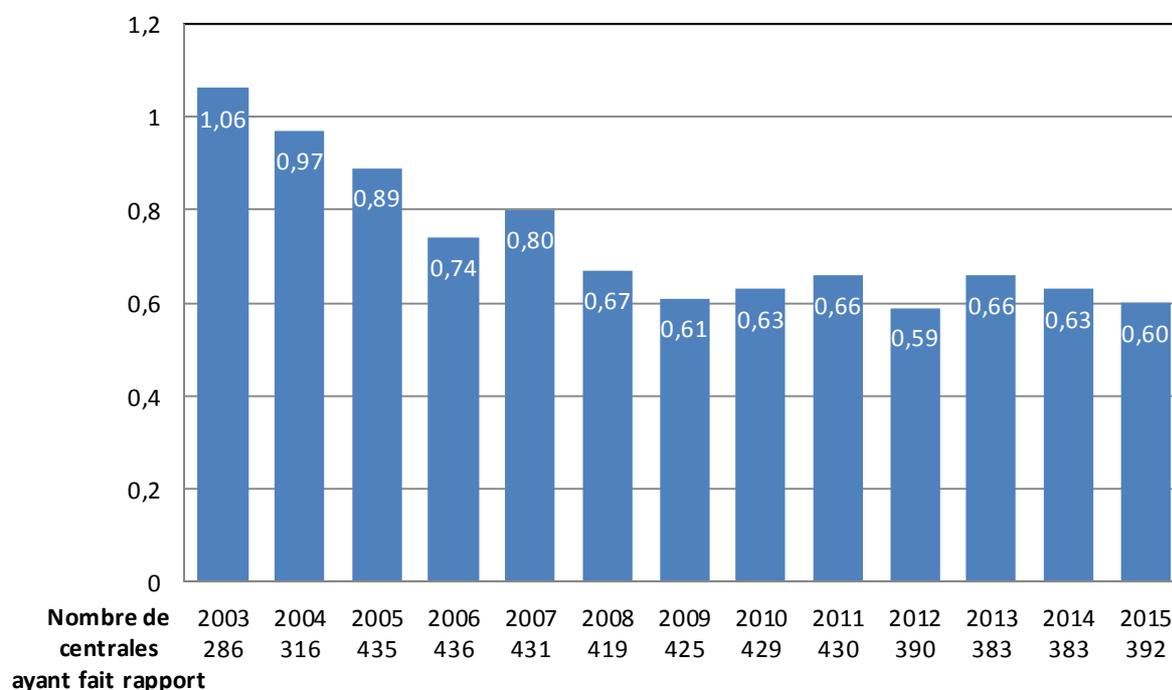


FIG. A-9. Taux moyen d'arrêts non programmés (automatiques ou manuels) : nombre d'arrêts non programmés par tranche, pour 7 000 heures d'exploitation. [Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance (<http://www.iaea.org/pris>)]

B. Fission avancée et fusion

B.1. Fission avancée

B.1.1. Réacteurs refroidis par eau

96. Les réacteurs refroidis par eau ont joué un rôle important dans l'industrie nucléaire commerciale depuis la première heure ; ils ont à leur actif plus de 16 000 années-réacteur d'expérience d'exploitation et représentent maintenant plus de 95 % de tous les réacteurs de puissance civils en service dans le monde. Soixante-trois des 65 réacteurs nucléaires en construction étaient des réacteurs à eau ordinaire ou des réacteurs refroidis par eau.

97. Parmi les principales évolutions dans le secteur des réacteurs refroidis par eau en 2015, on recense quatre nouvelles centrales, huit nouveaux réacteurs couplés au réseau, une augmentation de la puissance dans les centrales existantes et des facteurs de capacité en constante augmentation dans tous les types de réacteurs refroidis par eau ; des nouvelles centrales sont en outre projetées dans des pays qui n'exploitent pas encore de réacteurs commerciaux.

98. Pour accroître la capacité nucléaire d'un pays de façon compétitive sur le plan économique, il faut augmenter la puissance nucléaire autorisée des centrales existantes. Tous les réacteurs avancés refroidis par eau l'ont fait et la puissance des centrales construites récemment varie entre 1000 (fig. B-1) et 1600 MW par tranche. En outre, la tendance est clairement aux sites à plusieurs tranches avec un seul ou plusieurs types de réacteurs, soulignant l'importance des économies d'échelle pour les réacteurs nucléaires commerciaux.



FIG. B-1. Centrales nucléaires équipées de réacteurs VVER-1000 en construction sur le site nucléaire de Kudankulam. (Photo : AIEA)

99. Des modèles avancés de réacteurs refroidis par eau sont aussi de plus en plus envisagés, étudiés et mis en application dans plusieurs pays en vue de la mise en place progressive de cycles du combustible avancés et plus efficaces, en partie ou totalement fermés.

100. Plusieurs États Membres mènent actuellement des activités de recherche-développement (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 le réacteur chinois RESC (CSR1000) ont été achevées. En Europe, un concept de réacteur à eau ordinaire de haute performance européen a été lancé il y a quelques années. La Fédération de Russie effectue actuellement des études de fond sur les réacteurs VVER à eau supercritique en envisageant la possibilité d'un cœur à spectre rapide.

101. L'Agence continue de gérer et d'actualiser son Système d'information sur les réacteurs avancés, qui est une base de données contenant des informations fournies par les organismes responsables de la conception.

B.1.2. Systèmes à neutrons rapides

102. Depuis 1960, d'importants programmes de mise au point et de déploiement de réacteurs à neutrons rapides ont été mis en œuvre dans le monde entier et, ce faisant, les connaissances liées à ces réacteurs et aux technologies connexes du cycle du combustible sont devenues très pointues. On s'intéresse de plus en plus au niveau mondial à la mise au point de ces réacteurs en raison de leur capacité propre à fournir une source d'énergie qui soit à la fois efficiente, sûre, durable et propre.

103. Des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), des réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb-bismuth (SVBR) et des réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNR-G) sont actuellement mis au point aux niveaux national et international en conformité avec des normes plus élevées de sûreté, de durabilité, d'économie, de protection physique et de résistance à la prolifération. De plus, le concept de réacteur rapide à sels fondus (RSF) est envisagé comme une option à long terme.

104. La technologie des réacteurs à neutrons rapides la plus éprouvée, le RNR-Na, repose sur une expérience de plus de 400 années-réacteur acquise lors de la conception, de la construction et de l'exploitation de tranches de type expérimental, comme prototype, à des fins de démonstration ou d'utilisation commerciale dans divers 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.

105. La performance d'exploitation du réacteur russe RNR-Na BN-600 est impressionnante avec un facteur de charge de 86 % en 2014. Le RNR-Na BN-800 (fig. B-2) a été couplé au réseau en 2015. La dernière étape de la conception du réacteur innovant BN-1200 est achevée. En mai 2015, la construction du réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides refroidi au sodium a été autorisée par l'organisme de réglementation et les travaux préliminaires de génie civil sont terminés ; ce réacteur est supposé remplacer le réacteur BOR-60 en 2020. S'agissant de la technologie des métaux lourds liquides, les études techniques ont été achevées pour le BREST-OD-300 qui est un concept de RNR-Pb avancé, et le réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb-bismuth SVBR-100.

106. En Inde, le surgénérateur à neutrons rapides d'essai est en service depuis octobre 1985 ; la construction du prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe est achevée et la mise en service est en cours ; le prototype devrait diverger pour la première fois en 2016. L'Inde prévoit de construire deux surgénérateurs supplémentaires sur le même site.

107. À l'issue du premier stade de la mise au point de la technologie du surgénérateur, le réacteur rapide expérimental chinois a atteint une puissance de 100 % en décembre 2014. Il est prévu que le réacteur innovant CFR-600 entre en service en 2023. Le réacteur de recherche chinois à caloporteur plomb CLEAR-I est au stade de l'étude technique préliminaire.

108. Au Japon, le réacteur expérimental à neutrons rapides JOYO et le prototype de réacteur RNR-Na Monju sont en arrêt de longue durée. La phase II du programme de développement de la technologie d'un cycle pour réacteurs à neutrons rapides, qui prévoit la démonstration de technologies clés ainsi que l'étude de conception du réacteur japonais à neutrons rapides refroidi au sodium, est aussi suspendue.

109. En République de Corée, l'étude préliminaire du prototype de réacteur à neutrons rapides de quatrième génération refroidi au sodium est en cours et des activités complémentaires de R-D sont menées parallèlement. Le document d'information préliminaire sur la sûreté a été soumis à l'autorité de réglementation nucléaire du pays avant la fin de 2015.

110. En Europe, les concepts à l'étude sont les suivants : ASTRID, le projet industriel français de prototype de réacteur de quatrième génération RNR-Na ; ALFRED, le démonstrateur européen de

réacteur de quatrième génération RNR-Pb ; ALLEGRO, le RNR-G expérimental ; et MYRRHA, un réacteur de recherche pilote refroidi par mélange de plomb et de bismuth, couplé à un accélérateur de particules. La phase de l'étude de conception d'ASTRID sera terminée d'ici à la fin de 2015. MYRRHA en est à la deuxième phase de la conception technique de la partie initiale.

111. Aux États-Unis, en ce qui concerne les réacteurs à neutrons rapides, on s'attache essentiellement à renforcer les capacités techniques de base et à étudier certaines options technologiques innovantes. Le vaste ensemble de données expérimentales provenant de l'ancienne exploitation d'un certain nombre de RNR-Na expérimentaux, dont dispose le Département de l'énergie, lui permet d'appuyer des activités de R-D, notamment dans les domaines des matériaux avancés, de la sûreté et des combustibles innovants. Des entreprises privées étudient aussi des conceptions de réacteurs à neutrons rapides.

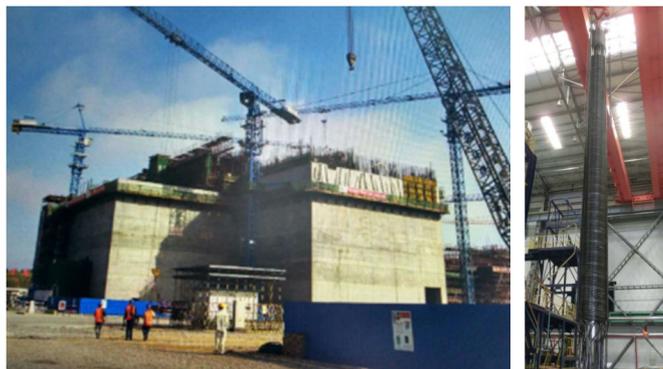


FIG. B-2. Le réacteur commercial à neutrons rapides BN-800 de la centrale nucléaire de Beloyarsk (Fédération de Russie) a été couplé au réseau en décembre 2015. (Photo : Rosenergoatom)

B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz

112. L'ère des réacteurs refroidis par gaz (RRG) de première génération a pris fin quand Wylfa 1, le dernier réacteur Magnox, a cessé d'être exploité à la fin de 2015. Le Royaume-Uni poursuit l'exploitation commerciale de 14 RRG avancés. De nombreux États Membres s'intéressent toujours à la mise au point de réacteurs à haute température refroidis par gaz (RHTRG). Les réacteurs de ce type utilisent du combustible à particules, peuvent atteindre un taux de combustion élevé, fonctionnent à des températures plus élevées ($\geq 700^{\circ}\text{C}$) et utilisent l'hélium comme caloporteur. Seule, la conception théorique de petits RHTRG modulaires est actuellement à l'étude pour que le réacteur puisse s'appuyer seulement sur des dispositifs de sûreté intrinsèques et non sur des systèmes techniques de sûreté actifs. Le déploiement à court terme pour la production d'électricité efficace et la cogénération destinées à un énorme marché de la chaleur industrielle est actuellement à l'examen.

113. En Chine, la construction et la fabrication des principaux composants du réacteur à haute température–Pebble Bed Module (HTR-PM) avancent bien (fig. B-3). Cette centrale industrielle de démonstration de 200 MWe, composée de deux tranches de réacteur de 250 MWth, devrait entrer en service d'ici la fin de 2017. Un modèle commercial de centrale de 600 MWe est en cours de conception et des sites possibles ont été identifiés. La technique de fabrication du combustible à l'échelle industrielle a été mise en place et des tests d'irradiation de la sphère de combustible effectués au niveau international ont été achevés en 2014, et des tests de conditions accidentelles ont été prévus. La construction et la mise en service de la nouvelle usine de fabrication de combustible à Baotou sont terminées et la fabrication devrait démarrer en 2016.



*FIG. B-3. Site de construction (à gauche) et le générateur de vapeur (à droite)
du HTR-PM dans la baie de Shidao, à Weihai (Chine)
(Photos : Institut de technologie de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles)*

114. En Indonésie, l'Agence nationale de l'énergie nucléaire a achevé l'étude de conception et le rapport préliminaire d'analyse de la sûreté du réacteur de puissance expérimental de 10 MWth à lit de boulets et a soumis l'évaluation initiale du site à l'organisme de réglementation. Le déploiement commercial futur de la cogénération est aussi prévu.

115. Au Japon, une fois que l'examen réglementaire en vue du redémarrage du réacteur expérimental à haute température (HTTR) de 30 MWth sera achevé, il est prévu de procéder à des tests complémentaires de démonstration et au couplage à une turbine à gaz à hélium et à une usine de production d'hydrogène.

116. Aux États-Unis, les activités concernant les RHTRG se sont poursuivies dans le cadre du programme sur les concepts de réacteurs avancés du Département de l'énergie. Elles sont axées sur la qualification du combustible, la qualification du graphite et des matériaux résistants aux températures élevées, les installations d'essai en vue d'illustrer les caractéristiques de sûreté passive et sur l'élaboration du cadre de délivrance des autorisations. Des entreprises privées mettent aussi au point des conceptions de réacteurs refroidis par gaz.

117. Certaines activités concernant les RHTRG sont en cours en Afrique du Sud, au Kazakhstan, en Ukraine et au sein de la Commission européenne. Les travaux préliminaires effectués pour pouvoir chauffer l'installation critique ASTRA à des températures différentes se poursuivent en Fédération de Russie et le premier test d'irradiation du combustible à particules a eu lieu en République de Corée.

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

118. Les réacteurs de faible ou moyenne puissance ou les petits réacteurs modulaires (RFMP) et leur utilisation suscitent un intérêt de plus en plus marqué. Au cours de la dernière décennie, l'accent a été mis sur les réacteurs avancés modulaires. Correspondant à des filières et à des types de caloporteurs importants, ils peuvent produire jusqu'à 300 MWe d'électricité et leurs composants peuvent être fabriqués en usine et transportés comme modules vers les sites ou les entreprises de services publics, suivant les besoins. Les principaux éléments moteurs du développement de ces réacteurs sont les suivants : nécessité de produire de l'électricité de manière souple pour un large éventail d'utilisateurs et d'applications, remplacement des centrales à combustibles fossiles vieillissantes, renforcement de la performance en matière de sûreté grâce à des dispositifs de sûreté passive et offre plus abordable économiquement. On dénombre environ 50 modèles et concepts de RFMP dans le monde. Ils sont pour la plupart à différents stades de développement et certains seraient utilisables à court terme. Toutefois, trois RHTRG sont en construction en Argentine, en Chine et en Fédération de Russie.

119. Un grand nombre de RFMP qui pourraient être déployés à court terme sont du type de réacteur à eau sous pression intégré. Trois RFMP sont à un stade de construction avancé : en Fédération de Russie, le KLT-40S, qui est une centrale nucléaire transportable de type REP ayant une capacité de 35 MWe par module, devrait produire de l'électricité et être couplé au réseau d'ici à 2019 ; en Argentine, un prototype de REP intégré utilisant la circulation naturelle et dont la capacité est de 31 MWe, appelé CAREM-25, devrait être prêt pour la mise en service, le démarrage et le réglage de la criticité en octobre 2018 ; et en Chine, le HTRPM refroidi par gaz comprenant deux réacteurs de 250 MWth devant produire 200 MWe devrait entrer en service d'ici la fin de 2017 comme centrale de démonstration industrielle.

120. En ce qui concerne les RFMP devant être implantés à court terme, en République de Corée, le réacteur avancé modulaire intégré (SMART), qui est un REP intégré ayant une capacité de 100 MWe, a reçu un agrément du modèle type de la part de la Commission de la sûreté et de la sécurité nucléaires du pays en 2012. En septembre 2015, un accord technique préparatoire a été signé en vue du déploiement d'un réacteur SMART en Arabie Saoudite.

121. En Chine, le réacteur ACP100, REP intégré ayant une capacité de 100 MWe, fait l'objet de l'examen générique de la sûreté des réacteurs par l'Agence. Une centrale de démonstration industrielle avec deux tranches de 310 MWth est prévue dans la Province du Fujian.

122. La Fédération de Russie possède plusieurs autres modèles de PRM pouvant être implantés à court terme pour des centrales nucléaires transportables flottantes, notamment le RITM200, devant produire 50 MWe, l'ABV6-M, PRM à circulation naturelle devant produire 6 MWe, et le VBER-300, d'une puissance électrique de 300 MWe.

