

Conférence générale

GC(58)/INF/4

17 juillet 2014

Distribution générale

Français

Original : anglais

Cinquante-huitième session ordinaire

Point 16 de l'ordre du jour provisoire
(GC(58)/1, Add.1 et Add.2)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2014

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 essentiellement en 2013.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2014* passe en revue les domaines suivants : les applications énergétiques, la fission avancée et la fusion, l'utilisation des accélérateurs et des réacteurs de recherche, la production animale et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'imagerie numérique et la téléradiologie, la technologie des rayonnements pour le traitement des eaux usées et des biosolides et les proliférations d'algues nuisibles. Une documentation complémentaire à ce rapport concernant le rôle de la gestion des connaissances nucléaires et l'électronucléaire et le changement climatique est disponible en anglais sur le site web de l'Agence¹.
- Des informations sur les activités de l'AIEA concernant les sciences et la technologie nucléaires sont aussi présentées dans le Rapport annuel de l'AIEA pour 2013 (GC(58)/3), en particulier dans le chapitre consacré à la technologie, et dans le rapport sur la coopération technique pour 2013 (GC(58)/INF/5).
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations faites par le Conseil des gouverneurs et d'autres observations communiquées par les États Membres.

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC58/Documents/>

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2014

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. Avec 434 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde à la fin de 2013, la capacité mondiale de production d'énergie nucléaire était de 371,7 GW(e). Quatre nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau et dix nouveaux réacteurs ont été mis en chantier. Le Bélarus est devenu le deuxième pays « primo-accédant » en trois décennies à démarrer la construction de sa première centrale nucléaire. Les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie, et en particulier en Chine. Le nombre de réacteurs en construction en 2013 s'élevait à 72, ce qui constitue un record depuis 1989. Quarante-huit d'entre eux se trouvaient en Asie, tout comme 42 des 52 nouveaux réacteurs à avoir été couplés au réseau depuis 2000.

2. Trente pays utilisent actuellement l'électronucléaire et un nombre équivalent de pays envisagent de l'inclure dans leur bouquet énergétique. Sur les 30 pays exploitant déjà 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.

3. La Conférence ministérielle sur l'électronucléaire au XXI^e siècle organisée par l'AIEA en juin 2013 a réaffirmé que l'électronucléaire demeurerait une option importante dans le cas de nombreux pays pour améliorer la sécurité énergétique, réduire l'impact de la volatilité des prix des combustibles fossiles et atténuer les effets du changement climatique. Selon la déclaration de clôture, « l'électronucléaire, en tant que source stable d'électricité de base à une époque où la demande mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter, complète d'autres sources d'énergie, y compris les énergies renouvelables ». Dans les projections 2013 de l'Agence, l'électronucléaire devrait augmenter d'ici à 2030 de 17 % dans la projection basse et de 94 % dans la projection haute. Ces pourcentages sont légèrement inférieurs aux prévisions de 2012, traduisant l'impact continu de l'accident de Fukushima Daiichi, les prix peu élevés du gaz naturel, et l'utilisation croissante des énergies renouvelables. D'autres informations mettent l'accent sur les liens entre l'électronucléaire et le changement climatique, car l'électronucléaire, l'énergie hydraulique et l'énergie éolienne sont, de toutes les sources de production d'électricité, celles qui produisent le moins d'émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie.

4. La mise en œuvre du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire est restée au cœur des mesures prises par les États Membres, le Secrétariat et d'autres parties prenantes pour renforcer la sûreté. Des améliorations de la sûreté continuent d'être apportées dans les centrales nucléaires, également en appliquant les enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi. Cela a contribué à renforcer le cadre mondial de sûreté nucléaire. Étant donné que la mise en commun et le transfert des connaissances sont essentiels pour la gestion sûre et efficace de toute activité nucléaire, des informations supplémentaires consacrées à la gestion des connaissances nucléaires sont disponibles.

5. Les améliorations et travaux de recherche continus dans le domaine des réacteurs à fission avancés, comme les réacteurs refroidis par eau, les réacteurs à neutrons rapides et les réacteurs refroidis par gaz, devraient contribuer à une utilisation plus efficace du combustible nucléaire et à

une réduction des volumes de déchets radioactifs. Les réacteurs de faible ou moyenne puissance et l'utilisation des centrales nucléaires pour des applications non électriques, telles que le dessalement, la production de chaleur industrielle, le chauffage urbain et la production d'hydrogène, suscitent de plus en plus d'intérêt.

6. Les prix au comptant de l'uranium étant restés au faible niveau observé depuis sept ans, les entreprises réduisent leurs activités de collecte de fonds pour la prospection et les études de faisabilité, ce qui aura un impact sur la production future. Bien que des ressources supplémentaires aient été signalées dans plusieurs pays, de nombreux nouveaux projets qui avaient été annoncés seront probablement retardés.

7. La capacité mondiale d'enrichissement de l'uranium a continué de s'orienter vers des technologies à plus haut rendement énergétique. Des usines de diffusion gazeuse ont été fermées en 2012 et 2013. Des progrès ont été accomplis dans les projets d'enrichissement par centrifugation et l'enrichissement par laser avance sur la voie de la commercialisation.

8. La capacité totale de fabrication de combustible est restée relativement stable, même si elle devrait augmenter dans les prochaines années pour répondre à la hausse prévue de la demande.

9. Étant donné que des installations de stockage définitif du combustible usé et des déchets de haute activité ne sont pas encore entrées en service, la quantité de combustible usé entreposé continue d'augmenter. Une quantité supplémentaire de 10 000 t ML de combustible usé a été déchargée du parc mondial de centrales nucléaires, ce qui porte la quantité totale cumulée de combustible usé déchargé à environ 370 500 t ML.

10. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs, sauf pour les déchets de haute activité (DHA) et le combustible nucléaire usé déclaré comme déchet, sont en service dans le monde. Le processus d'autorisation de la construction d'installations de stockage géologique en Finlande, en France et en Suède est en cours. Les travaux de recherche-développement sur le stockage définitif des DHA et du combustible usé progressent également dans d'autres États Membres.

11. Il y a un travail considérable à accomplir dans le domaine du déclassement : en décembre 2013, 147 réacteurs de puissance avaient été mis définitivement à l'arrêt dans le monde, et plus de 400 réacteurs de recherche et assemblages critiques et plusieurs centaines d'autres installations nucléaires, telles que des installations de gestion des déchets radioactifs ou du cycle du combustible, avaient été déclassés ou étaient en cours de démantèlement. Environ 40 % de tous les réacteurs nucléaires de puissance en service ont aujourd'hui plus de 30 ans et 7 % d'entre eux environ ont plus de 40 ans. Même si certains pourront encore fonctionner jusqu'à 60 ans, nombre d'entre eux seront retirés du service dans les 10 à 20 prochaines années.

12. En 2013, les opérations d'assainissement menées dans les zones touchées par l'accident de Fukushima Daiichi ont progressé. Le Japon a consacré d'importantes ressources à la planification et à la mise en œuvre des activités de remédiation des grandes zones contaminées en dehors du site. Des efforts ont été menés particulièrement pour permettre le retour des populations évacuées. La coordination des activités de remédiation et des efforts de reconstruction et de revitalisation a en outre bien progressé.

13. Avec le chantier d'ITER, le programme mondial sur la fusion par confinement magnétique s'oriente de plus en plus vers la production d'énergie de fusion à l'échelle industrielle dans un réacteur de puissance. De nombreux pays, de manière indépendante, planifient des programmes et lancent de nouvelles activités de R-D devant déboucher sur une démonstration que l'énergie de fusion peut faire l'objet d'une commercialisation. De manière collective, ces plans et activités constituent un

programme de centrale de démonstration à fusion (DEMO), même s'il n'existe pas de consensus ou de concertation sur une feuille de route pour la démonstration de la production d'électricité à partir de la fusion.

14. De plus en plus d'États Membres s'intéressent à l'élaboration de programmes de réacteurs de recherche, et certains prévoient de se servir de leur premier réacteur de recherche pour la mise en place de l'infrastructure de science et de technologie nucléaires dans leur pays. Trois pays construisent actuellement de nouveaux réacteurs de recherche, et plusieurs autres ont des plans officiels déjà en place ou envisagent de développer encore leur programme. Les réacteurs de recherche anciens sont actuellement remplacés par des réacteurs polyvalents, mais moins nombreux, et il faudra développer la coopération internationale pour assurer un large accès à ces installations et faire en sorte qu'elles soient utilisées de manière efficiente.

15. Des problèmes d'exploitation sont réapparus en 2013 dans des installations de traitement et des réacteurs de recherche anciens, même si l'approvisionnement en molybdène 99 (⁹⁹Mo) n'a pas été autant perturbé qu'entre 2007 et 2010 grâce à une meilleure gestion de la demande et à la diversification de l'approvisionnement. L'Australie et l'Afrique du Sud restent les principaux fournisseurs de ⁹⁹Mo non produit à partir d'UHE. L'Afrique du Sud a continué de convertir ses processus pour n'utiliser que de l'UFE. La Belgique et les Pays-Bas ont poursuivi leurs plans pour remplacer l'UHE par de l'UFE dans leurs processus de production à l'échelle commerciale.

16. La République tchèque, le Viet Nam et la Hongrie ne détiennent désormais plus de combustible à l'UHE depuis la réexpédition de leur combustible usé à l'UHE en Fédération de Russie.

17. La technologie nucléaire continue de contribuer grandement à la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement. De nombreux États Membres sont convaincus que l'électronucléaire répondrait aux préoccupations liées au changement climatique en réduisant les émissions de carbone. Les technologies autres que la production d'électricité apportent également une contribution importante à travers les programmes et la coopération technique dans les domaines de la santé humaine, de l'alimentation et de l'agriculture, de la gestion des ressources en eau, de l'environnement marin et terrestre, de la production de radio-isotopes et de la technologie des rayonnements. L'utilisation sûre et efficace de la médecine nucléaire et des techniques de radiothérapie permet de lutter contre l'épidémie de cancer croissante au niveau mondial, qui touchera les pays en développement de manière disproportionnée dans les années à venir. Les travaux de l'AIEA dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture contribuent à l'éradication de la pauvreté et de la faim, car ils font appel aux technologies nucléaires pour améliorer la gestion des sols et des ressources terrestres et mettre au point des variétés végétales pouvant pousser dans des sols marginaux ou salins et dans des conditions difficiles. D'autres technologies sont utilisées pour améliorer la production et la santé animales, pour lutter contre les insectes ravageurs qui détruisent les cultures et transmettent des maladies à l'homme et aux animaux, et pour irradier des produits alimentaires dans des conditions sûres afin de protéger les consommateurs contre la propagation de maladies d'origine alimentaire et de réduire la détérioration des aliments.

18. Le développement agricole durable n'est pas possible sans gestion durable des ressources en eau. Les techniques nucléaires et isotopiques sont utilisées pour évaluer avec précision le volume, l'emplacement et le taux de réalimentation des ressources en eau ainsi que pour détecter la pollution des eaux souterraines, qui sont des informations essentielles pour l'élaboration de stratégies de gestion des ressources en eau à long terme. La préservation de l'environnement est favorisée par l'utilisation de la science et des applications nucléaires pour la détection et la prévision du devenir des polluants radioactifs en zones océaniques et côtières, les effets de ces polluants sur les organismes marins, et l'évaluation des principaux processus de chaleur et de cycle du carbone en milieu marin et des impacts du changement climatique. L'utilisation des technologies des rayonnements dans le traitement des

effluents industriels, des eaux usées et des boues aide à préserver les ressources en eau et à améliorer les conditions des sols, ce qui contribue à assurer un environnement durable. Plusieurs de ces technologies nucléaires sont étudiées plus en détail dans le présent rapport.

19. L'augmentation constante de la population entraîne un accroissement constant des besoins en alimentation suffisante ; à son tour, le volume de gaz à effet de serre (GES) produits augmente tout au long de la chaîne de production alimentaire, en particulier en rapport avec l'élevage. Les technologies nucléaires innovantes et les technologies connexes ont un rôle unique à jouer dans la nutrition, la santé, la reproduction et la sélection animales et contribuent ainsi à une sécurité alimentaire durable tout en atténuant les effets du changement climatique par la réduction des émissions de GES.

20. Plusieurs techniques nucléaires sont utilisées pour étudier l'assimilation et l'utilisation de protéines microbiennes et pour mettre au point de meilleures cultures fourragères en vue d'améliorer les indices de consommation et l'utilisation d'énergie. Elles permettent ainsi, lorsqu'elles sont associées à un ensemble de bonnes pratiques comme l'amélioration de la gestion des pâturages, de réduire les GES. La productivité animale est accrue grâce à l'utilisation de progestérone marquée à l'iode 125 en radioimmunos dosage (RIA) afin d'identifier les femelles gestantes dans les troupeaux laitiers, ce qui peut ensuite servir à réduire la proportion d'animaux non producteurs dans le cadre de la reproduction animale. Les techniques nucléaires contribuent en outre à la caractérisation des génomes du bétail, qui facilite l'identification des gènes favorables, tels que ceux qui permettent de résister aux maladies ou de prospérer dans des conditions climatiques ou nutritionnelles difficiles.

21. Le Programme d'action en faveur de la cancérothérapie (PACT), qui est un programme phare de l'Agence, a été rattaché au Département de la coopération technique (CT) à compter de 2014 et élevé au rang de Division. Cette nouvelle initiative a pour objectif de renforcer encore l'efficacité et l'efficacité de l'exécution du programme. Le PACT se concentrera sur : la mobilisation de ressources et la collecte de fonds pour des activités ayant trait à la lutte contre le cancer ; le développement de nouveaux produits et services dans ce domaine et l'amélioration de ceux qui existent pour répondre aux besoins des États Membres (comme les missions d'examen impACT, la VUCCnet et les sites modèles de démonstration du PACT) ; et nouera des liens avec des partenaires, ou les renforcera, en mettant l'accent sur le caractère complémentaire des mandats respectifs, en particulier avec l'Organisation mondiale de la Santé (OMS).

22. L'imagerie par rayons X est un des outils les plus puissants dans la pratique médicale, avec un large éventail d'applications diagnostiques, comme la détection et la stadification des cancers. En outre, plusieurs modalités d'imagerie sont utilisées pour élaborer des plans de traitement en radiothérapie, et les techniques nucléaires sont appliquées pour améliorer la prise en charge du cancer dans le monde. En radiologie médicale, la demande en imagerie numérique prend de plus en plus le pas sur l'imagerie classique (sur film). Malgré les avantages considérables de l'imagerie numérique, tels qu'une meilleure fiabilité et une facilité d'emploi, des difficultés existent pour permettre cette transition, comme les coûts d'investissement élevés, y compris pour le développement du capital humain. Le défi général pour les pays en développement est de trouver une méthodologie adaptée à leurs besoins et à leur situation pour passer efficacement de la méthode classique – traitement et stockage de films – à l'acquisition et à l'affichage numériques.