123. Aux États-Unis, Nuscale Power prépare actuellement une demande de certification à la NRC pour son modèle de réacteur NuScale au dernier trimestre de 2016. Il s'agit d'un REP intégré utilisant la circulation naturelle constitué de 12 modules de réacteur ayant chacun une puissance électrique nette de 50 MWe. Un autre modèle de REP intégré est le réacteur à deux modules de BWX Technologies/Generation mPower de Bechtel, qui a une puissance nominale de 180 MWe par module. Le petit réacteur modulaire de Westinghouse devant produire 225 MWe et le Holtec SMR-160 à circulation naturelle devant produire 160 MWe sont aussi actuellement mis au point.

124. Au Japon, 4S (« Super-Safe, Small and Simple ») est un réacteur refroidi au sodium sans rechargement du combustible sur place. Le 4S est proposé avec deux puissances électriques : 30 et 135 MWth qui constituent une source d'énergie distribuée pour des applications polyvalentes. Le Modular Simplified and Medium Small Reactor (appelé aussi DMS) est un PRM de type BWR à circulation naturelle ayant une puissance électrique de 300 MWe.

125. De nombreux modèles de PRM sont au stade de l'étude de conception : en Inde, le AHWR300UFE, réacteur à eau lourde à tubes de force d'une capacité de 304 MWe et à circulation naturelle dans le circuit primaire, est à l'étude.

126. En France, Flexblue est un PRM transportable ancré dans un environnement sous-marin ayant une capacité de 160 MWe par module. Il est conçu de façon à pouvoir être exploité à distance depuis une salle de commande à terre.

127. Au Canada, le réacteur intégral à sels fondus (IMSR) est à l'étude et existe en trois modèles : IMSR80, IMSR300 et IMSR600 ayant une puissance électrique respective de 32,5MWe, 141 MWe et 291 MWe. Des réacteurs à sels fondus sont aussi conçus par des groupes commerciaux dans plusieurs autres pays.

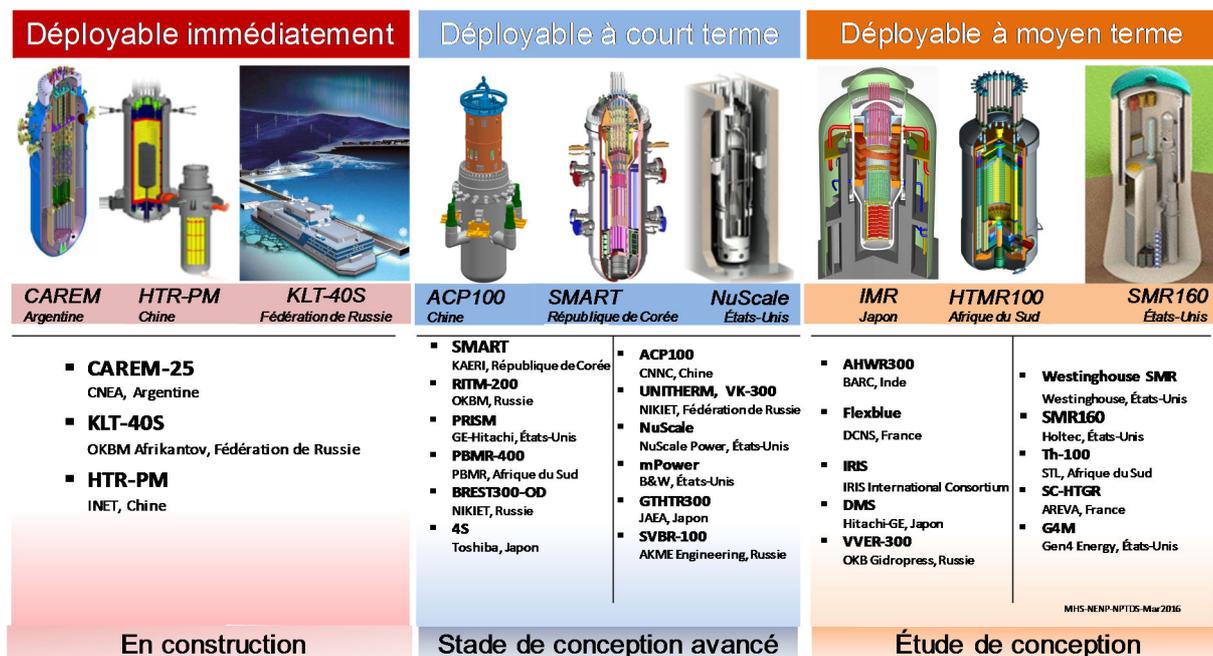


FIG. B-4. Stade de déploiement des PRM

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

128. Les préoccupations croissantes face à la disponibilité des ressources, au changement climatique et à la sécurité énergétique ont conduit au lancement au cours des dernières décennies d'un certain nombre d'initiatives portant sur des systèmes d'énergie nucléaire innovants.

129. Reconnaissant la nécessité de prendre des mesures pour s'assurer que l'énergie nucléaire est développée de manière durable, l'Agence a lancé le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) en 2000. En 2015, la Thaïlande est devenue le 41^e membre de l'INPRO qui regroupe les détenteurs et les utilisateurs de technologie pour qu'ils envisagent ensemble les mesures internationales et nationales requises pour apporter des innovations souhaitées dans les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible.

130. Trois manuels sur l'évaluation de la durabilité, qu'il s'agisse de l'économie, de l'infrastructure ou des effets sur l'environnement, dont l'épuisement des ressources, ont été publiés en 2014-2015 sous forme de rapports dans la collection Énergie nucléaire de l'AIEA. Des évaluations des systèmes d'énergie nucléaire fondées sur la méthodologie INPRO sont en cours en Indonésie, en Roumanie et en Ukraine.

131. Le Forum international Génération IV (GIF) est une initiative de coopération internationale organisée pour effectuer les travaux de R-D nécessaires pour déterminer la faisabilité et les capacités de performance de la prochaine génération de réacteurs nucléaires. Composé de 13 membres, ce forum se concentre sur six systèmes d'énergie nucléaire décrits dans son document *Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems* publié en 2002 et actualisé en 2013 : RNR-G, réacteurs à très haute température (RTHT), RESC, RNR-Na, RNR-Pb et RSF.

132. Les membres du GIF qui souhaitent mettre en œuvre des projets de R-D portant sur un ou plusieurs systèmes retenus participent à des projets de R-D communs comportant des résultats attendus, des étapes et des échéances bien définis et dans un cadre contractuel clairement défini.

133. Les membres du GIF et de l'INPRO organisent chaque année des réunions de coordination axées sur des méthodologies d'évaluation spécifiques sur les aspects économiques, la résistance à la

prolifération, le risque et la sûreté. Ils échangent également des informations sur les projets en cours portant sur les six technologies des réacteurs retenues.

134. Une autre activité importante lancée en 2011 par le GIF en coopération avec l'Agence dans le domaine des RNR-Na a consisté à établir des critères de conception de la sûreté et à s'efforcer de les harmoniser avec les lignes directrices relatives à la conception aux fins de la sûreté entre les organismes de conception représentés au sein du GIF et de quantifier le niveau de sûreté élevé que devraient avoir les systèmes de RNR-Na de quatrième génération. Une première version de ces critères a été publiée en 2014. L'élargissement de cette activité à d'autres systèmes de quatrième génération comme les RTHT et les RNR-Pb est à l'étude.

135. La plate-forme technologique pour une énergie nucléaire durable (SNETP), lancée dans l'Union européenne (UE) en 2007, promeut la recherche, le développement et la démonstration des technologies de fission nucléaire nécessaires à la réalisation du Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques. Le programme stratégique de la recherche et de l'innovation et la stratégie de déploiement de la SNETP ont été récemment actualisés. La SNETP regroupe plus de 100 parties prenantes européennes de l'industrie, de la recherche, du monde universitaire, d'organismes de sûreté technique, d'organisations non gouvernementales ainsi que des représentants nationaux.

136. Dans le cadre de la SNETP, l'Initiative européenne pour une industrie nucléaire durable (ESNII), lancée par l'UE en 2010, répond à la nécessité pour l'Europe de démontrer les technologies du réacteur à neutrons rapides de quatrième génération, ainsi que les infrastructures de recherche, les installations de combustible et les travaux de R-D à l'appui de ces technologies. Cette initiative est axée sur la mise au point de deux technologies parallèles : la technologie du réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium comme solution de référence, avec la construction en France aux alentours de 2020 d'un prototype qui appuiera fermement cette technologie (ASTRID) ; et les technologies du réacteur européen avancé de démonstration à neutrons rapides à caloporteur plomb (ALFRED) et du réacteur à neutrons rapides refroidi par gaz (ALLEGRO). En outre, une installation d'irradiation refroidie au plomb-bismuth (MYRRHA) appuiera le déploiement de la technologie des réacteurs à neutrons rapides, notamment le recyclage des actinides pour la transmutation.

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

137. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour des applications non électriques, comme 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 grand intérêt dans plusieurs États Membres.

138. Les technologies requises pour la cogénération (à savoir l'électricité et la production de chaleur industrielle, voir la figure B.5) ont été déjà démontrées et éprouvées. Dans le domaine de la cogénération nucléaire, une vaste expérience a été acquise en matière de chauffage urbain et de dessalement de l'eau de mer, avec une expérience totale accumulée supérieure à 750 années d'exploitation de 74 réacteurs nucléaires. Les centrales nucléaires de production d'électricité fonctionnant selon le principe de la cogénération nucléaire peuvent accroître l'efficacité thermique globale de plus de 30 %, réduire le coût de production d'électricité de 20% et améliorer la flexibilité du réseau électrique. Quand des systèmes énergétiques avancés et innovants conçus pour des températures du caloporteur à la sortie très élevées seront disponibles, un certain nombre de procédés industriels comme la production d'hydrogène qui nécessitent de la chaleur ou de la vapeur à haute température bénéficieront d'une source d'énergie très fiable, abondante et durable.

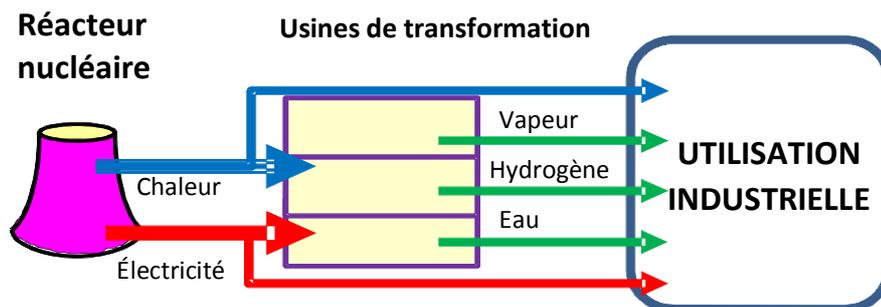


FIG. B-5. Schéma général du couplage d'un réacteur nucléaire à une installation industrielle sur le site

139. La Fédération du Russie a signé récemment des accords avec l'Algérie, l'Égypte, et la Jordanie et est en discussion avec l'Arabie Saoudite pour l'utilisation de l'électronucléaire pour le dessalement de l'eau de mer. L'Arabie Saoudite a signé un mémorandum d'accord avec la République de Corée pour deux REP SMART de 330 MWe qui seront utilisés pour la cogénération, notamment le dessalement de l'eau de mer, et discute avec la France de futurs projets de dessalement de l'eau de mer faisant appel à l'énergie nucléaire. Les deux REP de la centrale de Diablo Canyon en Californie peuvent produire près de 1,5 millions de gallons par jour d'eau potable mais ils n'utilisent que 40 % de cette capacité pour la consommation sur place. Ses licences d'exploitation ayant été prolongées jusqu'en 2024 et 2025 et compte tenu des conditions rudes récentes comme la sécheresse, l'exploitant a accepté en mai 2015 de fournir de l'eau au pays hôte pour l'aider à lutter contre les incendies de forêts. Il est aussi envisagé d'intégrer cette eau potable dans les réseaux publics de distribution d'eau.

140. La production d'hydrogène fait l'objet d'un large éventail d'activités, notamment aux États-Unis et dans l'UE. Le but est permettre l'application de l'énergie nucléaire au secteur des transports et de réduire la dépendance actuelle à l'égard des combustibles fossiles avec la volatilité des prix, la limitation des ressources disponibles et les émissions de gaz à effet de serre qui vont de pair. Des programmes de recherche-développement sont en cours dans plusieurs pays et une certaine expérience des applications à haute température de l'énergie nucléaire a été acquise à l'échelle expérimentale et résulte aussi des essais de composants effectués dans le cadre des programmes RHTRG précédents. Après avoir développé et exploité le HTTR de 30 MWth, le Japon tire parti de ce réacteur pour mettre au point un projet pour faire la démonstration de la cogénération (électricité produite par une turbine à gaz et hydrogène produit par séparation thermochimique des molécules d'eau). Le système devrait entrer en service en 2022. Le projet a pour but de mettre au point la technologie du système ainsi qu'une base de données sur les licences requises pour la construction prévue en 2030 du modèle commercial du réacteur GT-HTR300 pour la production d'hydrogène par cogénération et le dessalement. Le HTR-PM, en chantier en Chine, peut être utilisé pour produire de la vapeur industrielle ou de l'hydrogène. D'autres activités de R-D auxquelles participent des entreprises se poursuivent au Canada, en Inde, en République de Corée, etc.

141. La politique énergétique de l'UE et l'objectif principal de décarbonation à l'horizon 2050 pourrait faire de l'Europe le premier endroit où la cogénération nucléaire se ferait sur une grande échelle. Vu l'importance de son marché industriel, l'Europe s'intéresse de plus en plus à l'utilisation de la cogénération nucléaire dans les raffineries, les usines chimiques et dans d'autres industries où les usines de cogénération à combustibles fossiles peuvent être directement remplacées par des réacteurs nucléaires offrant dans le même temps de grandes quantités de vapeur et d'électricité. Une étude effectuée en France a montré que des réacteurs actuellement en service pourraient être facilement modifiés pour approvisionner de manière efficiente des réseaux de chauffage à grande échelle. Cela permettrait d'ouvrir de nouvelles perspectives dans la gestion de l'énergie et de contribuer à l'avenir à de substantielles économies d'énergie.

B.2. Fusion

142. La production d'énergie grâce à la fusion nucléaire est largement considérée comme le défi monumental du XXI^e siècle sur le plan technique. Avec le lancement du projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) en 2006, la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'UE ont associé leurs efforts pour démontrer la faisabilité scientifique et technologique et les dispositifs de sûreté de la production d'énergie de fusion de plus de 500 MW à des fins pacifiques.

143. Après des années de travail acharné, toutes les parties au projet ITER en récolte les fruits car l'installation prend forme et progresse sur tous les fronts. L'achèvement du premier niveau du complexe Tokamak (ayant une superficie de 9 600 m² et une épaisseur de 1,5 m en béton armé constitué de quatre couches successives – deux de 50 cm, une de 30 cm et une de 20 cm) au quatrième trimestre de 2014 a marqué la fin d'un gros contrat de travaux de génie civil et le commencement de la phase de construction (fig. B-6).



FIG. B-6. Vue aérienne du site de construction d'ITER en août 2015 (à gauche). Le 21 octobre 2015 (à droite), le segment de 200° du bouclier de protection thermique, l'« anneau » de 3,2 mètres d'épaisseur qui entourera la machine était construit (Photos : ITER).

144. ITER, dont l'infrastructure est conforme aux prescriptions françaises en matière de sûreté nucléaire, sera la plus grande installation nucléaire en France et la première installation de fusion jamais réalisée dans le monde. En mai 2015, le projet a franchi une étape dans la construction au moment où les premiers composants de la centrale – deux des quatre transformateurs électriques qui coupleront le réseau de 400 kV au réseau de distribution de courant alternatif – ont été installés à leur emplacement permanent.

145. Même si les partenaires font face aux formidables défis que représente ITER, le besoin de comprendre les problèmes scientifiques et techniques pour l'après ITER, et la nécessité de commencer à les résoudre dès maintenant, est apprécié par tous. Collectivement, les activités destinées à mettre au point des solutions permettant de tirer parti de l'énergie de fusion comprennent un « programme de centrale de démonstration (DEMO) ».

146. Le troisième atelier au titre du programme DEMO de l'Agence a eu lieu du 11 au 15 mai 2015 sur le campus de l'Université des Sciences et des Technologies de Hefei (Chine), l'objectif étant d'examiner un sous-ensemble de questions clés dans les domaines scientifique, technique et programmatique (DEMO) et de définir les installations et les activités du programme qui pourraient permettre de les régler. Cet atelier avait pour but connexe de recenser les possibilités de progresser encore grâce à la collaboration internationale.

147. Les résultats de l'atelier ont indiqué que la principale contribution d'ITER au programme de fusion sera de faire progresser la compréhension de la physique d'un plasma en combustion. En outre, ITER permettra de progresser sensiblement sur des questions délicates relatives à la stabilité et au

contrôle du plasma, y compris la prévision et la prévention ou l'atténuation de disruptions majeures du plasma et le contrôle des instabilités de bord.