23. L'utilisation de la technologie d'imagerie numérique en association avec la téléradiologie permet de dresser un diagnostic quelle que soit la distance entre l'endroit où l'image est obtenue et celui où se trouve le praticien. Par conséquent, la téléradiologie est une méthode efficace pour remédier au problème de la répartition géographique inégale et des pénuries locales de spécialistes de l'imagerie. Le rôle accru de la technologie pourrait aider à atténuer les pénuries de personnel, même s'il faudra des réseaux de communication plus solides et de nouvelles fonctions dans le domaine de l'appui technique en matière d'infrastructure.

24. L'urbanisation et l'industrialisation continues des sociétés à travers le monde contribuent à la contamination des ressources d'eau douce et à la production de boues d'épuration municipales. Le traitement des effluents industriels et des eaux usées et des boues à l'aide des technologies nucléaires, comme les accélérateurs de faisceaux d'électrons, peut contribuer à préserver les ressources en eau et à protéger la vie animale et la santé publique ainsi qu'à produire des biosolides fertilisants pour améliorer les conditions des sols. L'efficacité de ces techniques a été démontrée avec succès dans le traitement des eaux usées contenant des colorants textiles industriels et l'aseptisation des boues d'épuration pour produire des biosolides de grande qualité en vue d'applications agricoles. Avec l'aggravation des pénuries d'eau, le recyclage de l'eau suscite un intérêt croissant à travers le monde. Les technologies des rayonnements, associées aux procédures de traitement traditionnelles, sont actuellement testées pour la production d'eau de grande qualité en vue d'une réutilisation indirecte sous forme d'eau potable et devraient devenir prochainement les technologies de traitement prédominantes.

25. Les écosystèmes marins constituent une source vitale d'aliments et de revenus pour une grande partie de la population mondiale. Dans certaines régions, ces écosystèmes sont menacés périodiquement par la prolifération d'algues toxiques. Le changement climatique, associé à la croissance de l'activité économique, devrait conduire à une augmentation de la fréquence de ces événements. Les phycotoxines entraînent par exemple, dans l'industrie des crustacés, d'énormes pertes économiques dues aux fermetures d'installations de mariculture imposées quand les concentrations de toxines des crustacés dépassent les niveaux réglementaires. La fréquence des poussées d'algues toxiques augmente également dans les environnements d'eau douce, constituant ainsi une menace pour les espèces et animaux dulçaquicoles ainsi que pour les êtres humains. Les techniques nucléaires telles que le dosage récepteur-ligand sont des outils éprouvés permettant de contrôler efficacement les phycotoxines dans les produits de la mer et l'environnement ainsi que d'étudier l'impact du changement climatique sur les proliférations d'algues toxiques et l'écosystème marin dans son ensemble. Le dosage récepteur-ligand a un avantage considérable sur les méthodes plus traditionnelles, car il est très ciblé et très sensible, donnant ainsi aux responsables de la réglementation et aux producteurs une alerte précoce et précise contre la toxicité des algues nuisibles.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire pour 2014

Rapport principal

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

1. Au 31 décembre 2013, il y avait 434 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité totale de 371,7 GWe² (voir tableau A-1). Cela représente une légère diminution (d'environ 1,6 GWe) de la capacité totale par rapport à 2012. Il y a eu quatre nouveaux raccordements au réseau en 2013 : Hongyanhe 1 et 2 (1 000 MWe) et Yangjiang-1 (1 000 MWe) en Chine, et Kudankulam-1 (917 MWe) en Inde.

2. En ce qui concerne les réacteurs commerciaux en service, environ 81 % d'entre eux sont des réacteurs modérés et refroidis par eau ordinaire, 11 % des réacteurs modérés et refroidis par eau lourde, 4 % des réacteurs refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite, et 3 % des réacteurs refroidis par gaz (Fig. A-1). Deux réacteurs sont des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide.

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

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2013)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2013		Expérience d'exploitation totale en 2013	
	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches	Total MWe	TW h	Nbre de tranches	Total MWe	Nbre de tranches
AFRIQUE DU SUD	2	1 860			13,6	5,7	58	3
ALLEMAGNE	9	12 068			92,1	15,4	799	1
ARGENTINE	2	935	1	692	5,7	4,4	70	7
ARMÉNIE	1	375			2,2	29,2	39	8
BÉLARUS			1	1 109				
BELGIQUE	7	5 927			40,6	52,1	261	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 245	13,8	2,8	45	3
BULGARIE	2	1 906			13,3	30,7	155	3
CANADA	19	13 500			94,3	16	655	7
CHINE	20	15 977	29	28 774	104,8	2,1	160	0
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	23	20 721	5	6 370	132,5	27,6	427	1
ÉMIRATS ARABES UNIS			2	2 690				
ESPAGNE	7	7 121			54,3	19,7	301	1
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	100	99 081	4	5 633	790,2	19,4	3912	4
FÉDÉRATION DE RUSSIE	33	23 643	10	8 382	161,7	17,5	1124	2
FINLANDE	4	2 752	1	1 600	22,7	33,3	139	4
FRANCE	58	63 130	1	1 630	405,9	73,3	1932	3
HONGRIE	4	1 889			14,5	50,7	114	2
INDE	21	5 308	6	3 907	30	3,5	397	6
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'	1	915			3,9	1,5	2	4
JAPON	48	42 388	2	1 325	13,9	1,7	1646	4
MEXIQUE	2	1 330			11,4	4,6	43	11
PAKISTAN	3	690	2	630	4,4	4,4	58	8
PAYS-BAS	1	482			2,7	2,8	69	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 884			29	35,9	134	10
ROUMANIE	2	1 300			10,7	19,8	23	11
ROYAUME-UNI	16	9 243			64,1	18,3	1527	7
SLOVAQUIE	4	1 815	2	880	14,6	51,7	148	7
SLOVÉNIE	1	688			5	33,6	32	3
SUÈDE	10	9 474			63,7	42,7	412	6
SUISSE	5	3 308			25	36,4	194	11
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	78,2	43,6	428	6
Total ^{b,c}	434	371 733	72	69 367	2 358,9		15 660	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 (5 032 MWe) et 2 en construction (2 600 MWe) ;

39,8 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 19,1 % 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) (194 ans et un mois).

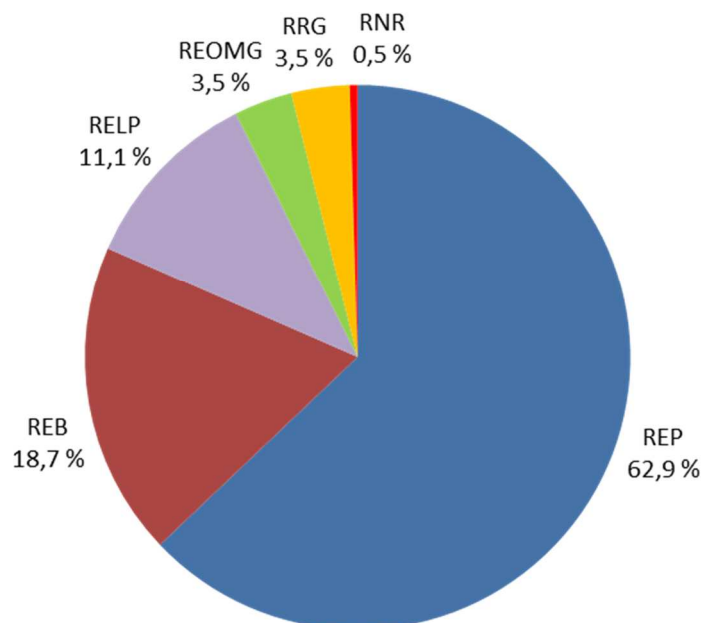


Fig. A-1. Répartition actuelle des types de réacteurs. (REB : réacteur à eau bouillante ; RNR : réacteur à neutrons rapides ; RRG : réacteur refroidi par gaz ; REOMG : réacteur à eau ordinaire modéré au graphite ; RELP : réacteur à eau lourde sous pression ; REP : réacteur à eau sous pression).

3. Alors que le nombre de mises en chantier de nouveaux réacteurs a chuté de 16 en 2010 à quatre en 2011, il y a eu sept mises en chantier en 2012 et 10 en 2013 (Fig. A-2), ce qui indique une tendance à la hausse depuis l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daichii. Les mises en chantier sont Summer 2 et 3 et Vogtle 3 et 4 aux États Unis d'Amérique, Tianwan-4 et Yangjiang-5 et 6 en Chine, Shin-Hanul-2 (nouveau nom de Shin-Ulchin-2) en République de Corée, Barakah-2 aux Émirats arabes unis et Belarusian-1 au Bélarus. Après les Émirats arabes unis, où la première centrale nucléaire a été mise en chantier en 2012, le Bélarus est le deuxième « nouveau venu » en trois décennies à lancer la construction d'une première centrale.

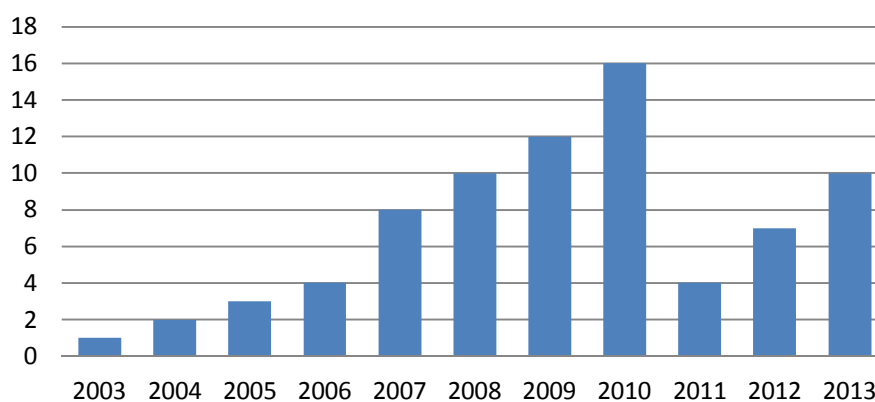


Fig. A-2. Tendence des mises en chantier de réacteurs de puissance.

4. En 2013, six réacteurs ont été officiellement déclarés comme étant définitivement mis à l'arrêt : Crystal River-3, Kewaunee, et San Onofre 2 et 3, aux États Unis d'Amérique, et Fukushima Daichi 5

et 6, au Japon. Cela représente trois réacteurs de plus qu'en 2012, mais beaucoup moins que les 13 mises à l'arrêt de 2011. De plus, un réacteur situé en Espagne, à Santa Maria de Garona, a été déclaré comme étant en arrêt de longue durée.

5. Au 31 décembre 2013, 72 réacteurs étaient en construction, soit le nombre le plus élevé depuis 1989. Comme les années précédentes, l'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie (voir la Fig. A-3), en Chine en particulier. Quarante-huit de ces 72 réacteurs en construction se trouvaient en Asie, tout comme 42 des 52 derniers nouveaux réacteurs à avoir été couplés au réseau depuis 2000.

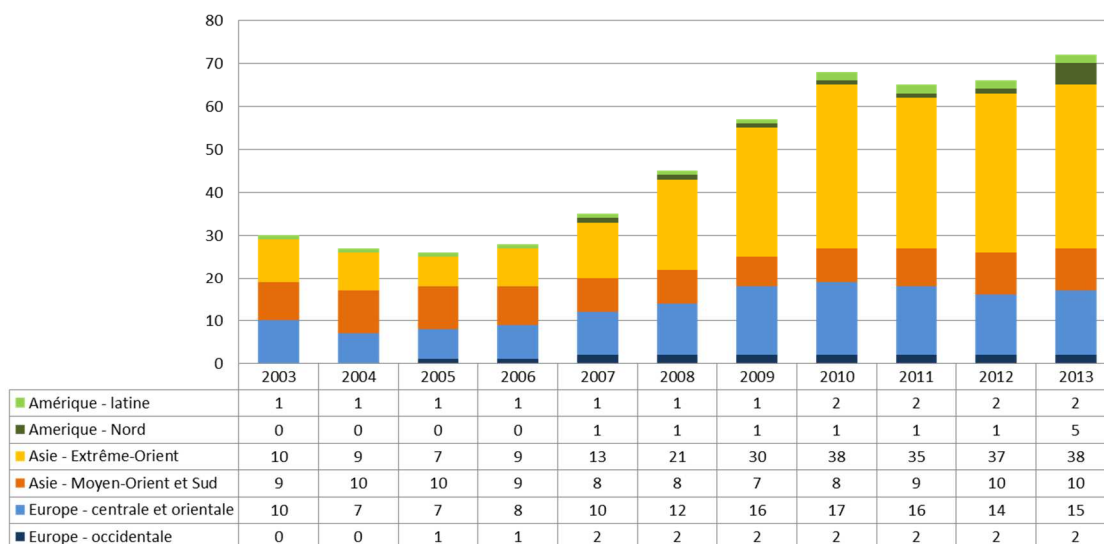


Fig A-3. Nombre de réacteurs en construction par région.

6. La tendance caractérisée par l'augmentation de la puissance et le renouvellement ou la prorogation des licences des réacteurs en service s'est poursuivie en 2013. La Commission canadienne de sûreté nucléaire a renouvelé pour cinq ans la licence d'exploitation des six réacteurs à eau sous pression de Pickering. La Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) a approuvé des augmentations de puissance pour les trois tranches McGuire 1 et 2, et Monticello. Le Service national d'inspection de la réglementation nucléaire de l'Ukraine a prorogé de 10 ans la licence d'exploitation de la tranche 1 de la centrale nucléaire du sud du pays.

7. En 2013, plusieurs pays ont accompli des progrès notables vers la mise en place de leur première centrale nucléaire. La Société de l'énergie nucléaire des Émirats arabes unis a coulé les premiers bétons de sa deuxième tranche au site de Barakah en mai 2013. L'examen de la demande d'autorisation de construction de deux tranches supplémentaires se poursuit. Il est prévu que la première de quatre tranches soit opérationnelle d'ici 2017, et les autres d'ici 2020.

8. Le Bélarus a coulé les premiers bétons de sa première tranche, Bélarussien-1, en novembre 2013 (Fig. A-4). C'est la première de deux tranches VVER-1200 à construire dans le cadre du contrat signé en juillet 2012 avec la société Atomstroyexport de la Fédération de Russie.



Fig. A-4 La construction de la première centrale nucléaire du Bélarus a commencé sur le site d'Ostrovets le 6 novembre 2013. (Photo : Direction pour la construction de centrales nucléaires, Bélarus)

9. La Turquie continue à développer l'infrastructure de son programme électronucléaire et se prépare pour la construction de quatre tranches VVER-1200 à Akkuyu. En 2013, la société du projet de centrale nucléaire d'Akkuyu a déposé un rapport d'évaluation de l'impact environnemental pour ledit projet. La Turquie a signé un accord de coopération avec le Japon pour une deuxième centrale nucléaire à Sinop. La mission d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) de l'Agence de novembre 2013 (Fig. A-5) a conclu que la Turquie avait fait des progrès dans le développement de son infrastructure nucléaire et recommandé des mesures supplémentaires.