148. S'agissant de la technologie de dissipation de la puissance dégagée par le plasma, ITER permettra d'établir les effets de l'exposition à long terme au plasma de composants faisant face au plasma comme l'endommagement par ions des matériaux de revêtement de la première paroi et de l'écorceur. Pour autant que DEMO utilise des systèmes de chauffage et de génération de courant similaires à ceux d'ITER, ITER fera des démonstrations directes de la faisabilité technique de plusieurs composants clés. Pour finir, ITER contribuera à la technique de la couverture dans le cadre du programme de modules de test de couverture. L'expérience montre que l'étude technique et l'analyse de l'intégration devraient être aussi détaillées que possible et toutes les validations et qualifications devraient être établies avant la remise de l'analyse préliminaire de la sûreté à l'organisme de réglementation. ITER fournira une base de données complète sur la physique et la technologie que les concepteurs de DEMO utiliseront et qui appuiera l'analyse requise pour répondre au besoin de précision dans l'analyse préliminaire de la sûreté.

149. Plusieurs parties au projet ITER ont porté leur attention sur des études consacrées à des dispositifs intégrés pour l'après ITER. Contrairement à ITER, ces études sont réalisées au niveau national et ne sont actuellement qu'au stade de la préconception. On trouvera dans le tableau B-1 un descriptif résumé de ces quatre dispositifs, tels que présentés lors de l'atelier.

	UE DEMO	JA DEMO	K-DEMO	CFETR (Phase I)
Mission	Production nette d'électricité ($Q_{eng} > 1$) Autonomie en tritium	Production nette d'électricité ($Q_{eng} > 1$) Autonomie en tritium	Production nette d'électricité ($Q_{eng} > 1$) Autonomie en tritium Essai de matériaux et de composants dans un environnement de fusion	Essai de matériaux et de composants dans un environnement de fusion Cycle complet du combustible tritium
P_{fus}	2000 MW	1500 MW	≥ 300 MW	50-200 MW
TBR	$> 1,0$	> 1.05	> 1.0	≥ 1.0
Durée d'impulsion	2 heures	2 heures jusqu'au régime permanent	Régime permanent	1000 s jusqu'au régime permanent
Facteur d'utilisation	$\sim 70\%$			30-50%
P_{elec}	500 MW	200-300 MW (net)	≥ 150 MW (net)	Données non disponibles
Surgénération du tritium	À déterminer – Surgénérateur au plomb solide et liquide à l'étude	Surgénérateur à métal solide, technologie REP	Surgénérateur à métal solide, technologie REP	Surgénérateur à métal solide, technologie REP, fermeture du cycle du tritium à l'échelle $\sim 1/10$ DEMO
Configuration magnétique	Tokamak	Tokamak	Tokamak	Tokamak
Maintenance	Télémanipulation	Télémanipulation	Télémanipulation	Télémanipulation

Tableau B-1. Mission actuelle et objectifs de performance des dispositifs de fusion intégrés dont la prochaine étape est prévue après ITER. UE DEMO (Europe) ; JA DEMO (Japon) ; K-DEMO (République de Corée) ; CFETR (Chine) ; P_{elec} = puissance électrique ; P_{fus} = puissance de fusion ; Q_{eng} = facteur d'amplification de la puissance mécanique ; TBR = rapport de surgénération du tritium.

150. Ces études peuvent permettre de faire des progrès impressionnants sur la voie d'une DEMO d'ici au milieu du siècle, mais il sera nécessaire de mesurer quantitativement les progrès escomptés par rapport à un ensemble complet de paramètres de l'état de préparation de DEMO pour pouvoir évaluer

les éventuelles lacunes restantes même si tous ces projets ont été menés à bien. Il conviendrait de noter qu'il y a généralement des lacunes pour ces machines elles-mêmes, surtout dans les dernières phases, qui nécessitent des activités de R-D à court terme.

151. Il existe des questions en suspens sur certains points clés comme la physique et le contrôle du plasma en combustion, les matières et les technologies des composants, la disponibilité de la machine et les options de configuration magnétique. Il était généralement admis qu'aucun dispositif ne soit, à lui seul, susceptible de résoudre tous les problèmes de DEMO en même temps mais on ne sait pas clairement combien il faudrait de machines ni à quel point un portefeuille optimal devrait être diversifié. Il serait donc apparemment très intéressant de mettre en œuvre une stratégie internationale de planification et coordination des travaux pour mieux couvrir les besoins de DEMO qui à l'heure actuelle ne sont pas suffisamment pris en compte, en vue de réduire les doubles emplois et d'être mieux à même de réagir face à des difficultés techniques ou à des retards.

C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

C.1.1. Accélérateurs de protons de haute énergie

152. La demande d'accélérateurs de faisceaux de protons ou d'ions de forte puissance est en augmentation dans divers domaines, tels que la physique des particules, la physique nucléaire et la physique utilisant des neutrons, ainsi que pour la transmutation des déchets nucléaires à longue période. Ces applications exigent généralement des faisceaux de puissance moyenne très élevée et de très haute énergie, de l'ordre du GeV, laquelle dépasse considérablement la capacité de la plupart des installations existantes. La figure C-1 montre les projets actuels et planifiés qui tendent vers des puissances de faisceaux de l'ordre de 10 MW.

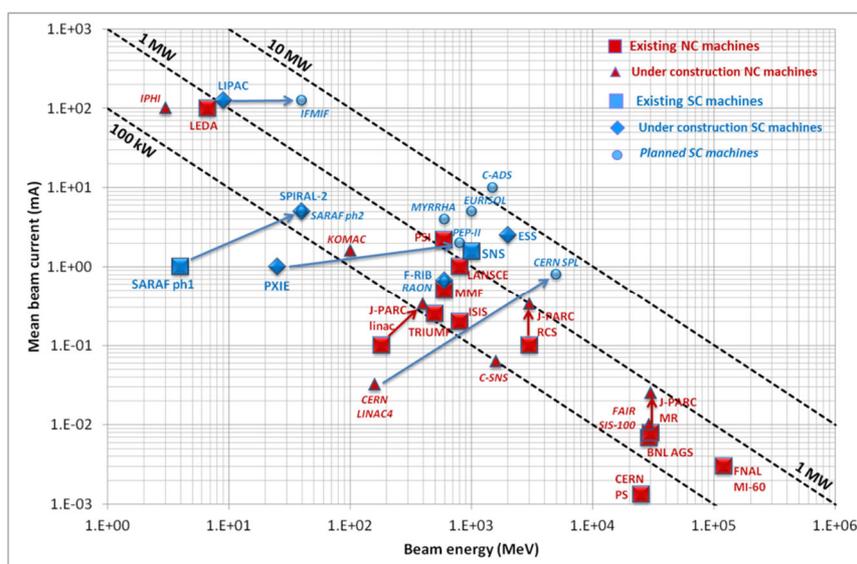


FIG. C-1. : Projets de faisceaux de protons/neutrons de haute puissance dans le monde. Source : Jean-Luc Biarrotte, Institut de physique nucléaire, Orsay, France ; tiré de : BIARROTTE, J.-L., High power proton/deuteron accelerators, Comptes rendus de la seizième Conférence internationale sur la supraconductivité RF, Paris, France, 2013, site web JACoW (Joint Accelerator Conferences Website) (2014) 35-41.

153. Les systèmes hybrides (ADS) sont des solutions envisageables pour des installations de transmutation spéciales basées sur un accélérateur linéaire de protons, supraconducteur, de plusieurs MW, avec des capacités améliorées en matière de fiabilité. Le projet belge MYRRHA, cofinancé notamment par l'Union européenne et le projet chinois ADS, donnent des occasions de faire la démonstration de la technologie ADS à haute puissance dans un délai de 10 à 15 ans.

C.1.2. Feuille de route sur les techniques par faisceaux d'ions

154. Les techniques par faisceaux d'ions (IBT) reposant sur un accélérateur englobent un ensemble de techniques analytiques et de techniques de modification, dans lesquelles des faisceaux énergétiques (0,1-100 MeV) de particules chargées ($Z = 1, 2$ et plus) sont dirigés vers un matériau à analyser ou à modifier. Ces techniques sont utilisées depuis plus de 50 ans, et la majeure partie des données, des machines et des principes physiques sous-jacents sont parvenus à maturité. Les progrès des IBT ont eu des retombées dans de nombreux domaines (fig. C-2) – par exemple, des études climatiques utilisant des isotopes cosmogènes, l'élaboration de matériaux améliorés, la compréhension du vieillissement des composants des réacteurs et le développement de l'hadronthérapie, qui est susceptible d'avoir des conséquences considérables en matière de santé humaine.

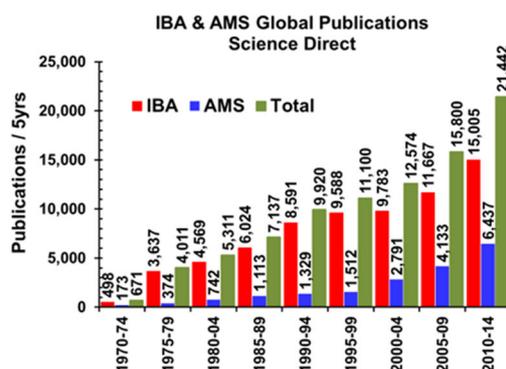


FIG. C-2. : Une tendance à la hausse du nombre de publications relatives à l'utilisation des techniques par faisceaux d'ions. (Publiée avec l'aimable autorisation de David Cohen, Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires) (IBA : analyse par faisceaux d'ions ; AMS : spectrométrie de masse par accélérateur).

155. L'Agence joue un rôle moteur dans la coordination de l'élaboration d'une feuille de route IBT, qui englobera des aspects de planification stratégique à moyen terme (de 5 à 15 ans) de la science des accélérateurs et des technologies associées. Des discussions approfondies entre experts internationaux ont débouché sur le premier projet, établissant les priorités en matière de progrès technologiques et définissant les paramètres de mesure correspondants. La feuille de route IBT devrait être présentée sous sa forme définitive en 2016. Les documents pertinents peuvent être consultés sur le Portail des connaissances sur les accélérateurs de l'Agence :

<https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>.

C.1.3. Techniques par rayons X pour la caractérisation des matériaux et l'imagerie

156. Le rayonnement synchrotron est utilisé depuis plus de 30 ans pour faire progresser les connaissances fondamentales en science pluridisciplinaire et promouvoir les applications technologiques. La quatrième génération de sources de lumière synchrotron offrira de nouvelles possibilités aux scientifiques. Les projets actuels comprennent MAX IV à Lund, en Suède (qui devrait être pleinement opérationnel à partir de 2016) et Sirius, au Brésil (mise en service prévue en 2018). Les progrès récents de la technologie des accélérateurs permettent d'obtenir un rayonnement de faible émittance, et ainsi une luminosité élevée et une meilleure cohérence. Des progrès décisifs sont attendus dans le domaine de l'imagerie par rayons X à haute résolution, p. ex. la ptychographie, où la reconstruction de l'image avec des résolutions spatiales bien supérieures à celles offertes par les

techniques traditionnelles est possible. Ces nouvelles sources de rayonnement synchrotron favorisent le développement parallèle de détecteurs avancés de rayons X à pixels, à dispersion d'énergie ou à compteur unique.

157. Un bon exemple en est le détecteur Maia par fluorescence X à barrettes de 384 diodes au silicium, dont la démonstration a déjà été faite sur différentes lignes de faisceaux synchrotron pour la fourniture, de manière rapide, d'images élémentaires et d'observations de la spéciation chimique. L'imagerie par macrofluorescence X, avec une résolution spatiale ajustée par la taille du faisceau synchrotron incident, a trouvé une application de premier plan dans l'examen des systèmes biologiques et des objets d'art (fig. C-3). Parallèlement, des développements en optique des rayons X et l'élaboration de méthodologies pertinentes peuvent également permettre une analyse résolue spatialement de spécimens de grande surface lors de l'irradiation par des faisceaux de rayons X relativement larges. Le concept de caméras plein champ pour rayons X est en train d'émerger de façon prometteuse en tant que méthode d'analyse pouvant être adaptée aux sources de rayonnement synchrotron, aux lignes de faisceaux d'émission X induite par des particules ou aux spectromètres portables à fluorescence X (fig. C-4).

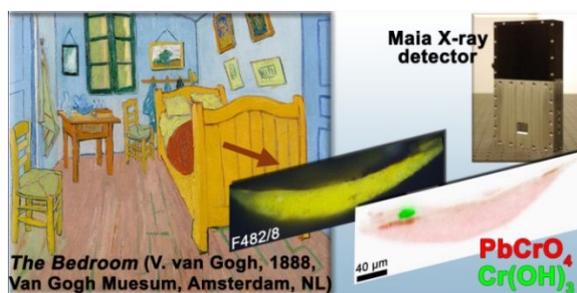


FIG. C-3. : D'après : MONICO, L., et al., "Full spectral XANES imaging using the Maia detector array as a new tool for the study of the alteration process of chrome yellow pigments in paintings by Vincent van Gogh", *J. Anal. At. Spectrom.* **30** (2015) 613–626.

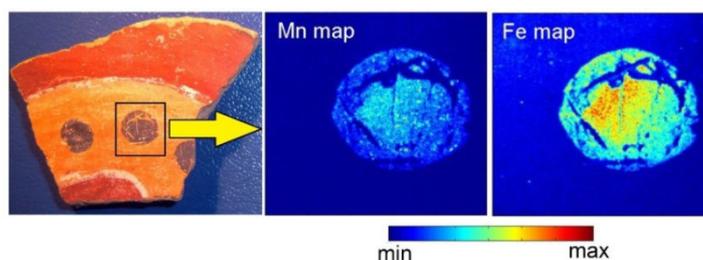


FIG. C-4. Analyse plein champ par émission X induite par des particules d'une décoration noire au manganèse sur une poterie polychrome de la culture Nazca (Pérou) à l'Institut national de physique nucléaire (Italie).

C.1.4. Techniques combinées par faisceaux d'ions et de neutrons pour la détermination des empreintes des éléments en trace et des molécules

158. L'utilisation des techniques par faisceaux d'ions et de neutrons pour l'analyse des éléments en trace n'est plus à démontrer, et ce type de services est disponible par l'intermédiaire de laboratoires accrédités dans un certain nombre d'États Membres exploitant des accélérateurs ou des réacteurs de recherche. Les applications sont notamment les suivantes : analyse des cheveux, des ongles, de la peau, des matières végétales et animales à des fins médicales ou biomédicales ; détermination de la provenance des verres, des produits agricoles/alimentaires et des objets du patrimoine culturel ; identification de sources de munitions, de résidus de poudre, de balles et d'explosions nucléaires ; et détermination et suivi de la pollution environnementale.

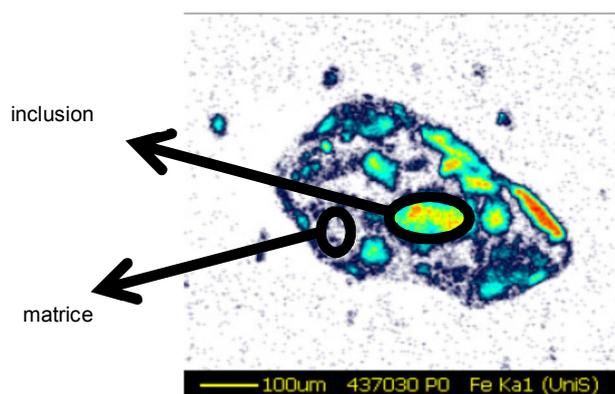


FIG. C-5. Image élémentaire bidimensionnelle d'un échantillon d'α quartz mesuré par faisceaux d'ions focalisés. Les inclusions de fer peuvent être bien séparées de la matrice en permettant de sélectionner la zone de détermination de la stœchiométrie, ce qui est très utile pour l'identification de la provenance. (Publiée avec l'aimable autorisation de Melanie Baley, Université de Surrey, Royaume-Uni).

159. L'Agence aide à la mise en place d'une approche multi-analytique en exploitant les synergies entre les méthodes par faisceaux d'ions et par faisceaux de neutrons pour l'analyse de haute précision des éléments en trace et des molécules. En outre, la cartographie haute résolution en deux ou trois dimensions des éléments en trace dans des objets « réels » (p. ex. des objets ayant une rugosité de surface ou des échantillons humides) sera mise au point afin de déterminer la provenance des matériaux (fig. C-5).

C.2. Réacteurs de recherche

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

Tableau C-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde⁴.

Type d'application ^a	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^b	États Membres dotés d'installations en service
Formation théorique/pratique	173	54
Analyse par activation neutronique	124	54
Production de radio-isotopes	89	44
Irradiation de matériaux/de combustible	73	28
Neutronographie	71	40
Diffusion neutronique	48	32
Transmutation (dopage de silicium)	26	17
Géochronologie	27	23

⁴ Source : Base de données de l'Agence sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

Transmutation (pierres précieuses)	18	10
Neutronthérapie, essentiellement de la R-D	18	12
Autres ^c	128	36

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

^b Sur les 265 réacteurs de recherche considérés (246 en service, 19 en arrêt provisoire ; en novembre 2015).

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

161. À ce jour, 754 réacteurs de recherche ont été construits dans 67 pays, et 246 étaient exploités dans 55 pays au 31 décembre 2015. La Fédération de Russie possède le plus grand nombre de réacteurs de recherche en service avec 63, suivie des États-Unis d'Amérique (42), de la Chine (17) et de la France (10). De nombreux pays en développement possèdent aussi des réacteurs de recherche (par exemple, il y en a huit en service en Afrique). Il y a dans le monde 58 réacteurs de recherche fonctionnant à des niveaux de puissance supérieurs à 5 MW et qui offrent donc des flux de neutrons élevés supportant des applications à haute capacité.

162. De nombreux réacteurs de recherche en exploitation présentent encore un faible facteur d'utilisation, et la moitié d'entre eux a plus de 40 ans de service. La majorité nécessite donc des efforts continus de planification stratégique détaillée en ce qui concerne l'utilisation, la gestion du vieillissement, la modernisation et la rénovation. Des efforts croissants sont déployés en vue d'améliorer l'utilisation et d'augmenter les revenus. Au cours des deux dernières années, 33 installations de réacteurs de recherche ont élaboré et présenté des plans stratégiques à l'Agence pour examen. L'Agence a également révisé ses lignes directrices sur la planification stratégique des réacteurs de recherche en incluant des aspects liés à des projets de nouveaux réacteurs de recherche ou de rénovation importante, ainsi qu'en partageant des données d'expérience concernant des installations bien exploitées au travers de nombreux exemples. Entre autres, la collaboration internationale se poursuit en vue de promouvoir et d'améliorer l'utilisation des réacteurs de recherche pour la formation théorique et pratique. C'est ainsi que le projet Internet Reactor Laboratory en Amérique latine et en Europe vise à mettre en relation des universités avec des réacteurs de recherche en service à des fins de formation théorique et pratique. Le projet a démarré en Amérique latine en septembre 2015 (avec l'Argentine comme pays hôte), puis en Europe et en Afrique en octobre 2015 (avec la France comme pays hôte).

163. Plusieurs pays se trouvent à différents stades de construction de nouveaux réacteurs de recherche comme installations nationales clés pour le développement de l'infrastructure et des programmes de science et de technologie nucléaires, y compris d'électronucléaire. De nouveaux réacteurs de recherche sont en construction en Argentine, en Arabie saoudite, au Brésil, en Fédération de Russie, en France, en Inde, en Jordanie et en République de Corée. Plusieurs États Membres ont des plans officiels de construction de nouveaux réacteurs de recherche, y compris le Bélarus, la Belgique, l'État plurinational de Bolivie, les États-Unis d'Amérique, les Pays-Bas et le Viet Nam. D'autres, comme l'Afrique du Sud, l'Azerbaïdjan, le Bangladesh, l'Éthiopie, le Ghana, le Koweït, le Liban, la Malaisie, la Mongolie, le Myanmar, le Nigeria, la République-Unie de Tanzanie, le Soudan, le Tadjikistan, la Thaïlande et la Tunisie, envisagent la construction de nouveaux réacteurs de recherche⁵. Une coopération internationale s'est établie pour la construction de réacteurs de recherche polyvalents, comme le réacteur Jules Horowitz en France et le réacteur MBIR en Fédération de Russie.

⁵ La publication de l'Agence intitulée *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (n° NP-T-5.1 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA, Vienne, 2012) et un ensemble de documents complémentaires visent à aider les États Membres dans ce domaine.

164. Les réseaux et les groupements régionaux de réacteurs de recherche, facilités par l'Agence⁶, aident à renforcer la coopération internationale et à permettre aux réacteurs de recherche d'élargir leurs communautés de parties prenantes et d'utilisateurs. En outre, l'Agence a lancé en 2014 un nouveau mécanisme de collaboration, à savoir le Centre international désigné par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR). En 2015, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France) a été désigné en tant que premier ICERR pour ses centres de recherche de Saclay et de Cadarache, tandis que d'autres organisations devraient poser leur candidature en 2016.

165. En 2015, le Bureau de gestion et de réduction des matières nucléaires du Ministère de l'énergie des États-Unis, qui a succédé à l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale, a poursuivi sa mission visant à réduire le plus possible l'utilisation d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur nucléaire civil. Jusqu'à la fin de 2015, 94 réacteurs de recherche dans le champ d'application de ce Bureau avaient été convertis à l'utilisation d'UFE ou confirmés comme étant à l'arrêt, y compris une installation de production de molybdène 99 qui utilisait de l'UHE. Les principales réussites comprennent le chargement en Jamaïque du cœur à l'UFE dans le réacteur Slowpoke-2, le déchargement du combustible à l'UHE du prototype chinois de réacteur source de neutrons miniature (RSNM) en préparation pour la conversion d'uranium, et l'insertion d'assemblages russes d'essai UFE à l'uranium et au molybdène dans le réacteur de l'Institut de radiologie Mallinckrodt à Dimitrovgrad pour irradiation. L'Agence a continué à appuyer les efforts déployés par le Ghana en vue de la conversion et du transfert du cœur de son RSNM à l'UHE, prévus en 2016.

166. Les activités de réduction de l'uranium hautement enrichi comprennent son rapatriement des réacteurs de recherche dans le pays d'origine où il a été enrichi. À la fin de 2015, le programme de reprise de l'UHE provenant des États-Unis d'Amérique avait atteint 76 % de ses objectifs avec l'enlèvement de presque 1 300 kg de combustible neuf ou usé à l'UHE de réacteurs de recherche. Le programme de reprise de la Russie est achevé à 86 %, avec l'enlèvement de 2 165 kg de combustible neuf ou usé à l'UHE de réacteurs de recherche. L'UHE non irradié d'origine russe du Breeder-1 de l'installation à source de neutrons de Tbilisi (Géorgie) a été retiré en décembre 2015. Avec le retrait du combustible liquide à l'UHE irradié du réacteur FOTON IIN-3M en Ouzbékistan (fig. C-6), 28 pays⁷ qui avaient de l'UHE en sont maintenant exempts.



FIG. C-6. Conteneur de transport de combustible liquide à l'UHE irradié (à gauche). Le camion transportant le conteneur de combustible liquide à l'UHE est acheminé dans l'avion-cargo qui rapatrie le combustible du réacteur FOTON IIN-3M en Ouzbékistan vers la Fédération de Russie (à droite).

⁶ L'Agence appuie plusieurs groupements de réacteurs de recherche dans les régions suivantes : Afrique centrale, Asie centrale, Baltique, Caraïbes, Europe orientale et Méditerranée, ainsi que dans la Communauté d'États indépendants, mais aussi le Réseau mondial de réacteurs de recherche TRIGA.

⁷ Plus Taïwan (Chine).

167. Des combustibles avancés de très haute densité à l'uranium et au molybdène, actuellement en cours d'élaboration, sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et à haute performance. Bien que des progrès sensibles aient été accomplis dans ce domaine, des efforts et des essais supplémentaires, notamment dans le cadre de programmes d'examen de l'irradiation et d'examen après irradiation et en ce qui concerne les techniques de fabrication, sont nécessaires pour assurer l'approvisionnement commercial en combustibles qualifiés de haute densité à l'UFE.

168. Certes, il n'y a pas eu de sérieuses pénuries de molybdène 99 en 2015, mais les difficultés d'exploitation ont continué dans les installations de traitement et les réacteurs de recherche plus anciens. En raison de changements de la demande, de gains d'efficacité et d'une diversification de l'approvisionnement, les arrêts mineurs non programmés ont été bien gérés par l'industrie. La conversion de processus de production d'isotopes médicaux à partir de cibles à l'UFE et non plus à l'UHE se poursuit, et l'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (ANSTO) et la société sud-africaine NTP Radioisotopes sont les principaux fournisseurs de molybdène 99 à base d'UFE. ANSTO prévoit d'achever sa nouvelle installation de production de molybdène 99 fin 2016, ce qui portera la production à 3 500 curies à six jours par semaine. La société NTP Radioisotopes poursuit la conversion de ses processus en vue de l'utilisation exclusive d'UFE. L'Institut des radioéléments en Belgique et Mallinckrodt Pharmaceuticals aux Pays-Bas continuent de progresser dans leurs travaux de conversion. Bien que les Laboratoires nucléaires canadiens cherchent à obtenir une prolongation de l'exploitation du réacteur national de recherche universel (NRU) jusqu'au 31 mars 2018, le Canada a l'intention de cesser de produire régulièrement du molybdène 99 à partir du réacteur NRU à compter du 31 octobre 2016. En Belgique, Le réacteur BR2, un des principaux irradiateurs de molybdène 99, a été mis à l'arrêt en février 2015 pour que soient effectuées des activités approfondies de maintenance et de modernisation en vue de préparer l'installation à la prolongation de 10 ans de sa licence d'exploitation au-delà de 2016. Ce réacteur devrait revenir au mode de fonctionnement normal en juillet 2016. La communauté internationale du molybdène 99 s'est affairée avec succès à adapter le calendrier de planification de la production pour tenir compte de cet arrêt prolongé. La Fédération de Russie a aussi augmenté sa production de molybdène 99 en 2015.

D. Nouvelles applications industrielles des technologies des rayonnements

169. Les technologies des rayonnements sont adaptées en permanence pour des applications destinées à l'industrie, qu'il s'agisse d'intervention en cas de panne dans une usine de fabrication ou d'amélioration de la qualité de la production de matériaux de grande valeur ou de l'atténuation des effets des polluants dans les effluents industriels. La présente section décrit les technologies des rayonnements qui ont clairement eu un impact au cours des dernières années et ont permis des applications à une échelle industrielle.

D.1. Technologies des rayonnements dans l'industrie et l'ingénierie

170. L'activation en couche mince est une technique nucléaire qui offre la possibilité d'étudier directement l'usure ou la corrosion, à l'échelle du micromètre jusqu'au nanomètre, dans des secteurs technologiques de pointe tels que l'industrie automobile, l'industrie de l'énergie et la métallurgie. Sur un plan non industriel, les littoraux et les fonds marins sont soumis à des processus d'érosion, de transport, de sédimentation et de consolidation. Les traceurs et les sources scellées radio-isotopiques se sont souvent avérés des outils irremplaçables pour les études de transport des sédiments dans

l'environnement marin, fournissant d'importants paramètres qui permettent de renforcer l'efficacité de la conception, de la maintenance et de l'optimisation des structures de génie civil, et peuvent être utiles pour améliorer la protection et la gestion des ressources côtières.

D.1.1. Activation en couche mince pour mesurer l'usure, l'érosion et la corrosion des matériaux

171. Les techniques nucléaires sont largement utilisées pour étudier des phénomènes physiques et chimiques complexes, notamment l'usure, le transfert de masse, la corrosion et l'érosion. Il est bien connu que la fiabilité des équipements industriels, des systèmes de transport, des centrales nucléaires et des centrales électriques classiques, ainsi que des canalisations par exemple, dépend fortement de processus de dégradation tels que l'usure, la corrosion et l'érosion. En conséquence, la mise en place de méthodes efficaces de détection, de mesure et de surveillance des processus ci-dessus revêt une grande importance. Des méthodes de surveillance appropriées pourraient prévenir des accidents dangereux pendant l'exploitation des installations industrielles et des véhicules de transport, et éviter des pertes de production suite à une panne de machine.

172. Lorsque les surfaces ne sont pas aisément accessibles ou sont cachées par des structures les recouvrant, les techniques nucléaires offrent le moyen le plus efficace de mesurer et de surveiller l'usure et la corrosion. L'activation en couche mince, dans laquelle des particules chargées activent uniquement les couches de surface des parties souhaitées de l'appareil, permet de surveiller des éléments clés en dépit de leur inaccessibilité. Les faibles niveaux d'activité permettent une manipulation aisée de l'échantillon, et la sensibilité de mesure atteinte est élevée.

173. L'application des techniques de traçage progresse constamment dans diverses branches de l'industrie moderne pour l'évaluation de l'usure et de la corrosion des machines, principalement en raison des progrès réalisés au niveau des méthodes utilisées pour le marquage radioactif des éléments examinés. Différentes méthodes de marquage ont été mises au point pour mesurer une perte de matière à l'échelle nanométrique avec une activité relativement faible, telles que l'activation en couche ultra mince, qui s'appuie sur l'implantation par recul de noyaux radioactifs lourds produits par réactions nucléaires et permet d'atteindre une sensibilité de mesure des pertes de surface de quelques nanomètres.

D.1.2. Technologies des rayonnements pour l'étude du transport des sédiments

174. L'étude du transport des sédiments dans les mers et les cours d'eau est essentielle pour le génie civil ainsi que pour la protection et la gestion du littoral. Les littoraux et les fonds marins sont des zones dynamiques, puisqu'on y observe des périodes d'érosion, de transport, de sédimentation et de consolidation. Parmi les principales causes de l'érosion des plages figurent les tempêtes et les activités de l'homme, comme la construction de digues ou de jetées, et le dragage de l'embouchure des fleuves. Chacune de ces actions modifie l'écoulement naturel des sédiments. Les facteurs anthropiques sont désormais de plus en plus accentués par les effets du changement climatique. Bien que de nombreuses politiques et pratiques en vigueur soient peut-être en train d'accélérer le processus d'érosion des plages, il existe des options viables et disponibles pour atténuer de tels dommages et aménager des littoraux durables.

175. Les techniques nucléaires peuvent servir à étudier la dynamique des sédiments et à déterminer des paramètres qui permettent d'améliorer la conception, la maintenance et l'optimisation des structures de génie civil. L'utilisation de radio-isotopes sous forme de traceurs et de sources scellées s'est révélée particulièrement utile dans le cadre des études de transport des sédiments.

176. Les radiotraceurs sont plus sensibles et plus précis que les traceurs classiques et constituent la seule méthode incontestable d'évaluation directe, en temps réel, des voies de transport des sédiments.

Diverses techniques de traçage et de surveillance des sédiments à l'aide de radiotraceurs ont été mises au point par des groupes de recherche dans de nombreux pays.

177. Outre les radiotraceurs, des techniques faisant appel aux sources scellées peuvent fournir des informations sur la densité des sédiments déposés dans un chenal de navigation ou des bassins portuaires, ainsi que sur la concentration des sédiments circulant en suspension.

178. Les techniques s'appuyant sur des radiotraceurs et des sources scellées peuvent généralement apporter une contribution importante dans les deux domaines problématiques suivants : la gestion des zones littorales qui subissent une érosion, et des rivages qui sont soumis à un recul à long terme, le résultat étant souvent la disparition des plages ; et la prise de mesures face à de mauvais choix de sites d'immersion pour les opérations de dragage des ports, qui peuvent entraîner le retour des matières immergées dans le chenal dragué.

179. Étant donné que l'application des radiotraceurs et des sources scellées pour le traçage et la surveillance des sédiments présente de considérables avantages environnementaux, économiques et sociaux, l'Agence facilite le transfert de technologie et propose à ses États Membres des formations sur un certain nombre de ces techniques.

180. La modélisation numérique de la dynamique des fluides (hydrodynamique) est désormais un outil commun de gestion des systèmes naturels et elle est de plus en plus utilisée pour étudier le devenir et le comportement des particules et des contaminants. Les techniques faisant appel aux radiotraceurs servent souvent à valider des modèles hydrodynamiques pour accroître la confiance dans la capacité de prédiction des modèles. Le traçage expérimental et la modélisation numérique sont des méthodes complémentaires d'étude de systèmes complexes. Les données de traceurs sont basées sur une observation directe, mais elles se limitent à l'élément marqué du système et à un domaine restreint dans l'espace et dans le temps. En théorie, les modèles numériques peuvent tenir compte de tous les paramètres importants, mais ils sont limités par les hypothèses sous-jacentes et la puissance de calcul disponible. Utilisées isolément, les deux approches présentent des limites, mais conjuguées, elles offrent une méthode très puissante d'étude de systèmes complexes. Au cours des dernières années, il est apparu clairement que l'utilisation en synergie de la modélisation et des études par radiotraceurs sur le terrain peut apporter une contribution importante à la résolution de problèmes complexes dans les systèmes naturels.

D.2. Technologies des rayonnements pour la mise au point de produits et de processus « verts »

181. Divers secteurs industriels s'efforcent d'être plus respectueux de l'environnement en mettant au point des produits plus performants à plus faible consommation énergétique. Les techniques de radiotraitement contribuent avec succès depuis longtemps à l'élaboration de produits et de processus « verts ». La présente sous-section mettra l'accent sur de nouveaux produits du radiotraitement comme les nanomatériaux synthétisés par irradiation de formes et tailles différentes (nanoparticules, nanofibres, nanopores) qui sont envisagés pour une utilisation dans la préparation d'emballages actifs destinés aux aliments et de pansements, ainsi que pour une utilisation comme vecteurs de médicaments. Les préoccupations au sujet de la pollution environnementale en rapport avec les produits chimiques habituellement employés dans l'industrie de l'enrobage et du durcissement sont les principaux facteurs sous-tendant les initiatives visant à tirer parti des rayonnements des faisceaux d'électrons de faible énergie en vue de la fabrication de tels produits.