10. Plusieurs pays qui ont décidé d'introduire l'électronucléaire sont à des stades avancés de préparation de l'infrastructure. À la suite d'un accord intergouvernemental conclu en 2011 avec la Fédération de Russie sur la coopération en vue de la construction de la centrale nucléaire de deux tranches de Rooppur, le Bangladesh a entamé les travaux de préparation du site en 2013. En octobre 2013, la Jordanie a choisi la société Atomstroyexport de la Fédération de Russie comme vendeur préféré et travaille actuellement sur la caractérisation du site d'Amra. La Pologne envisage de construire jusqu'à deux centrales nucléaires. Une mission INIR organisée en mars 2013 a conclu qu'elle avait fait des progrès et recommandé des mesures supplémentaires. En 2013, le Viet Nam a achevé les études de faisabilité pour deux sites de centrales nucléaires d'une capacité totale de 4 000 MWe à Ninh Thuan. Le Nigeria et l'Égypte continuent de développer leur infrastructure en vue de l'introduction de l'électronucléaire. La Jordanie, le Nigeria et le Maroc ont officiellement demandé des missions INIR pour 2014. En janvier 2013, l'Afrique du Sud est devenue le premier pays exploitant à accueillir une telle mission pour examiner son infrastructure nucléaire en préparation pour une nouvelle construction prévue.

11. Plusieurs pays continuent d'envisager l'introduction de l'électronucléaire. Certains se préparent activement à prendre des décisions en connaissance de cause sur la mise en œuvre potentielle d'un programme électronucléaire et plusieurs pays élaborent leurs stratégies énergétiques pour y inclure une option électronucléaire. À ce stade, l'accent est mis sur l'élaboration de l'infrastructure juridique et réglementaire étendue nécessaire pour appuyer un programme électronucléaire en sus de la mise en valeur des ressources humaines nécessaires.



Fig. A-5. Experts de l'Agence et leurs homologues internationaux et turcs au cours de la mission INIR organisée en Turquie du 4 au 14 novembre 2013. (Photo : Ministère de l'énergie et des ressources hydrauliques de la Turquie)

12. Treize des 30 pays qui exploitent déjà des centrales nucléaires sont soit en train d'en construire de nouvelles, y compris la Chine, la République de Corée, la Fédération de Russie et les États Unis d'Amérique, soit en train de s'activer pour achever des constructions précédemment suspendues, notamment l'Argentine, le Brésil et la Slovaquie. En outre, 12 autres pays exploitants planifient activement la construction de nouvelles centrales, y compris la République tchèque, la Hongrie, l'Afrique du Sud et le Royaume-Uni, ou l'achèvement de constructions suspendues, comme la Roumanie et les États-Unis d'Amérique.

13. Bien que l'industrie nucléaire ait toujours par le passé recherché les économies d'échelle, les réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP) suscitent un intérêt croissant, en partie parce qu'ils nécessitent moins d'investissements et réduisent les risques financiers. À l'heure actuelle, 130 RFMP d'une capacité totale de 58,2 GWe sont en service dans 26 pays et 14 des 72 réacteurs en construction sont de ce type. Quelque 45 concepts de RFMP innovants se trouvent au stade de recherche-développement, et sont examinés en détail à la section B.1.4.

14. La production d'électricité est la principale fonction des réacteurs actuellement en service ; certains d'entre eux sont aussi utilisés pour le dessalement, la chaleur industrielle et le chauffage urbain (Fig. A-6). Les autres utilisations non électriques futures possibles comprennent la production d'hydrogène, premièrement pour revaloriser les ressources pétrolières de faible qualité comme les sables bitumineux tout en compensant les émissions de carbone associées au reformage du méthane à la vapeur, deuxièmement pour appuyer la production à grande échelle de combustibles liquides synthétiques à partir de la biomasse, du charbon ou d'autres sources de carbone, et troisièmement, pour servir directement de combustible pour des véhicules, plus probablement des véhicules utilitaires légers hybrides à piles à hydrogène rechargeables. L'utilisation des centrales nucléaires pour la production d'électricité et les applications non électriques, c'est-à-dire la cogénération nucléaire, peut offrir divers avantages économiques pour de grands utilisateurs d'énergie dans la mesure où une efficacité accrue des centrales nucléaires se traduit par une meilleure performance économique, la réduction des émissions de tous les polluants, une plus grande fiabilité, une puissance de meilleure qualité, une utilisation améliorée du combustible nucléaire, et la flexibilité pour le réseau électrique. La section B.1.6. est consacrée à la cogénération nucléaire.

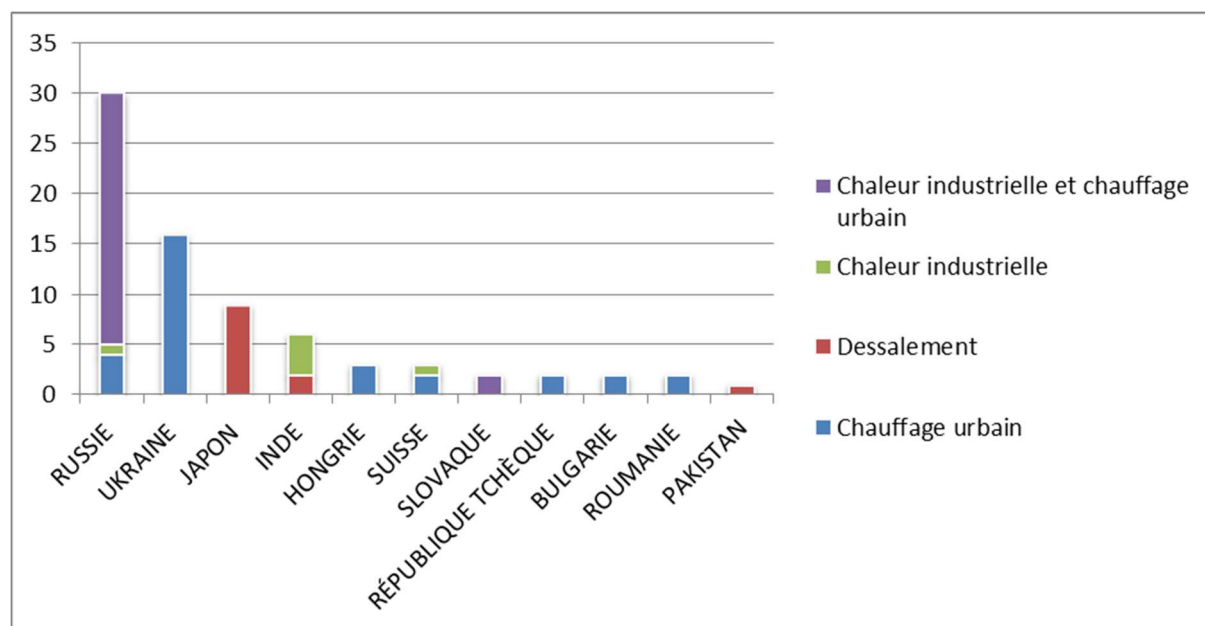


Fig. A-6. Nombre de réacteurs utilisés à la fois à des fins non électriques et pour la production d'électricité.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

15. Trente pays ont choisi l'électronucléaire et à peu près autant envisagent encore de l'inclure dans leur bouquet énergétique, car ils jugent ses avantages à long terme attractifs. L'un des messages clés qui ont émergé de la Conférence ministérielle de l'AIEA sur l'électronucléaire au XXI^e siècle, qui a eu lieu à Saint-Petersbourg en juin 2013, est que l'électronucléaire jouera un rôle important pour la réalisation des objectifs de sécurité énergétique et de développement énergétique durable dans de nombreux pays. L'électronucléaire, en tant que source d'énergie propre à faible émission de carbone, peut aider les pays à répondre aux besoins croissants d'électricité, limiter les émissions de carbone compte tenu des problèmes liés au changement climatique, réduire les préoccupations concernant la sécurité de l'approvisionnement en énergie, et limiter la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles dont les prix sont caractérisés par des disparités régionales et sont volatiles.