D.2.1. Nanomatériaux structurés par irradiation

182. L'amorçage de réactions par irradiation (polymérisation, réticulation, dégradation contrôlée et greffage) constitue un outil puissant pour la synthèse et/ou la modification de matériaux à l'échelle

nanométrique, dans la mesure où cette méthode permet la création de propriétés nouvelles à toute température et sans additifs ou résidus toxiques qu'il faudrait par la suite minutieusement retirer pour un coût onéreux. Cette méthode est particulièrement avantageuse lorsque le produit est destiné à des applications médicales. En outre, de tels matériaux peuvent être élaborés à partir de déchets : par exemple, des nanotubes de carbone ont été produits avec succès à partir de sacs en plastique mis au rebut.

D.2.1.1. Applications médicales

183. Des progrès dans l'élaboration et le façonnage des nanoparticules ont donné lieu à une gamme de produits qui peuvent être utilisés couramment dans le cadre des soins de santé et qui font l'objet d'une forte demande. De nombreux nanosystèmes, tels que les points quantiques, les nanosphères organiques et inorganiques, les dendrimères, les liposomes et les nanoparticules polymères, ont été proposés pour des applications médicales. Des nanogels – réseaux de polymères réticulés de dimensions nanométriques – présentent des avantages uniques du point de vue de la flexibilité de leur forme, de la grande taille de leurs surfaces aux multiples sites de conjugaison, espaces ou poches internes pour le transport de médicaments qui peuvent être libérés en réponse à certains stimuli, et du fait de l'internalisation possible par les cellules humaines. La Pologne a été le premier pays à synthétiser par irradiation de tels nanogels, et la méthode a rapidement été adoptée par de nombreux chercheurs dans le monde entier, notamment en Argentine, au Brésil, en Italie, en Thaïlande et en Turquie. Les nanogels de ce type peuvent être élaborés au moyen de polymères synthétiques ou naturels, ainsi que de biomolécules comme des protéines ou des peptides. Outre leur utilisation en tant que porteurs d'une charge utile de médicament spécifique à libérer *in situ* pour combattre diverses maladies, les nanoparticules sont incorporées dans des pansements pour accélérer la guérison et lutter contre les infections. La dégradation contrôlée sous irradiation est employée avec succès pour mettre au point des membranes polymères nanoporeuses, lesquelles peuvent par ailleurs être fonctionnalisées afin d'élaborer des membranes capables de filtrer et séparer de façon sélective diverses biomolécules.

D.2.1.2. Matériaux avancés d'emballage et d'enrobage des aliments

184. Selon une enquête récente, la durée de conservation, la fraîcheur et la qualité des produits alimentaires constituent des priorités pour les consommateurs⁸. Un emballage « actif » ou « intelligent » est en cours d'élaboration en réponse aux besoins exprimés. Par exemple, des films ayant des propriétés supérieures de barrière contre les gaz et pouvant empêcher l'entrée d'oxygène et la sortie de gaz inertes se sont révélés efficaces pour l'allongement de la durée de vie des produits sans perte de fraîcheur. Il est possible de fabriquer des films de ce type en y incorporant des nanoparticules spécifiques, qui peuvent aussi contenir des enzymes, des agents antibactériens et d'autres composants aidant à lutter contre la détérioration et l'altération des aliments. En Égypte, un tel emballage alimentaire biologiquement actif a été élaboré à partir d'acétate de cellulose en incorporant des nanoparticules d'argent, tandis qu'un emballage présentant une perméabilité réduite à l'oxygène et à la vapeur d'eau a été fabriqué à partir de films en polycaprolactone et en chitosane par ajout d'oxyde de graphène. Les scientifiques égyptiens travaillent également sur la production d'un emballage intelligent pour les produits de la mer en incorporant des nanofibres de polyaniline dans des films de polycaprolactone. Cet emballage change de couleur lors de l'interaction avec les vapeurs émanant d'un produit de la mer en décomposition, indiquant ainsi clairement si l'aliment a perdu ou non sa fraîcheur. Au Canada, l'ajout de nanocellulose à un emballage fabriqué à partir de biomatériaux

⁸ WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME, Consumer Attitudes to Food Waste and Food Packaging, Banbury (2013).

permet de le renforcer et de le préparer en vue d'autres modifications chimiques pour répondre à des besoins spécifiques d'emballage.

D.2.2. Durcissement par irradiation

185. Partout dans le monde, l'industrie de l'imprimerie et de l'enrobage cherche des procédures plus sûres sur le plan environnemental, utilisant moins de solvants, voire aucun, et évitant ainsi la pollution tout en empêchant la migration de sous-produits dégradés et toxiques dans les biens de consommation. La Directive 2007/19/EC de la Commission européenne en 2007 – le quatrième amendement à la Directive 2002/72/EC, communément appelée la « Directive plastiques » – qui établit un niveau maximal de dix parties par milliard pour la migration de substances non autorisées dans les aliments, est un exemple de développement récent qui a incité l'industrie de l'emballage à rechercher de nouvelles technologies. La demande croissante de processus et de matériaux respectueux de l'environnement, pouvant remplacer ceux qui sont nocifs, a été l'une des principales causes de l'utilisation, pour l'industrie de l'enrobage, d'accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie avec des énergies inférieures à 300 keV. L'utilisation, dans les enrobages, les encres et les adhésifs, de monomères et d'oligomères durcissables par irradiation, qui se polymérisent et réticulent, évite le recours à des composés organiques volatils pour le durcissement, permettant ainsi à l'industrie de l'enrobage et aux industries connexes de se conformer aux prescriptions sur la pureté de l'air en réduisant de façon significative les émissions de polluants atmosphériques toxiques pendant la production et en atteignant des niveaux de produits chimiques toxiques bien plus bas dans le produit. Outre ces avantages, les produits durcis par faisceaux d'électrons et les processus connexes permettent d'économiser de l'énergie et de gagner de l'espace, tout en augmentant la qualité et la productivité.

186. L'application plus large des technologies de durcissement par irradiation dans l'industrie de l'imprimerie et l'industrie de l'enrobage nécessite des développements continus de la technologie des accélérateurs afin de rendre l'utilisation de la technologie des faisceaux d'électrons viable sur le plan commercial à l'échelle industrielle. La mise au point récente d'une nouvelle génération d'émetteurs de faisceaux d'électrons très compacts et d'emploi facile, ayant une plage de tension d'accélération de 80 à 200 kV et des largeurs de traitement pouvant aller jusqu'à 60 cm, peut encore promouvoir davantage l'utilisation de cette technologie, car ces émetteurs permettront le développement, l'optimisation, et l'évolution constante de nouveaux produits et processus dans une vaste gamme d'applications comme le durcissement et l'élaboration de matériaux par réticulation.

E. Progrès dans le domaine de la technologie de l'imagerie médicale

187. Les progrès réalisés dans le domaine de la technologie de l'imagerie médicale pour évaluer la composition corporelle permettent de quantifier des paramètres comme la masse grasse, la masse maigre et la densité minérale osseuse, ainsi que certaines masses organiques et tissulaires, notamment les masses adipeuses, musculaires et viscérales. L'évaluation de la composition corporelle est utilisée dans un certain nombre d'applications allant du suivi de la condition physique à l'évolution des maladies et à la gestion des risques connexes. Des données de plus en plus nombreuses montrent que les différents éléments de la composition corporelle ont une grande influence sur le risque de maladies chroniques, la progression de la maladie, la réponse au traitement et les effets sur la santé. C'est pourquoi, les outils d'évaluation de la composition corporelle et les modèles de risque destinés à prévenir les effets adverses actuellement mis au point suscitent un intérêt considérable. À l'heure actuelle, trois modalités d'imagerie sont largement utilisées pour évaluer la composition corporelle :

l'absorptiométrie à rayons X en double énergie (DEXA), la tomодensitométrie quantitative (QCT) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

E.1. Progrès récents dans le domaine de la technologie de l'imagerie pour évaluer la composition corporelle

E.1.1. La composition corporelle comme indicateur de santé

188. La prévalence du surpoids et de l'obésité à l'échelle mondiale a augmenté de façon alarmante ces dernières décennies. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) estime qu'il y a près de deux milliards d'adultes en surpoids dans le monde, plus de 600 millions d'entre eux étant obèses, un chiffre qui a doublé depuis 1980⁹. Ces troubles métaboliques ont depuis longtemps pris des allures d'épidémie tant chez les adultes que chez les enfants. Un lien direct a été établi entre l'obésité et plusieurs maladies chroniques comme le diabète, les maladies cardiovasculaires, l'arthrose et le cancer, qui ont de graves répercussions sur la qualité et l'espérance de vie. D'après les estimations, le coût économique du surpoids et de l'obésité devrait doubler tous les dix ans et se traduire par une augmentation importante des dépenses totales de soins de santé.

189. L'accent est mis en particulier sur l'accès à des outils permettant d'évaluer le risque sanitaire lié à l'obésité. Le plus souvent, il s'agit de méthodes ne faisant pas appel à l'imagerie, qui sont peu coûteuses et faciles à utiliser, comme celles qui permettent d'établir des indicateurs d'obésité à partir de diverses formules se basant sur la taille et le poids, notamment l'indice de masse corporelle (IMC), l'indice de forme corporelle, l'indice de rondeur corporelle, et des indicateurs anthropométriques de l'obésité comme le tour de taille et le rapport taille/hanche. Toutefois, pour comprendre les mécanismes de causalité sous-jacents entre composition corporelle et maladies, des paramètres corporels plus complexes sont souvent nécessaires. Par exemple, l'OMS classe le surpoids et l'obésité en fonction de l'IMC, mais cette mesure ne donne pas d'informations sur les quantités relatives de tissus gras et de tissus maigres ni sur la répartition du tissu adipeux dans le corps, alors qu'il est prouvé que ces deux types d'informations sont liés de façon indépendante au syndrome métabolique. Afin d'évaluer la composition corporelle de manière encore plus précise, on utilise des méthodes qui permettent de quantifier les compartiments de masse grasse et de masse maigre dans l'ensemble du corps, comme l'analyse de l'impédance bioélectrique et la pléthysmographie par déplacement d'air. Toutefois, ces méthodes ne permettent pas d'isoler les différents compartiments tissulaires. Des méthodes d'imagerie réellement bidimensionnelle (2D) ou tridimensionnelle (3D) sont nécessaires pour diviser le corps en types de tissus et en régions spatiales et étudier les liens avec les maladies, la morbidité et la mortalité. L'absorptiométrie à rayons X en double énergie, la QCT et l'IRM sont largement utilisées dans le monde pour évaluer de manière détaillée la composition corporelle. Plus récemment, le scanner optique de surface 3D est apparu comme nouvel outil d'analyse de la composition corporelle¹⁰.

E.1.2. Progrès réalisés dans le domaine de l'absorptiométrie à rayons X en double énergie (DEXA)

190. L'absorptiométrie à rayons X en double énergie est une technique très exacte et très précise pour mesurer la densité minérale osseuse, la masse osseuse, la masse grasse, la masse de tissus maigres mous et le pourcentage de graisse. Elle consiste à produire simultanément des images à l'aide de rayons X à deux niveaux d'énergie différents. S'appuyant sur les caractéristiques uniques

⁹ OMS, Obésité et surpoids, Aide-mémoire n° 311, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/fr/>, actualisé en janvier 2015

¹⁰ LEE, S.Y., GALLAGHER, D., Assessment methods in human body composition, *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* **11** (2008) 566–572.

d'atténuation des différents types de tissus, les examens DEXA sont utilisés pour calculer des propriétés de densité de surface à partir d'images 2D. Dans les modèles DEXA, la densité minérale osseuse correspond à la masse minérale osseuse divisée par la surface osseuse projetée en g/cm^2 . La masse grasse correspond à la masse lipidique (triglycérides, membranes phospholipidiques, etc.) puisque tous les lipides ont des caractéristiques similaires d'atténuation des rayons X. Jusqu'à récemment, les mesures effectuées à l'aide de la méthode DEXA ne permettaient pas de distinguer entre différents types de tissus comme la peau, le muscle, le foie, le tissu adipeux viscéral (TAV) et le tissu adipeux sous-cutané (TAS). Cela est encore vrai dans la plupart des cas ; toutefois, il est aujourd'hui possible d'estimer le TAS et le TAV dans l'abdomen inférieur grâce à un algorithme spécial. En outre, la mesure de la concentration de fer dans le foie à l'aide de l'examen DEXA s'est révélée être précise par rapport aux normes de référence¹¹. On trouvera un exemple de rapport d'examen DEXA à la figure E-1.

191. La dose de rayonnements lors d'un examen DEXA est très faible, comparable à celle d'une journée d'exposition au rayonnement de fond naturel ($\sim 8 \mu\text{SV}$). En outre, avec des manipulateurs dûment formés, la précision de répétabilité de la méthode DEXA est très élevée : le coefficient de variation est de 1,0 % ou inférieur pour le pourcentage de masse grasse corporelle dans le cas d'examens répétés sur la même personne^{12,13}. Cette méthode permet de mesurer non seulement la masse corporelle totale mais aussi les compartiments de masse grasse, de tissu maigre mou et de masse minérale osseuse pour des sous-régions anatomiques comme les bras, les jambes et le torse, soit des données ne pourraient être obtenues par des méthodes plus simples ne faisant pas appel à l'imagerie (BIA, ADP, etc.). Toutefois, la méthode DEXA a ses limites. Une d'entre elles est que le modèle à trois compartiments ne permet pas d'isoler explicitement l'eau de la masse maigre de protéines fonctionnelles. Bien que des estimations du degré d'hydratation ne soient pas explicitement utilisées dans cette méthode pour calculer les masses corporelles, des fluctuations du degré d'hydratation sont interprétées comme des changements de la masse de tissu maigre. Le poids du tissu adipeux étant composé d'eau à environ 15 %, l'évolution de la masse musculaire ne peut être correctement surveillée si le degré d'adiposité change lui aussi. L'absorptiométrie à rayons X en double énergie est une méthode d'imagerie spécialisée que les appareils de radiographie d'usage général n'offrent habituellement pas, car ils ne sont pas dotés d'un dispositif spécial permettant de filtrer les faisceaux et d'effectuer un enregistrement spatial presque parfait des deux atténuations.

192. L'absorptiométrie à rayons X en double énergie est plus souvent utilisée pour des essais cliniques que d'autres méthodes d'évaluation de la composition corporelle. Sa dose de rayonnement est faible par rapport à celle d'une tomодensitométrie (CT) du corps entier et son coût est peu élevé comparé à celui de l'IRM. Les données de mesure du pourcentage de masse grasse obtenues grâce à la méthode DEXA sont très corrélées à celles obtenues à l'aide de la CT et de l'IRM ($r > 0.99$)¹⁴, mais elles sont plus précises. En fonction du modèle de l'appareil et de la taille du patient, la durée de l'examen du corps entier varie entre 3 et 10 minutes. L'étalonnage croisé de systèmes DEXA de fabrication et de type similaires est facile à effectuer sur le terrain à l'aide de substituts biomimétiques standard comme l'acide stéarique et l'eau. Des systèmes de fabrication différente ne peuvent

¹¹ SHEPHERD, J.A., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry with serum ferritin predicts liver iron concentration and changes in concentration better than ferritin alone, *J. Clin. Densitom.* **13** (2010) 399–406.

¹² POWERS, C., FAN, B., BORRUD, L.G., LOOKER, A.C., SHEPHERD, J.A., Long-term precision of dual-energy X-ray absorptiometry body composition measurements and association with their covariates, *J. Clin. Densitom.* **18** (2013).

¹³ TOOMBS, R.J., DUCHER, G., SHEPHERD, J.A., DE SOUZA, M.J., The impact of recent technological advances on the trueness and precision of DXA to assess body composition, *Obesity* **20** (2012) 30–39.

¹⁴ KULLBERG, J., et al., Whole-body adipose tissue analysis: comparison of MRI, CT and dual energy X-ray absorptiometry, *Br. J. Radiol.* **82** (2009) 123–130.

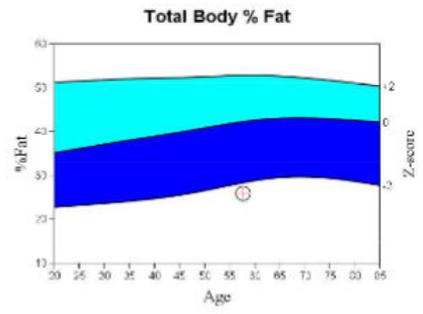
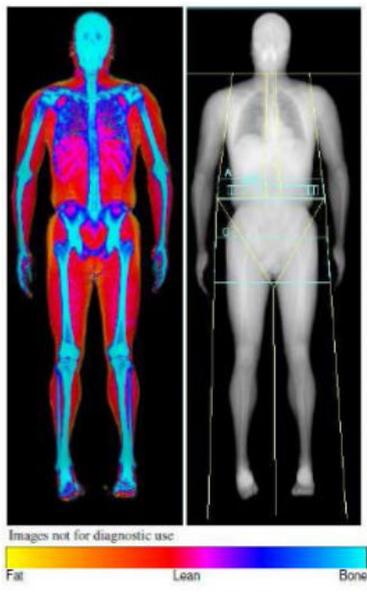
actuellement être étalonnés de manière croisée qu'à l'aide d'opérations de standardisation pour corriger des distorsions systémiques. Grâce à l'usage combiné de substituts et d'opérations de standardisation, les données de différents centres cliniques peuvent être mises en commun. Enfin, de vastes efforts ont été déployés pour fournir des échantillons représentatifs et propres à un pays sur la santé métabolique et la nutrition, notamment l'enquête nationale sur la santé et la nutrition (NHANES) réalisée aux États-Unis d'Amérique et celle menée en République de Corée (K-NHANES).

HOLOGIC TEST
4776 S W 8TH Street
Bedford, MA 01730

Telephone: 781-999-7300

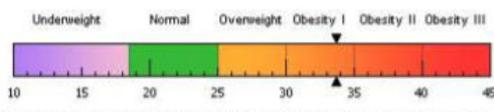
Fax: 781-260-0671

Name: sample, patient	Sex: Female	Height: 54.0 in
Patient ID: 987654	Ethnicity: White	Weight: 140.0 lb
DOB: February 13, 1957	Menopause Age: 50	Age: 57



Source: 2008 NHANES White Female

World Health Organization Body Mass Index Classification
BMI = 33.8 WHO Classification Obesity I



BMI has some limitations and an actual diagnosis of overweight or obesity should be made by a health professional. Obesity is associated with heart disease, certain types of cancer, type 2 diabetes, and other health risks. The higher a person's BMI is above 25, the greater their weight-related risks.

Body Composition Results

Region	Fat Mass (g)	Lean + BMC (g)	Total Mass (g)	% Fat	%Fat Percentile YN	AM
L Arm	984	2066	3050	32.3	20	5
R Arm	1094	2123	3217	34.0	28	8
Trunk	6750	20123	26874	25.1	20	4
L Leg	2354	7055	9409	25.0	1	1
R Leg	2525	7258	9783	25.8	1	1
Subtotal	13707	38625	52333	26.2	7	1
Head	886	3091	3978	22.3		
Total	14593	41717	56310	25.9	7	1
Android (A)	1119	2853	3972	28.2		
Gynoid (G)	2626	6527	8953	29.3		

Adipose Indices

Measure	Result	Percentile YN	AM
Total Body % Fat	25.9	7	1
Fat Mass/Height ² (kg/m ²)	7.76	37	13
Android/Gynoid Ratio	0.96		
% Fat Trunk/% Fat Legs	0.99	88	70
Trunk/Limb Fat Mass Ratio	0.97	78	47
Est. VAT Mass (g)	145		
Est. VAT Volume (cm ³)	156		
Est. VAT Area (cm ²)	30.0		

Lean Indices

Measure	Result	Percentile YN	AM
Lean/Height ² (kg/m ²)	20.9	97	96
Appen. Lean/Height ² (kg/m ²)	9.21	97	96

Est. VAT = Estimated Visceral Adipose Tissue
YN = Young Normal
AM = Age Matched

Scan Date: October 16, 2014 ID: A10161401
Scan Type: a Whole Body
Analysis: October 16, 2014 15:28 Version 13.5.1
Operator: Auto Whole Body Fan Beam
Model: QDR Workstation (S/N 061263)
Comment:



FIG. E-1. Un rapport type sur la composition corporelle établi grâce à un système DEXA de la société Hologic. Les résultats obtenus sont indiqués pour de nombreuses sous-parties du corps, comme les bras, les jambes et le tronc. Parmi les progrès réalisés récemment figurent la fourniture d'estimations sur la surface, le volume et la masse de TAV dans l'abdomen inférieur, ainsi que de plusieurs autres indices sur le tissu maigre, comme l'indice de masse maigre appendiculaire (Publiée avec l'aimable autorisation de la société Hologic).

E.1.2.1 Régions particulièrement intéressantes pour les examens DEXA

193. Depuis le lancement de la méthode DEXA, les sous-régions définies pour les examens du corps entier sont les bras, les jambes, le tronc et la tête afin d'obtenir des données sur les tissus mous. Néanmoins, ces dernières années, des efforts ont été progressivement faits pour analyser des régions spéciales en sus de ces régions anatomiques. Les systèmes DEXA permettent d'estimer le tissu viscéral adipeux sous la forme soit d'une surface transversale soit d'un volume tissulaire^{15,16}. Les estimations du TAV sont établies par soustraction de la graisse sous-cutanée superficielle de la masse totale de graisse androïde. La corrélation entre les mesures de TAV obtenues par DEXA et par CT est très élevée ($r > 0.90$).

E.1.2.2 Examen de patients obèses à l'aide de la méthode DEXA

194. L'examen de patients corpulents à l'aide de systèmes DEXA s'est révélé complexe dans le passé en raison des limites de poids de l'appareil et de la dimension de la table. Les limites de poids des tables d'examen DEXA ont récemment été portées à 227 kg pour certains modèles. Des modes d'examen spéciaux avec des doses légèrement plus élevées pour les patients obèses sont également disponibles. Dans le cas où il est difficile de placer entièrement un patient obèse dans la zone de balayage du scanner, des protocoles d'analyse hémisphérique ou réfléchive peuvent être utilisés et la position du patient décalée horizontalement sur la table. La composition du bras ou de la jambe qui n'entre pas sur la table d'examen est alors estimée à partir du membre correspondant qui a été entièrement examiné.

195. La qualité de l'examen, de l'analyse et de l'interprétation sont d'une importance capitale pour obtenir des résultats exacts sur la composition corporelle. Des mannequins spécialement conçus pour contrôler l'étalonnage des systèmes DEXA sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Ils sont utilisés pour corriger l'étalonnage longitudinal et procéder à l'étalonnage croisé entre des systèmes similaires. Toutefois, aucun des mannequins mis au point à ce jour ne s'est avéré approprié pour l'étalonnage croisé de systèmes de fabrication et de types différents.

E.1.3. Progrès réalisés dans les domaines de la tomодensitométrie quantitative et de l'imagerie par résonance magnétique

196. Une méthode d'imagerie 3D est indispensable pour obtenir des données sur la composition ou le volume d'un organe indépendamment de son tissu environnant. La CT et l'IRM sont des méthodes communément utilisées en milieu clinique, pour isoler des organes, notamment certains muscles, le cœur, le cerveau, le foie, etc. Les organes sont isolés des tissus environnants, tranche par tranche, sur tout le corps. Les principales limites de ces méthodes sont une accessibilité limitée dans les régions à faibles ressources, un coût élevé par rapport à d'autres méthodes et, pour ce qui est de la CT, une dose non négligeable délivrée au patient. Toutefois, des scanners cliniques de grand calibre permettent d'examiner n'importe quelle partie du corps et peuvent s'adapter à un grand nombre de tailles différentes. La mesure du tissu adipeux et du tissu musculaire peut être réalisée à l'aide de techniques dont l'absorptiométrie (CT), la saturation (IRM) ou la segmentation tissulaire (CT et IRM).

197. La tomодensitométrie est la principale technique utilisée pour étudier certains dépôts de graisse localisés. Son application de recherche la plus courante aux fins de l'évaluation de la composition

¹⁵ MICKLESFIELD, L.K., GOEDECKE, J.H., PUNYANITYA, M., WILSON, K.E., KELLY, T.L., Dual-energy X-ray performs as well as clinical computed tomography for the measurement of visceral fat, *Obesity* **20** (2012) 1109-1114.

¹⁶ KAUL, S., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry for quantification of visceral fat, *Obesity* **20** (2012) 1313-1318.

corporelle est la quantification du tissu adipeux sous-cutané, viscéral et hépatique. Elle permet d'estimer avec beaucoup de précision le tissu adipeux viscéral et le tissu adipeux abdominal total. Sa répétabilité est également excellente, avec un taux de variabilité inférieur à 1 % entre des mesures répétées.

198. Chez les adultes, la CT est la technique privilégiée en raison de sa rapidité, de sa disponibilité et de la facilité d'exécution de son protocole et d'analyse de ses résultats. Elle est en outre étalonnée selon des normes absolues d'atténuation. L'imagerie par résonance magnétique est la méthode de recherche préférée chez les enfants et les adolescents, pour lesquels il est important de tenir compte des doses¹⁷. Des algorithmes sophistiqués pour l'analyse par autosegmentation d'IRM du corps entier ont récemment été présentés¹⁸ et adoptés par plusieurs sociétés. La figure E-2 en donne un exemple. L'image IRM présentée dans cette figure a été réalisée en moins de 10 minutes à l'aide d'un protocole d'analyse Dixon à trois points (qui sépare la graisse et l'eau) et montre une segmentation en couleurs de tous les principaux groupes de muscles, du tissu adipeux viscéral et du tissu adipeux sous-cutané. Elle fournit des données sur le volume des organes, la teneur en eau et la masse grasse.

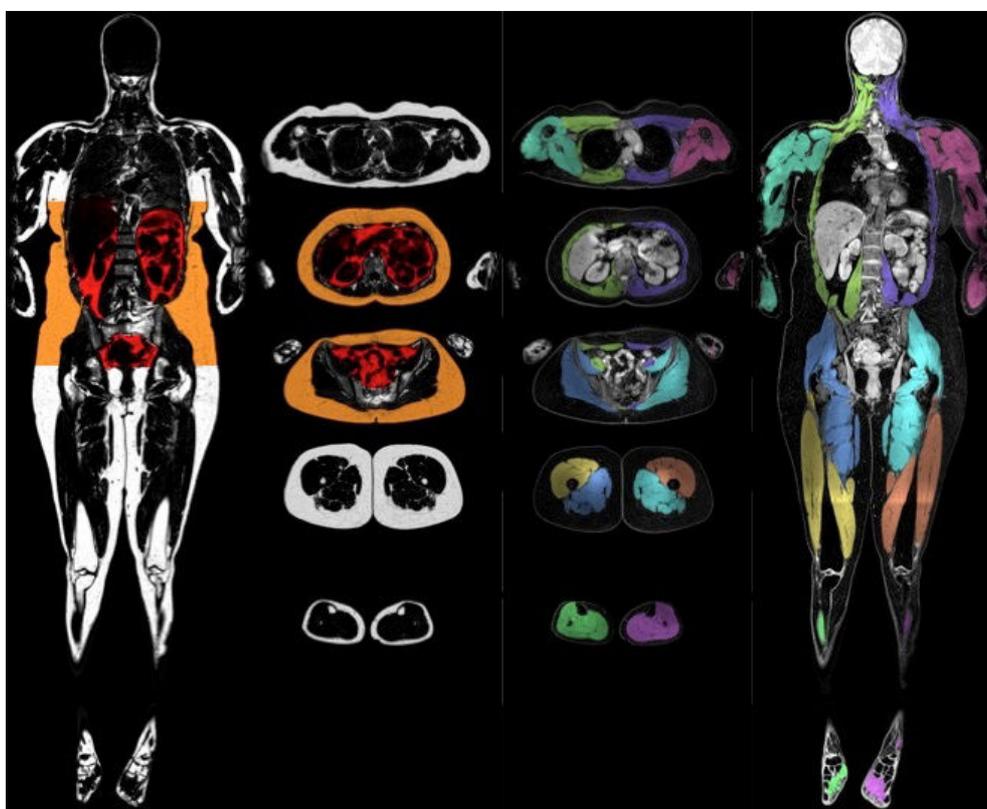


FIG. E-2. Exemple d'autosegmentation d'une image obtenue par IRM, montrant d'un côté uniquement la masse grasse (à gauche) et de l'autre uniquement la teneur en eau (à droite). Le TAS et le TAV dans la ceinture abdominale sont indiqués respectivement en orange et en rouge et apparaissent sur l'image de la masse grasse. Dix grands groupes de muscles, de couleurs différentes, apparaissent sur l'image de la teneur en eau. La segmentation est automatique. L'image du corps entier a été réalisée en six minutes (Publiée avec l'aimable autorisation d'Olof Dahlqvist Leinhard, Université de Linköping, Suède).

¹⁷ OWENS, S., et al., Visceral adipose tissue and cardiovascular risk factors in obese children, *J. Pediatr.* **133** (1998) 41-45.

¹⁸ KARLSSON, A., et al., Automatic and quantitative assessment of regional muscle volume by multi-atlas segmentation using whole-body water-fat MRI, *J. Magn. Reson. Imaging* **41** (2015) 1558-1569.

E.1.4. Technologies émergentes : examen bi- ou tridimensionnel de l'ensemble de la surface corporelle

199. La forme du corps sert depuis longtemps d'indicateur de santé. Le tour de taille et le rapport taille/hanche sont souvent utilisés à cette fin. De plus, même un simple observateur remarquera facilement une forte musculature ou une adiposité importante. Récemment, des systèmes d'examen 2D et 3D de l'ensemble de la surface corporelle ont été proposés comme nouvelles plateformes pour évaluer la composition corporelle. En raison de leur grande accessibilité, de leur faible coût et de la quantité importante de données fournies sur les régions, ces systèmes offrent des avantages incontestables pour évaluer la composition de différentes parties du corps.

200. Des données de mesure bidimensionnelles de la forme du corps sont obtenues à l'aide d'une caméra numérique standard. Il a récemment été démontré comment l'indice de masse grasse et l'indice de masse maigre pouvaient être établis à partir de la simple silhouette du corps entier¹⁹. Des images de la silhouette pouvant aisément être réalisées avec des caméras classiques comme celles de téléphones portables, la mesure optique en 2D de la composition corporelle est donc parfaitement adaptée à diverses applications sur le terrain. Les scanners de surface tridimensionnels et les algorithmes connexes de traitement des données offrent une solution rapide, non invasive et adaptable pour mesurer la forme du corps. Les données de mesure obtenues grâce aux scanners de surface 3D se sont avérées très précises. Les algorithmes d'analyse actuels peuvent calculer automatiquement plus de 400 données concernant la longueur, la surface et le volume à partir d'une image du corps entier.

201. Il a récemment été démontré que les mesures concernant le volume et la longueur de certaines parties du corps établies grâce à un scanner de surface 3D à lumière structurée et doté de huit caméras pouvaient être utilisées pour anticiper de manière précise les données de composition corporelles obtenues par la méthode DEXA²⁰. On trouvera à la figure E-3 un exemple d'un scanner DEXA et d'un scanner de surface 3D appariés. Diverses mesures corporelles en 3D concernant le volume et la profondeur de parties du corps ont été utilisées pour estimer le pourcentage de masse grasse et de masse grasseuse dans l'ensemble du corps ($R^2 = 0,95$ et $0,89$, respectivement), ainsi que dans les sous-régions androïdes et gynoïdes, le tronc et les jambes. Toutefois, d'autres tests de validation par rapport à des méthodes de référence (DEXA et dilution isotopique) sont nécessaires.

¹⁹ XIE, B., et al., Accurate body composition measures from whole-body silhouettes, *Med. Phys.* **42** (2015) 4668-4677.

²⁰ LEE, J.J., FREELAND-GRAVES, J.H., PEPPER, M.R., YU, W., XU, B., Efficacy of thigh volume ratios assessed via stereovision body imaging as a predictor of visceral adipose tissue measured by magnetic resonance imaging, *Am. J. Human Biol.* **27** (2015) 445-457.

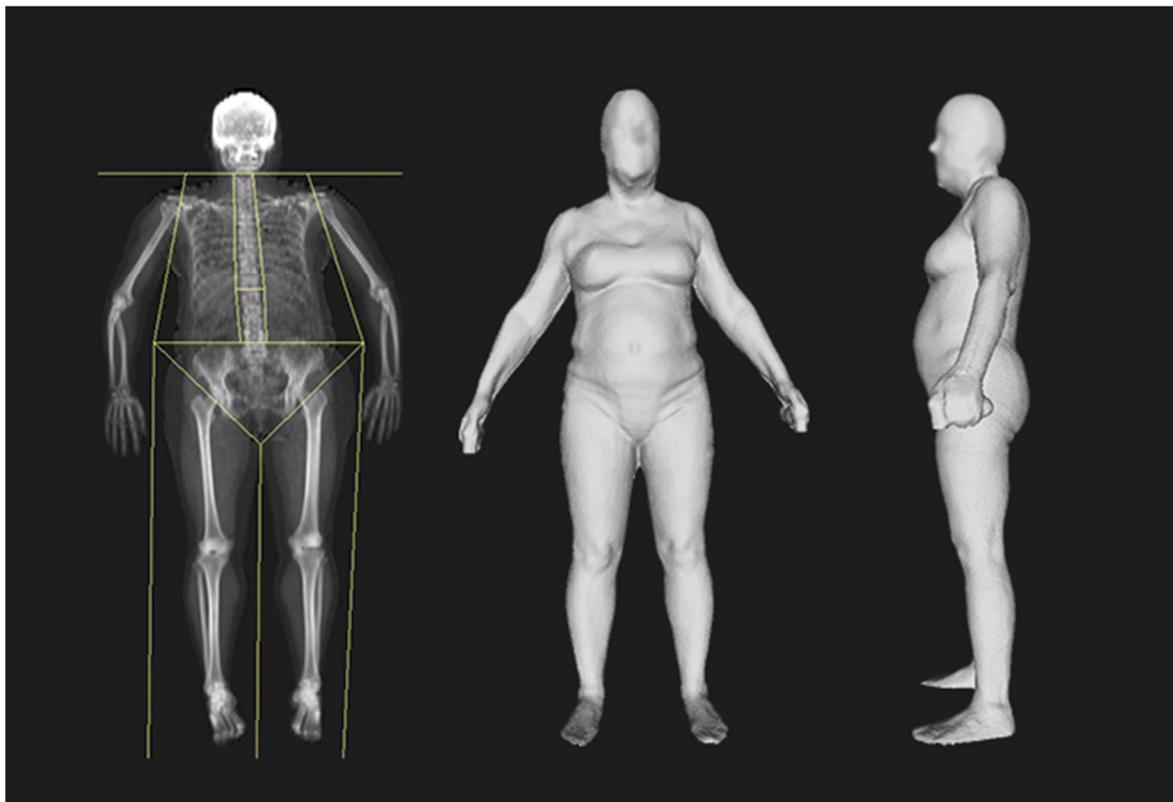


FIG. E-3. Scanner DEXA du corps entier (à gauche) apparié avec un scanner optique de surface 3D montrant une coupe frontale (au milieu) et une coupe sagittale (à droite). Les données de mesure de la forme du corps obtenues par des scanners de surface 3D, comme la largeur du torse et sa profondeur ainsi que les volumes des jambes et du tronc, peuvent être utilisées pour estimer avec précision la composition corporelle (masse grasse et masse maigre) mesurée par la méthode DEXA (Publiée avec l'aimable autorisation de J.A. Shepherd, Université de Californie, San Francisco, États-Unis).