16. Les projections 2013 de l'Agence indiquent que l'électronucléaire devrait, d'ici à 2030, augmenter de 17 % selon la projection basse et de 94 % selon la projection haute. Ces chiffres sont légèrement inférieurs aux projections de 2012, ce qui est considéré comme une conséquence de l'impact que continuent d'avoir l'accident de Fukushima Daiichi, les bas prix du gaz naturel et les capacités accrues d'énergie renouvelable subventionnée.

17. Dans la projection haute, la capacité mondiale totale atteindrait 722 GWe d'ici à 2030, soit presque le double de la capacité des niveaux de 2012. Cette estimation est basée sur des hypothèses optimistes mais plausibles concernant les taux de croissance économique et d'augmentation de la demande d'électricité, en particulier en Extrême-Orient. La projection haute table sur des modifications des politiques nationales ayant trait au changement climatique et le renforcement de l'économie mondiale, ce qui entraînera l'augmentation du nombre de pays qui introduisent l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique ou développent leurs capacités existantes.

18. Dans la projection basse, la capacité mondiale totale augmente pour atteindre 435 GWe en 2030, soit un accroissement de seulement 62 GWe par rapport aux niveaux de 2012. Cette estimation suppose que les tendances actuelles du marché, de la technologie et des ressources se poursuivent, avec peu de changement des lois, politiques et règlements actuels appuyant l'adoption de

l'électronucléaire. La projection basse reflète une pause prolongée ou la décision de ne pas développer le nucléaire dans certains pays en raison de l'accident de Fukushima Daiichi.

19. La croissance projetée la plus forte se rapporte aux régions qui ont déjà des centrales nucléaires en service, avec en tête la région Asie, y compris la Chine et la République de Corée. Les possibilités de croissance sont aussi fortes pour l'Europe orientale, notamment la Russie, et la région Moyen-Orient et Asie du Sud, qui comprend l'Inde et le Pakistan.

20. D'autres évaluations prévoient aussi une croissance du nucléaire comparable aux projections de l'Agence. D'après les *Perspectives énergétiques mondiales 2013* publiées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), l'électronucléaire devrait croître pour atteindre 513 GWe d'ici 2030 dans le cadre du scénario « politiques actuelles », 545 GWe dans le cadre du scénario « politiques nouvelles », et 692 GWe dans le cadre du scénario de la projection la plus haute qui limite l'augmentation de la température de la planète à 2° C. Cela suggère que la projection basse de l'AIEA est modérément prudente, étant donné que l'estimation pour 2030 est inférieure de 78 GWe à la projection la plus basse de l'AIE.

21. La figure A-7 compare les projections 2013 de l'AIEA, les scénarios 2013 de l'AIE et les projections 2013 de l'Association nucléaire mondiale (WNA) figurant dans le document *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2013–2030*. Les scénarios de projection haute des trois organismes donnent des résultats similaires.

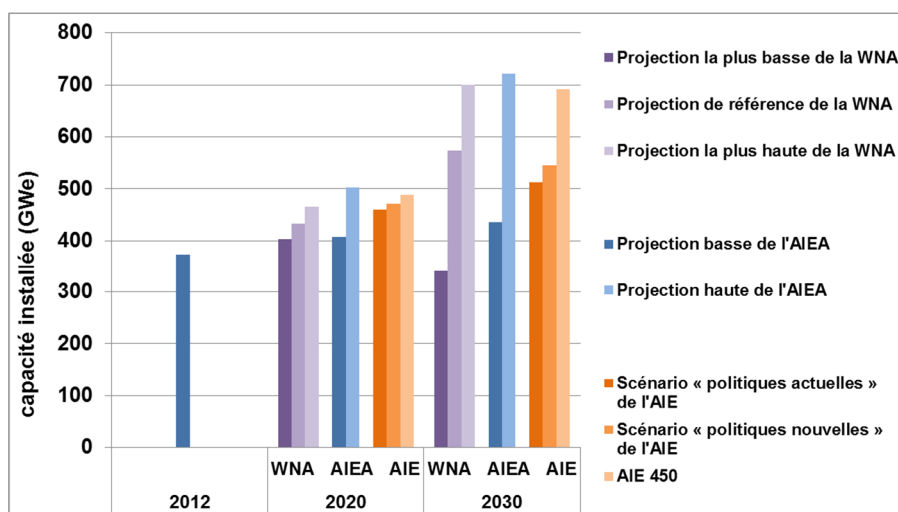


Fig. A-7. Comparaison des projections de l'AIEA, de la WNA et de l'AIE concernant l'électronucléaire.

L'électronucléaire, une technologie à faibles émissions de carbone³

L'électronucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie éolienne ont les émissions de gaz à effet de serre pour un cycle de vie les plus faibles de toutes les sources de production d'énergie. Ces technologies deviendront même plus importantes lorsque de nouvelles contraintes d'émission de carbone seront imposées dans le cadre du prochain accord sur le changement climatique qui devrait être signé en 2015. Sur la base principalement de la base de données ecoinvent et des constatations du Laboratoire national de recherche sur les énergies renouvelables des États-Unis, la valeur médiane des émissions de GES d'un réacteur à eau ordinaire est estimée à 14,9 g d'équivalent CO₂ par kWh, y

³ Des informations complémentaires sur l'électronucléaire et le changement climatique sont disponibles à l'adresse : <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC58/Documents/>.

compris les émissions de gaz à effet de serre pour un cycle de vie de l'extraction de l'uranium au stockage définitif des déchets.

L'énergie hydroélectrique des réservoirs alpins et non alpins, et les systèmes au fil de l'eau ont des émissions de GES du cycle de vie comparables à celle de l'électronucléaire. Les émissions des systèmes éoliens dépendent de la taille (classe) des turbines éoliennes, les émissions des tranches plus petites (1-3MW) étant de fait plus faibles par capacité que celle des tranches plus grandes (>3MW) dont la construction nécessite plus d'énergie et de matériaux. Les petites tranches à terre et en mer ont des émissions comparables à celles de l'électronucléaire, alors que les grandes tranches peuvent avoir des valeurs dix fois plus élevées.

Pour mettre ces chiffres en perspective, les émissions des énergies fossiles sont environ dix fois plus élevées que celles de l'électronucléaire. Par exemple, on estime que le charbon dur émet quelque 1200 g d'équivalent CO₂ par kWh et le gaz naturel classique grosso modo moitié moins, avec environ 650 g d'équivalent CO₂ par kWh. Les émissions de GES des combustibles fossiles peuvent être réduites par la capture et le stockage du carbone, qui permettent des émissions d'environ 200 g d'équivalent CO₂ par kWh pour le charbon et de 150 g d'équivalent CO₂ par kWh pour le gaz naturel.

Bien que les émissions de GES de l'électronucléaire soient déjà intrinsèquement faibles, elles baisseront encore à l'avenir grâce à l'accroissement de l'efficacité énergétique de la production de l'uranium enrichi, l'amélioration des combustibles et des réacteurs nucléaires qui permettra une utilisation accrue, et l'augmentation des durées de vie des centrales nucléaires qui réduira la nécessité de construire de nouvelles installations.

A.3. Cycle du combustible

A.3.1. Ressources et production d'uranium

22. Les prix au comptant de l'uranium sont restés bas en 2013, au faible niveau observé depuis sept ans, diminuant d'environ 115 \$/kg d'U au début de l'année à quelque 90 \$/kg à la fin de l'année. L'impact est aussi visible dans le prix à long terme déclaré, qui était d'environ 150 \$/kg d'U au début de l'année et a chuté à approximativement 130 \$/kg à la fin de l'année. La diminution des prix a considérablement limité la capacité des entreprises de mobiliser des fonds pour la prospection et les études de faisabilité, ce qui aura un impact sur la production future. De nombreux projets précédemment annoncés seront probablement retardés. *D'après Uranium 2011 : Ressources, production et demande*, une publication conjointe de l'AIEA et de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE de 2012 connue sous le nom de « Livre rouge », le volume total estimé des ressources classiques d'uranium récupérables à un coût inférieur à 260 \$/kg d'U est de 7,1 millions de tonnes d'U.

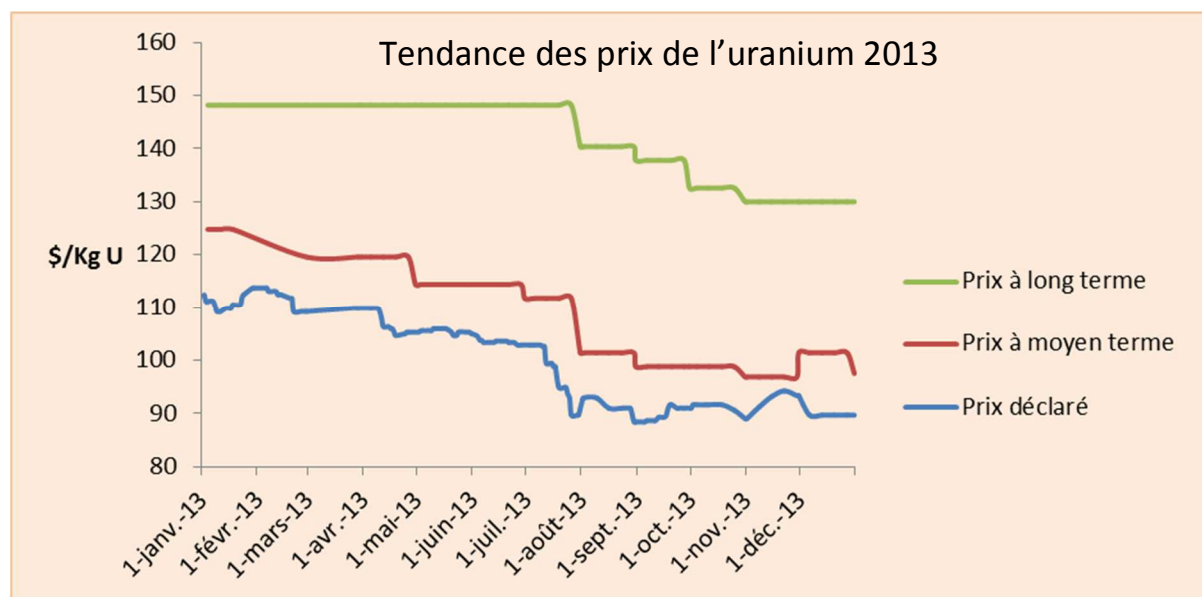


Fig. A-8 Tendances des prix de l'uranium d'après les indicateurs du marché de l'uranium de Trade Tech.

23. En 2013, des ressources additionnelles ont été signalées dans de nombreux pays, y compris l'Afrique du Sud, l'Australie, le Botswana, le Canada, la Chine, la Fédération de Russie, l'Inde, la Jordanie, la Mongolie, la Namibie, la République centrafricaine, la République tchèque, le royaume du Danemark (Groenland) et la Slovaquie.

24. Les préparatifs se poursuivent pour la production de l'uranium en tant que sous-produit à la mine de nickel de Talvivaara dans l'est de la Finlande. Les ressources d'uranium de cette mine sont de 22 000 t d'U avec une production attendue de 350 t d'U/an. L'extraction d'uranium devrait démarrer en 2014.

25. L'eau de mer a fait l'objet d'études comme source d'uranium non classique. Quelque 4,5 milliards de tonnes d'uranium représentant d'énormes ressources énergétiques sont dissoutes dans les océans à travers le monde à des concentrations très faibles (environ 3,3 parties par milliard). À titre de comparaison, les concentrations dans les rochers terrestres varient entre 1 000 et 5 000 parties par milliard. Des recherches se poursuivent sur cette ressource potentielle.

26. La WNA estime que la production était de 53 493 t d'U en 2011, 58 394 t d'U en 2012 et 54 039 t d'U en 2013.

27. La lixiviation in situ (LIS) a dépassé l'extraction souterraine comme principale méthode de production en 2009 et sa part dans la production devrait continuer d'augmenter à moyen terme. En 2012, il y a eu plusieurs agrandissements de mines LIS au Kazakhstan, qui ont porté sa production annuelle à quelque 2 250 t d'U. La WNA indique qu'environ 45 % de la production mondiale provenaient de l'extraction par LIS en 2012.

28. En Namibie, la troisième phase d'agrandissement de la mine de Langer Heinrich de la société Paladin a été achevée en 2012, et a porté sa production annuelle à 2 000 t d'U. La quatrième phase qui permettra de porter cette production à 3 900 t d'U est actuellement à l'étude. En raison de la situation actuelle du marché, AREVA a continué de différer la mise en valeur de la mine de Trekkopje en Namibie. La construction a commencé à la mine d'Husab dans ce pays (Fig. A-9), et cette mine devrait entrer en service d'ici 2015 et atteindre la pleine capacité de 5 770 t d'U d'ici 2017. Une nouvelle mine, Imouraren (Niger), d'une capacité de 5 000 t d'U, devrait entrer en service d'ici 2015.



Fig. A-9 Site de la mine d'Husab (Namibie). (Photo: China General Nuclear Power Group)

29. Les études de faisabilité sont en cours pour le projet de Lethakane (Botswana). La première licence d'une mine d'uranium en République-Unie de Tanzanie a été annoncée en avril 2013, mais le projet devrait être retardé en raison de la crise des marchés.

30. En Australie méridionale, la société Quasar Resources a annoncé qu'elle commencera les opérations d'extraction par LIS dans les gisements de Four Mile East et de Four Mile West en 2014. En Australie occidentale, la mine d'uranium de Wiluna de la société Toro Energy a reçu l'approbation environnementale finale du gouvernement fédéral pour ses gisements initiaux et a acheté le projet Lake Maitland Uranium auprès de la société Mega Uranium.

31. Aux États-Unis d'Amérique, les projets d'extraction par LIS North Butte et Lost Creek du Wyoming ont commencé la production en mai et août 2013 respectivement.

32. En Turquie, les études de pré-faisabilité ont été achevées pour le projet d'extraction par LIS de Temrezli et les autorisations nécessaires ont été accordées pour l'exploitation. La production est à présent prévue pour 2016, avec un volume annuel de 350 t d'U.

33. En 2013, le parlement du Groenland (Royaume du Danemark) a voté en faveur de la levée de l'interdiction, de longue date, de l'extraction de matières radioactives, y compris de l'uranium. Cette décision pourrait permettre au projet de Kvanefjeld, qui fait actuellement l'objet d'une étude de faisabilité destinée à évaluer une opération d'extraction pour la production d'uranium, d'éléments de terres rares et de zinc, d'aller de l'avant.

34. Un programme d'essais métallurgiques préliminaires est actuellement prévu pour le projet de Närke, dans le centre de la Suède, où des argiles alunifères pourraient contenir plus de 257 000t d'U. En Espagne, une approbation environnementale a été accordée pour le gisement de Retortillo dans le cadre du projet d'uranium Salamanca-1 et un processus officiel a été lancé pour la délivrance d'une licence et d'un permis d'exploitation. La Roumanie a annoncé des plans d'ouverture d'une nouvelle mine d'uranium à Neamt pour contrebalancer la diminution des ressources de la mine actuelle de Suceava.