202. Outre des estimations précises de composition corporelle, les scanners de surface corporelle 3D peuvent être utilisés pour obtenir plusieurs autres données de mesure pertinentes sur le plan clinique, notamment des mesures directes comme le tour de taille, ainsi que des indices simples dérivés comme le rapport taille/hanche et le rapport tour de taille/taille. Ces appareils offrent la méthode la plus accessible pour mesurer directement la surface corporelle. De même, cette méthode est l'outil le mieux adapté pour mesurer le volume d'une partie du corps, afin notamment de calculer le rapport volumique tronc-jambes, mesure dont il est prouvé qu'elle peut être un facteur de risque important du diabète, de l'hypertension, du syndrome métabolique et de la mortalité²¹.

²¹ WILSON, J.P., KANAYA, A.M., FAN, B., SHEPHERD, J.A., Ratio of trunk to leg volume as a new body shape metric for diabetes and mortality, PLoS One 8 7 (2013).

F. L'utilisation intégrée de méthodes basées sur les rayonnements, la génétique et les symbiotes pour lutter contre les moustiques vecteurs de maladies

F.1. Les moustiques et les maladies qu'ils transmettent

203. Les maladies transmises par les moustiques constituent une menace pour la santé humaine et le bien-être à l'échelle mondiale. Les moustiques du genre *Anopheles* (fig. F-1.) transmettent le paludisme, qui cause la mort de plus de 600 000 personnes par an, tandis que les aèdes *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* transmettent des maladies comme la dengue, qui menace plus de 2,5 milliards de personnes dans plus de 100 pays²². Au cours des dernières années, de nombreuses maladies transmises par les moustiques, en particulier celles transmises par *Aedes albopictus*, espèce très envahissante de moustique, se sont propagées dans des zones auparavant non touchées.



FIG. F-1. Moustique *Anopheles arabiensis* femelle prenant un repas de sang. (Photo : AIEA)

204. Le paludisme peut être traité par chimiothérapie, par exemple avec des médicaments à l'artémisinine mis au point par un co-lauréat du prix Nobel de médecine 2015²³. Il n'existe pas encore de vaccin contre le chikungunya, la dengue ou le virus zika, nouvellement apparu, et les antiviraux ne sont pas très efficaces. Par conséquent, la lutte contre les moustiques vecteurs est essentielle pour réduire le poids de ces maladies, ce que l'on essaie actuellement de faire principalement grâce à l'utilisation de matières traitées avec des insecticides, à la pulvérisation résiduelle intérieure et à l'utilisation de larvicides.

205. Ainsi que le reconnaît l'Organisation mondiale de la Santé, des méthodes supplémentaires de lutte contre les moustiques sont nécessaires de toute urgence, car les progrès réalisés jusqu'à présent dans ce domaine sont mis en péril par l'instabilité des ressources, la résistance croissante aux moyens

²² ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, Maladies à transmission vectorielle, Aide-mémoire n° 387, OMS, Genève (2014).

²³ CALLAWAY, E., CYRANOSKI, D., Anti-parasite drugs sweep Nobel prize in medicine 2015, Nature **526** (2015) 174–175.

disponibles et les changements dans le comportement des moustiques vecteurs de maladies, qui rendent les moustiques plus difficiles à cibler. La technique de l'insecte stérile (TIS), qui peut être associée à d'autres moyens de lutte pour réduire efficacement des populations de moustiques, est une méthode supplémentaire prometteuse²⁴.

F.2. La technique de l'insecte stérile comme outil de lutte contre les populations de moustiques

F.2.1. Mise au point de la technique de l'insecte stérile pour lutter contre les moustiques

206. Au cours des dix dernières années, des progrès importants ont été faits dans la mise au point du « dispositif TIS » pour quatre moustiques vecteurs de maladies (*Anopheles arabiensis*, *Anopheles gambiae*, *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus*). Le dispositif comprend l'équipement pour l'élevage de masse, des régimes alimentaires artificiels, des méthodes de stérilisation utilisant les rayons gamma et X, des méthodes de contrôle de la qualité et des procédures opérationnelles types pour la réalisation d'études de faisabilité sur l'utilisation de la TIS pour lutter contre des populations de moustiques. Il existe maintenant un régime alimentaire larvaire universel adapté aux moustiques *Anopheles* et *Aedes*, composé d'ingrédients largement disponibles et faciles à obtenir^{25,26}. Grâce à ce régime alimentaire liquide et aux procédures opérationnelles types associées, les larves *Anopheles* et *Aedes* peuvent être élevées en masse sur de grandes plateaux placés dans un nouveau système de support incliné^{27,28} (fig. F-2). Les cages sont conçues de manière à faciliter l'alimentation en sang, la fourniture de sucre, le ramassage des œufs et le nettoyage²⁹. En plus de la source de sucre à 10 % disponible *ad libitum*, un nourrisseur à membrane Hemotek modifié permet aux moustiques femelles de prendre des repas de sang et de l'eau sur le plancher de la cage pour l'oviposition³⁰. Le ramassage des œufs se fait par rinçage du fond de la cage. Les œufs sont ensuite séchés et quantifiés de manière fiable afin d'estimer la densité larvaire qui sera obtenue dans les plateaux d'élevage lors du cycle de production suivant (fig. F-3). Les moustiques mâles peuvent être stérilisés au stade de pupes avancées, avant l'émergence et le lâcher, à l'aide d'irradiateurs à rayons gamma ou X (fig. F-4). Des courbes dose-réponse ont été établies pour une des plus importantes espèces de moustiques ciblées, *Anopheles arabiensis*^{31,32}, en vue de choisir la dose optimale conférant une stérilité adéquate tout en permettant aux mâles d'entrer efficacement en compétition avec les mâles sauvages.

²⁴ LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICH, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, *Curr. Op. Inse. Sci.* **10** (2015) 156–162.

²⁵ DAMIENS, D., BENEDICT, M.Q., WILLE, M., GILLES, J.R., An inexpensive and effective larval diet for *Anopheles arabiensis* (Diptera : Culicidae) : Eat like a horse, a bird, or a fish ? *J. Med. Entomol.* **49** (2012) 1001–1011.

²⁶ PUGGIOLI, A., et coll., *Efficiency of three diets for larval development in mass rearing Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **50** (2013) 819–825.

²⁷ BALESTRINO, F., BENEDICT, M.Q., GILLES, J.R., A new larval tray and rack system for improved mosquito mass rearing, *J. Med. Entomol.* **49** (2012) 595–605.

²⁸ BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., GILLES, J.R., BELLINI, R., Validation of a new larval rearing unit for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) Mass Rearing, *PLoS One* **19** (2014).

²⁹ BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., BELLINI, R., PETRIC D., GILLES, J.R., Mass production cage for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **51** (2014) 155–163.

³⁰ DAMIENS, D., et coll., *Different blood and sugar feeding regimes affect the productivity of Anopheles arabiensis colonies* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **50** (2013) 336–343.

³¹ NDO, C., et coll., *X-ray sterilization of the An. arabiensis genetic sexing strain 'ANO IPCL1' at pupal and adult stages*, *Acta Trop.* **131** (2014) 124–128.



FIG. F-2. Régime larvaire liquide, plateaux et support mis au point pour l'élevage en masse de moustiques au stade larvaire. (Photo : AIEA)

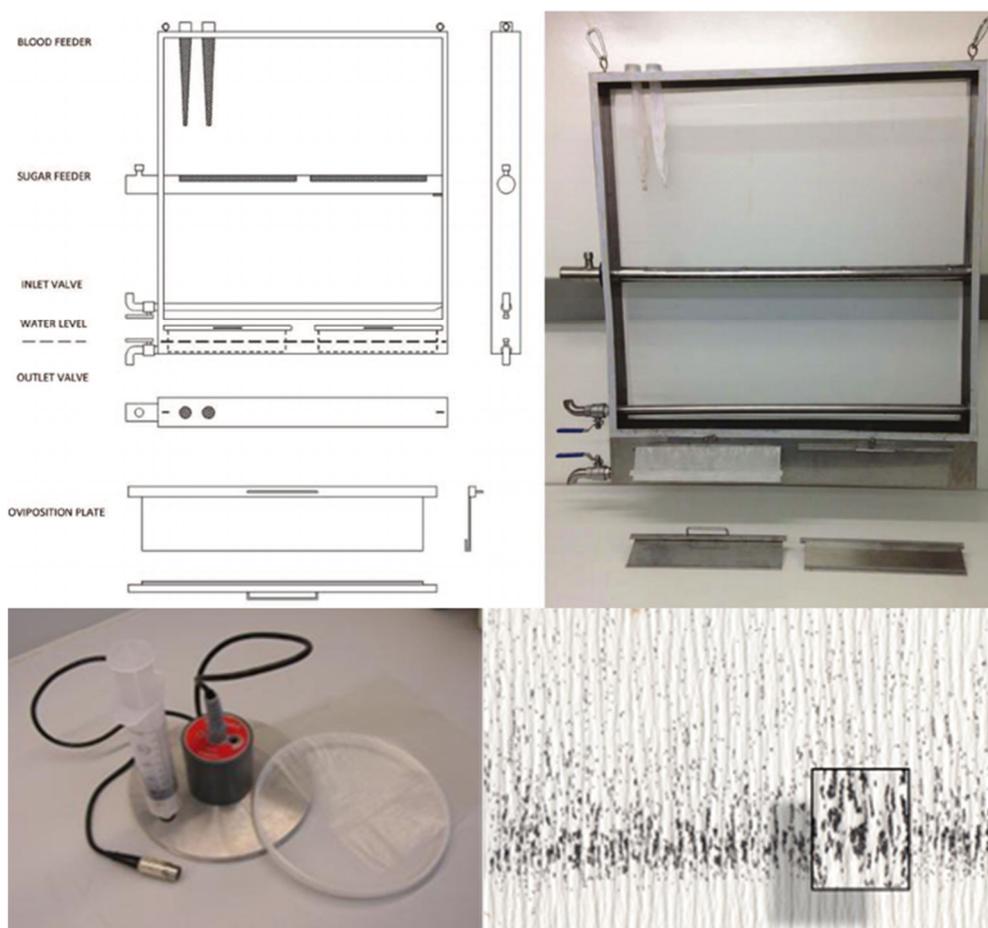


FIG. F-3. Cage pour l'élevage en masse de moustiques *Aedes* adultes, dispositif d'alimentation en sang et œufs ramassés sur papier filtre. (Photo : AIEA)

³² YAMADA, H., VREYSEN, M.J., GILLES, J.R., MUNHENGA, G., DAMIENS, D.D., The effects of genetic manipulation, dieldrin treatment and irradiation on the mating competitiveness of male *Anopheles arabiensis* in field cages, *Malar. J.* 13 (2014) 318.



FIG. F-4. Des irradiateurs à rayons gamma (à gauche) ou à rayons X (à droite) sont utilisés pour stériliser les moustiques mâles. (Photo : AIEA)

207. Comme les moustiques mâles subissent un stress lié à plusieurs processus, notamment l'élevage en masse, la stérilisation, le transport et le lâcher, il est très important de veiller à ce que les insectes soient de bonne qualité. En plus des paramètres de contrôle de la qualité enregistrés au cours de la phase de production, des études de compétitivité sont menées dans des conditions semi-naturelles pour évaluer la qualité des insectes. Les cages sur le terrain simulent des conditions semi-naturelles et offrent un bon substitut de l'environnement naturel pour effectuer des expériences de ce type, ainsi que des études de comportement, notamment sur l'essaimage et la compatibilité d'accouplement. Elles ont été utilisées pour tester l'effet de plusieurs rapports mâles stériles/mâles sauvages et l'incidence de l'âge des mâles stériles sur l'issue de leur accouplement. Les données préliminaires obtenues pour *Anopheles arabiensis* du Soudan, *Anopheles gambiae* du Burkina Faso et *Aedes albopictus* de Chine et d'Italie ont été très utiles pour l'amélioration des processus de production et, par conséquent, de la compétitivité des mâles stériles, qui est un facteur déterminant du succès d'un programme de gestion intégrée des ravageurs à l'échelle d'une zone comprenant un volet TIS.

F.2.2. Autres besoins technologiques

208. Dans le cas de la TIS appliquée à des moustiques, comme pour d'autres méthodes biologiques, il est primordial de ne lâcher que des moustiques mâles, car les femelles sont les vecteurs de la maladie, les mâles ne piquant pas les humains pour aspirer leur sang et ne transmettant donc pas la maladie. La séparation des sexes en vue d'éliminer les femelles de la ligne de production est possible à une petite échelle grâce au dimorphisme sexuel des moustiques *Aedes*^{33,34} ou à l'ajout, dans les repas de sang, de produits chimiques comme l'ivermectine, qui sont toxiques pour les femelles de l'espèce *Anopheles arabiensis*³⁵. Le principal défi à relever est la mise au point de souches de sexage génétique efficaces et robustes permettant d'éliminer les moustiques femelles de manière simple et sûre à l'échelle de l'élevage en masse³⁶. Une souche de sexage génétique d'*Anopheles arabiensis* portant une

³³ FOCKS, D.A., An improved separator for the developmental stages, sexes, and species of mosquitoes (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **17** (1980) 567–568.

³⁴ CARVALHO, D.O., et coll., Mass production of genetically modified *Aedes aegypti* for field releases in Brazil, *J. Vis. Exp.* **83** (2014) 3579.

³⁵ YAMADA, H., SOLIBAN, S.M., VREYSEN, M.J., CHADEE, D.D., GILLES, J.R., Eliminating female *Anopheles arabiensis* by spiking blood meals with toxicants as a sex separation method in the context of the sterile insect technique, *Parasit. Vectors* **6** (2013) 197.

³⁶ GILLES, J.R., et coll., Towards mosquito sterile insect technique programmes: exploring genetic, molecular, mechanical and behavioural methods of sex separation in mosquitoes, *Acta Trop.* **132** Suppl (2014) S178–S187.

mutation qui confère une résistance à un insecticide (un traitement à la dieldrine tuerait tous les moustiques femelles vulnérables mais pas les moustiques mâles résistants) est disponible depuis plusieurs années et son utilisation potentielle pour des lâchers sur le terrain a récemment été étudiée. On a constaté que cette souche présentait une productivité faible et une instabilité génétique et que de petites quantités de résidus de dieldrine étaient présentes chez les adultes mâles issus d'œufs traités avec cet insecticide. Par conséquent, cette souche n'a pas été recommandée pour des applications opérationnelles à grande échelle³⁷. On s'efforce maintenant d'identifier de nouveaux marqueurs létaux morphologiques ou conditionnels pour *Anopheles arabiensis* ainsi que pour *Aedes albopictus* et *Aedes aegypti* en vue de la mise au point de souches de sexage génétique efficaces.

209. Parallèlement à la mise au point en cours du dispositif TIS pour les moustiques, les technologies doivent être améliorées en vue d'une application à un niveau opérationnel. L'utilisation à grande échelle de la TIS contre d'autres insectes ravageurs ne cesse de mettre en évidence des zones dans lesquelles de nouvelles technologies pourraient améliorer encore l'efficacité des programmes de lutte contre les insectes. Les points clés à résoudre sont la manutention, le transport jusqu'à la zone cible et le lâcher de mâles stériles lui-même, aucune de ces opérations ne devant avoir de conséquences importantes sur la survie ou la performance d'accouplement après le lâcher.

F.3. Méthodes complémentaires et leur combinaison avec la technique de l'insecte stérile pour lutter contre les populations de moustiques

F.3.1. Approches génétiques complémentaires de la lutte contre les moustiques

210. Outre la TIS, plusieurs autres méthodes de gestion des populations de moustiques vecteurs de maladies ont été mises au point. Ces plateformes technologiques peuvent être classées *grosso modo* en deux groupes. Le premier comprend les approches « auto-limitatives », définies comme des méthodes dont l'effet dans l'environnement ne saurait durer. Des lâchers continus sont donc nécessaires pour obtenir l'effet de réduction de la population souhaité. Toutes les méthodes de réduction de populations, comme la TIS, la méthode transgénique RIDL (lâcher d'insectes porteurs d'un gène létal dominant) et la technique de l'insecte incompatible (TII) basée sur des symbiotes, figurent parmi les approches auto-limitatives. Le deuxième groupe comprend les approches « auto-entretenu », définies comme des méthodes « invasives » dont l'effet dans l'environnement peut durer grâce à une sélection positive. Ces méthodes pourraient être utilisées pour remplacer une population de moustiques ciblée par une autre population ne pouvant transmettre la maladie. Différentes méthodes faisant appel à des technologies transgéniques ou à des bactéries symbiotiques ont été suggérées.

211. La méthode transgénique RIDL repose sur l'utilisation d'un système génétique comportant un gène létal³⁸. Des souches homozygotes porteuses du système RIDL peuvent être cultivées en laboratoire seulement en présence d'un répresseur, qui est habituellement la tétracycline. En l'absence de ce répresseur, la lignée meurt. La souche d'*Aedes aegypti* OX513A, porteuse de cette cassette génétique, a été étudiée dans le cadre d'essais de réduction de populations sur l'île de Grand Cayman, au Brésil et au Panama. Les descendants mâles et femelles issus de l'accouplement de mâles OX513A lâchés et de femelles sauvages héritent d'une copie de la cassette génétique létale et meurent au début du stade pupal. Des essais de réduction de populations par lâchers répétés de mâles transgéniques ont

³⁷ YAMADA, H., et coll., The *Anopheles arabiensis* genetic sexing strain ANO IPCL1 and its application potential for the sterile insect technique in integrated vector management programmes, *Acta Trop.* **142** (2015) 138–144.

³⁸ ALPHEY, L., Genetic control of mosquitoes, *An. Rev. Entomol.* **59** (2014) 205–224.

été effectués à petite échelle, avec des niveaux moyens de réduction de 70-80 %^{39,40}. Parmi les problèmes associés à cette approche figurent l'absence de système de sexage efficace et robuste, système absolument nécessaire pour éliminer le risque de lâcher de femelles pouvant transmettre des agents pathogènes, la possibilité d'une évolution de la résistance dans des conditions d'élevage de masse ainsi que des questions liées aux droits de propriété intellectuelle, la perception négative du public dans certaines zones et l'approbation des organismes de réglementation.

F.3.2. Méthodes basées sur des symbiotes

212. Les deux autres méthodes, la TII et la méthode de remplacement de populations, sont basées sur *Wolbachia*, genre de bactéries symbiotiques héritées de la mère. Celui-ci peut induire plusieurs anomalies de reproduction, la plus courante étant l'incompatibilité cytoplasmique, qui, sous sa forme la plus simple, se manifeste par la mortalité embryonnaire lors de croisements entre des mâles infectés et des femelles saines⁴¹.

213. Ce symbiote a été utilisé comme outil pour réduire (TII) ou remplacer des populations d'espèces importantes de moustiques vecteurs de maladies. La méthode de réduction de populations basée sur la TII a été testée dans le cadre de petits essais pilotes contre *Culex pipiens*, *Culex pipiens quinquefasciatus*, *Aedes polynesiensis* et *Aedes albopictus*^{42,43}. Le principal problème lié à cette méthode est qu'elle requiert aussi un système de sexage parfait, dont on ne dispose pas actuellement, pour éliminer le risque de lâcher des femelles fertiles pouvant transmettre des agents pathogènes. Certaines souches de *Wolbachia* sont aussi capables de bloquer la transmission d'importants agents pathogènes pour l'homme, dont des plasmodiums et les agents responsables de la dengue et du chikungunya⁴⁴. Des lâchers de moustiques d'une lignée d'*Aedes aegypti* transinfectée avec la souche wMel de *Wolbachia*, qui induit une forte incompatibilité cytoplasmique et confère aussi une protection contre la dengue, ont permis de remplacer des populations non infectées près de Cairns, dans le Queensland (Australie). Cependant, l'infection par wMel a un effet négatif sur la fécondité et la production larvaire, et la fréquence d'infection n'atteint généralement pas 100 %, ce qui laisse à penser que les moustiques *Aedes aegypti* infectés par wMel pourraient ne pas envahir rapidement les populations voisines⁴⁵. Parmi les autres préoccupations relatives à la durabilité et à la biosécurité de la stratégie de remplacement de populations figurent l'évolution potentielle de la résistance et le fait que le blocage de l'agent pathogène puisse être partiel ou même absent dans certaines associations

³⁹ CARVALHO, D.O., et coll., Suppression of a field population of *Aedes aegypti* in Brazil by sustained release of transgenic male mosquitoes, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **9** (2015).

⁴⁰ HARRIS, A.F., et coll., Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes, *Nat. Biotech.* **30** (2012) 828-830.

⁴¹ WERREN, J.H., BALDO, L., CLARK, M.E., *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology, *Nat. Rev. Microbiol.* **6** (2008) 741-751.

⁴² LAVEN, H., Eradication of *Culex pipiens fatigans* through cytoplasmic incompatibility, *Nature* **216** (1967) 383-384.

⁴³ LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICH, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, *Curr. Op. Inse. Sci.* **10** (2015) 156-162.

⁴⁴ MOREIRA, L.A., et coll., *A Wolbachia symbiont in Aedes aegypti limits infection with dengue, Chikungunya, and Plasmodium*, *Cell* **139** (2009) 1268-1278.

⁴⁵ HOFFMAN, A.A., et coll., *Stability of the wMel Wolbachia infection following invasion into Aedes aegypti populations*, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8** (2014).

symbiotiques. En effet, l'infection par *Wolbachia* peut renforcer l'infection par d'autres agents pathogènes, dont des arbovirus [F.24]⁴⁶.

F.3.3. Autres exigences pour l'application réussie des méthodes de lutte génétique

214. L'application à grande échelle de tout programme de réduction de populations (TIS, méthode transgénique ou méthode basée sur des symbiotes) est largement dépendante de la disponibilité de méthodes de séparation des sexes efficaces et robustes, car le lâcher de femelles entraînerait un risque important de transmission d'agents pathogènes. En l'absence de méthode efficace de séparation des sexes, une stratégie sûre et efficace de lutte contre des populations de moustiques vecteurs de maladies requerrait l'utilisation combinée de la TIS et de méthodes basées sur des symbiotes. L'essai de validation de cette approche combinée a été mis au point pour l'espèce de moustiques *Aedes albopictus*^{47,48}.

215. Quelle que soit la méthode ou la combinaison de méthodes la plus efficace contre un moustique vecteur d'une maladie, bien particulier, dans une région donnée, l'appui du gouvernement et la collaboration du public seront nécessaires pour garantir le succès de l'opération. Les méthodes transgéniques devraient présenter plus de difficultés, car l'opposition du public est souvent plus forte et une approbation des organismes de réglementation plus stricte est nécessaire, ce qui n'est pas le cas avec des méthodes basées sur l'utilisation de symbiotes. En revanche, la TIS est bien acceptée par les populations locales et ne requiert pas l'approbation d'organismes de réglementation. Des questions liées à la propriété intellectuelle dans le cadre de l'utilisation de souches transgéniques et de méthodes basées sur des symbiotes doivent aussi être réglées pour que de telles techniques puissent être appliquées à un niveau opérationnel. Toutefois, il faudra plaider en faveur de nouvelles méthodes, car il est certain que les forces de l'évolution entraîneront une résistance croissante aux méthodes classiques de lutte contre les moustiques et même, *in fine*, aux nouvelles méthodes de protection contre des agents pathogènes transgéniques et basées sur *Wolbachia*. En revanche, aucune résistance ne peut être développée contre la méthode utilisant la TIS, car l'irradiation induit de manière aléatoire des mutations létales dominantes chez l'insecte ciblé. Une approche dynamique de la réduction de populations, intégrant la TIS et d'autres méthodes compatibles dans un programme de lutte contre les insectes ravageurs à l'échelle d'une zone, peut être la seule façon de gérer des populations de moustiques et de lutter potentiellement contre les nombreuses maladies qu'ils transmettent.

⁴⁶ DODSON, B.L., et coll., *Wolbachia enhances West Nile virus (WNV) infection in the mosquito Culex tarsalis*, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8** (2014).

⁴⁷ ZHANG, D., ZHENG, X., XI, Z., BOURTZIS, K., GILLES, J.R.L., Combining the sterile insect technique with the incompatible insect technique: I – Impact of *Wolbachia* infection on the fitness of triple- and double-infected strains of *Aedes albopictus*, *PLoS One* **10** (2015).

⁴⁸ ZHANG, D., LEES, R.S., XI, Z., GILLES, J.R.L., BOURTZIS, K., Combining the sterile insect technique with *Wolbachia*-based approaches: II – A safer approach to *Aedes albopictus* population suppression programmes, designed to minimize the consequences of inadvertent female release, *PLoS One* **10** (2015a).

G. Techniques isotopiques pour des mesures efficaces de conservation des sols

G.1. Utilisation combinée des techniques faisant appel aux radionucléides provenant des retombées et aux isotopes stables de composés spécifiques pour des mesures efficaces de conservation des sols

216. La dégradation des sols causée par des pratiques de gestion agricole inappropriées entraîne une perte en sol fertile et des rendements de culture médiocres, et contribue de ce fait à l'insécurité alimentaire. De plus, la perte de terres arables ainsi que la sédimentation et la pollution des cours d'eau et des lacs constituent une menace environnementale, sociale et économique importante.

217. En septembre 2015, l'Initiative Économie de la dégradation des terres (Initiative ELD) a présenté à la soixante-dixième session de l'Assemblée générale des Nations Unies un rapport selon lequel les pertes des services écosystémiques dues à la dégradation des terres sont estimées à un maximum de 10,6 billions de dollars É.-U. par an, tandis que la dégradation des terres touche directement 1,4 milliard de personnes dans le monde⁴⁹.

218. Afin d'encourager une utilisation et une gestion plus durables des ressources agricoles, il est urgent d'obtenir des données quantitatives fiables sur l'ampleur et l'étendue géographique de la redistribution des sols (érosion/sédimentation), et de mieux comprendre les facteurs clés intervenant dans les processus d'érosion et de sédimentation. Cette meilleure compréhension contribuera à identifier les zones d'érosion et à y appliquer des mesures appropriées de conservation des sols afin de lutter efficacement contre les pertes en sol dues à l'érosion, et de réduire ainsi les impacts économiques, sociaux et environnementaux.

G.1.1. Radionucléides provenant des retombées pour la quantification des vitesses d'érosion et de sédimentation

219. L'évaluation de l'érosion des sols et la quantification de l'efficacité des stratégies de conservation peut être facilitée par le recours à des radionucléides provenant des retombées (FRN) comme le césium 137, issu d'essais d'armes thermonucléaires dans les années 1950 et 1960, ainsi qu'à des radio-isotopes naturels, géogènes comme le plomb 210 et cosmogènes comme le béryllium 7.

220. Les FRN se déposent sur la terre avec les précipitations, puis se lient fortement à des particules fines du sol. Ils constituent donc des traceurs de sol très utiles, pouvant contribuer à déterminer les vitesses de sédimentation et d'érosion des sols, et pouvant par la suite être employés pour évaluer l'efficacité des mesures de conservation des sols visant à lutter contre l'érosion et empêcher ainsi la sédimentation excessive associée à l'érosion. En raison de leurs origines et de leurs périodes différentes, le plomb 210 et le césium 137 peuvent offrir une base solide pour retracer l'histoire de l'érosion des sols au niveau des grands bassins hydrologiques sur des périodes à long et moyen terme, respectivement. Grâce à l'inclusion du béryllium 7, les FRN permettent également d'évaluer les pertes par érosion à court terme (tableau G-1). Bien que de nombreuses études n'aient utilisé qu'un seul et

⁴⁹ ECONOMICS OF LAND DEGRADATION INITIATIVE, The Value of Land: Prosperous Lands and Positive Rewards through Sustainable Land Management, Rapport, Initiative ELD, Bonn (2015).

unique FRN, le recours à deux, voire trois, FRN peut fournir davantage d'informations précieuses sur l'histoire de l'érosion en générant des ensembles de données à différentes échelles de temps.⁵⁰

221. L'utilisation croissante dans le monde des FRN pour quantifier les vitesses de sédimentation et d'érosion des sols d'un large éventail d'environnements agricoles, sur une échelle allant du terrain individuel jusqu'au bassin versant, a clairement démontré la validité et le potentiel de ces techniques isotopiques⁵¹.

Tableau G-1. Comparaison des avantages et des limites du césium 137 (¹³⁷Cs), du plomb 210 (²¹⁰Pb) et du béryllium 7 (⁷Be) pour la quantification des vitesses de redistribution des sols après des processus d'érosion et/ou de sédimentation⁵².

FRN	Origine	Énergie (keV)	Temps		Prélèvement d'échantillons	Barème	Détecteur	Mesure		Datation des sédiments
			t _{1/2}	Durée				Labo	<i>In situ</i>	
¹³⁷ Cs	Artificielle anthropique	662	30,2 ans	50 ans (MT)	Simple	Parcelle au vaste bassin versant	HPGe γ classique	Facile	Facile	Faisable
²¹⁰ Pb	Naturelle géogène	46	22,8 ans	100 ans (LT)	Simple	Parcelle au bassin versant	HPGe γ à large gamme d'énergie	Plus difficile	Limitée et pas fiable	Faisable
⁷ Be	Naturelle cosmogène	477	53,3 j	≤ 6 m (CT)	Par incréments fins de profondeur	Parcelle locale au terrain	HPGe γ classique	Facile	Temps de comptage plus long cf. ¹³⁷ Cs	Faisable

G.1.2. Techniques faisant appel à des isotopes stables de composés spécifiques pour la détermination de sources de sédiments

222. Une technique de criminalistique faisant appel aux isotopes stables récemment mise au point et basée sur les signatures d'isotopes stables de composés spécifiques (CSSI) présents dans des biomarqueurs organiques propres au sol permet d'identifier les sources de sédiments et de quantifier leurs apports respectifs. Ainsi, les signatures CSSI provenant de différentes utilisations des terres peuvent servir à compléter les informations fournies par les données FRN.

223. Ceci est possible car la majorité des peuplements végétaux produisent un éventail de composés organiques qui s'infiltrent par les racines dans le sol et se lient à ses particules, marquant ainsi une utilisation précise du sol avec leurs biomarqueurs. Bien que toutes les plantes produisent des biomarqueurs similaires, la signature du carbone 13, qui est un isotope stable, diffère habituellement pour chaque espèce végétale. La technique CSSI est fondée sur la mesure de la signature isotopique du carbone 13 stable de la chaîne droite (C14–C24) des acides gras d'origine végétale présents dans le sol. L'examen en parallèle des empreintes CSSI de l'utilisation de la terre et des informations que donnent les FRN des sédiments dans les zones de dépôt offre aux chercheurs une approche précise et puissante pour déterminer les origines des sédiments afin de repérer les zones sensibles à l'érosion des sols.

⁵⁰ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, IAEA-TECDOC-1741, AIEA, Vienna (2014).

⁵¹ MABIT, L., et al., Fallout ²¹⁰Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review, Earth-Science Reviews **138** (2014) 335–351.

⁵² TAYLOR, A., BLAKE, WH., SMITH, H.G., MABIT, L., KEITH-ROACH, M.J., Assumptions and challenges in the use of fallout beryllium-7 as a soil and sediment tracer in river basins, Earth-Science Reviews **126** (2013) 85–95.

224. Les techniques CSSI et FRN sont des méthodes complémentaires pour l'étude de la redistribution et de l'origine des sédiments des terres. Les radionucléides provenant des retombées fournissent des informations sur l'ampleur de la redistribution des sols dans les systèmes agricoles (ou sur la sédimentation à leurs émissaires), tandis que les empreintes CSSI fournissent des informations sur l'origine de ces sédiments.

225. Il est essentiel de mieux comprendre comment réduire les problèmes agro-environnementaux d'érosion des sols et de sédimentation, qui se posent par la suite, pour lutter avec succès contre la dégradation des sols ainsi que pour atténuer bon nombre des effets attendus du changement climatique. Le recours à ces méthodes isotopiques intégrées pourrait permettre aux communautés agricoles d'adopter des mesures d'atténuation spécifiques et efficaces, telles que le travail minimum du sol, le paillage, les cultures de couverture, le terrassement, les cultures en courbe de niveau et la construction de petits murs en pierre et de clôtures, pour réduire le plus possible la perte de fertilité des sols, la baisse de productivité des cultures, la détérioration de la qualité de l'eau et la sédimentation des barrages (figures G-1 et G-2).



FIG. G-1. Utilisation de terrasses et de la culture en courbe de niveau pour favoriser la conservation des sols dans une plantation de thé dans la Province de Lam Dong (Viet Nam). (Photo : AIEA)



FIG. G-2. Transport des sédiments par érosion d'un bassin versant vers un barrage à Sri Lanka. (Photo : AIEA)