35. L'Ouzbékistan a achevé la construction de trois champs miniers de récupération in situ dans le Kyzylkoum central en 2013. En Chine, le ministère chargé des terres et des ressources a choisi six mines d'uranium comme « mines nationales vertes ». Les mines vertes sont des entreprises minières respectueuses de l'environnement qui se préoccupent des économies d'énergie, de la réduction des émissions et de la remise en état des terres dans leurs opérations quotidiennes. La République islamique d'Iran a annoncé le démarrage des opérations à la mine d'uranium de Saghand et dans l'usine associée près d'Ardakan.

36. La WNA estime que la production d'uranium n'a permis de couvrir en 2013 qu'environ 83 % de la consommation estimée des réacteurs, qui était de 64 978 t d'U. Le reste a été couvert grâce à cinq sources secondaires : les stocks militaires d'uranium naturel, les stocks d'uranium enrichi, l'uranium retraité provenant de combustible usé, le combustible à mélange d'oxydes (MOX) dans lequel l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium provenant de combustible usé retraité, et le réenrichissement de résidus d'uranium appauvri. Au rythme de consommation estimée de 2012, la durée de vie de 5,3 millions de t d'U, qui représentent les ressources totales économiquement viables aux prix actuels du marché, serait de 78 ans.

37. Les ressources non classiques d'uranium et le thorium augmentent encore cette base de ressources. Les estimations actuelles d'uranium potentiellement récupérable sous forme de sous-produits mineurs sont d'environ huit millions de t d'U. En mars 2013, la société Uranium Equities, qui exploite une usine de démonstration en Floride (États-Unis d'Amérique), a annoncé qu'une étude avait conclu que sa méthode PhosEnergy Process d'extraction de l'uranium à partir de phosphates était viable et rentable. Un rapport d'évaluation de l'impact environnemental a été déposé sur la mine d'Itataia à Santa Quitéria (Brésil) pour deux usines destinées à produire des phosphates et du concentré d'uranium.

38. Les ressources mondiales de thorium sont estimées à environ six à sept millions de tonnes. Bien que le thorium ait été utilisé comme combustible dans le cadre de démonstrations, il reste encore beaucoup à faire avant de pouvoir le considérer comme tel. La production devrait démarrer à court terme dans quelques projets relatifs à des éléments de terres rares qui pourraient produire du thorium comme sous-produit et des résidus en contenant en Afrique du Sud (Steenkampskraal), en Australie (Nolans Bore) et au Royaume du Danemark (Kvanefjeld au Groenland). En avril 2013, la société Thor Energy a lancé un programme d'essais d'un combustible thorium-mélange d'oxydes (MOX) à Halden (Norvège).

A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible

39. Six pays (Canada, Chine, États-Unis, Fédération de Russie, France et Royaume-Uni) exploitent à l'échelle commerciale des usines de conversion d'octoxyde de triuranium (U_3O_8) en hexafluorure d'uranium (UF_6) et de petites installations de conversion sont en service en Argentine, au Brésil, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran. Un procédé de volatilisation des fluorures par voie sèche est utilisé aux États-Unis, mais toutes les autres installations de conversion utilisent un procédé par voie humide. La capacité annuelle mondiale de conversion est restée aux alentours de 76 000 t d'U sous forme d' UF_6 . On s'attend cependant à de grands changements avec une nouvelle usine en construction en France (Comurhex II d'AREVA) et une autre en cours de rénovation aux États-Unis (installation Metropolis de Honeywell).

40. Avec une capacité de 15 000 t d'U qui pourrait être étendue à 21 000 t d'U, Comurhex II remplacera les usines actuelles des sites de Malvési et de Tricastin. Elle commencera à produire de manière progressive après la fin de la production de Comurhex I.

41. L'installation Metropolis de Honeywell (Fig. A-10) a repris la production en juin 2013 après la modernisation des équipements et des processus pour améliorer son efficacité et réduire sa durée d'immobilisation.



Fig. A-10 Nouveau vaporisateur de fluorure d'hydrogène à l'installation Metropolis de Honeywell, Illinois (États-Unis d'Amérique). (Photo : Coverdyn)

42. En 2011, la Société nationale d'énergie atomique ROSATOM a décidé de lancer un projet pour rassembler toutes les installations de conversion sur un site, le Complexe chimique de Sibérie à Seversk. Il est prévu de fermer le site d'Angarsk en avril 2014.

43. La demande totale de services de conversion (en supposant une teneur de rejet⁴ de 0,25 % d'uranium 235) est actuellement de l'ordre de 60 000 à 64 000 tonnes par an.

44. La construction d'une nouvelle raffinerie de trioxyde d'uranium (UO₃) au Kazakhstan dans le cadre d'une entreprise commune entre Kazatomprom et la société canadienne Cameco devrait débuter d'ici 2018. Cette raffinerie, qui est installée dans l'usine métallurgique d'Ulba à Ust-Kamenogorsk, devrait avoir une capacité de production de 6 000 t d'UO₃ par an.

45. La capacité mondiale totale d'enrichissement est actuellement d'environ 65 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande totale d'environ 49 millions d'UTS par an. Des services d'enrichissement commercial sont fournis par cinq sociétés : Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC), AREVA (France), ROSATOM (Fédération de Russie), USEC et URENCO (toutes deux aux États-Unis).

46. URENCO exploite des usines de centrifugation en Allemagne, aux États-Unis, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. Sa capacité totale de production en Europe était de 14,7 millions d'UTS à la fin de l'année 2012. L'installation d'URENCO aux États-Unis (Fig. A-11) a actuellement une licence pour une capacité initiale de 3 000 000 d'UTS/an, et la décision d'investir pour la porter à 5,7 millions d'UTS a été prise début 2013, avec comme objectif d'atteindre cette capacité d'ici 2022. URENCO a demandé au NRC de modifier sa licence pour l'autoriser à porter la capacité de production d'URENCO USA à 10 millions d'UTS par an.

⁴ La teneur de rejet, c'est-à-dire la concentration d'uranium 235 dans la fraction appauvrie, détermine indirectement le volume de travail requis sur une quantité d'uranium donnée afin d'obtenir une teneur donnée dans le produit. Une augmentation de la teneur de rejet associée à une quantité déterminée et une teneur déterminée de l'uranium enrichi produit se traduit par une baisse du volume d'enrichissement requis mais accroît les besoins en uranium naturel et en conversion, et vice-versa. La teneur de rejet peut varier considérablement et modifiera la demande de services d'enrichissement.



Fig. A-11. Installation d'enrichissement d'URENCO à Eunice, Nouveau-Mexique (États-Unis). (Photo : Urenco)

47. L'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse d'USEC à Paducah, la plus ancienne usine d'enrichissement en service dans le monde, est arrivée au terme de ses opérations commerciales en 2013 après plus de 60 ans d'exploitation. USEC espère poursuivre ses opérations sur le site en 2014 pour gérer les stocks, exécuter les commandes des clients et satisfaire aux prescriptions de renouvellement de son bail auprès du Département de l'énergie (DEO) des États-Unis.

48. Deux nouvelles installations d'enrichissement par centrifugation sont en cours de conception et de planification aux États-Unis : celle d'Areva à Eagle Rock et l'Installation américaine de centrifugation (ACP) d'USEC. La première est actuellement en attente et AREVA cherche des partenaires financiers et d'autres modèles financiers pour optimiser les dépenses en immobilisations. Le calendrier d'achèvement de la construction de l'ACP établi par USEC dépend de l'obtention d'un financement par le biais du programme de garantie d'emprunt du DOE.

49. L'installation de Global Laser Enrichment (GLE) à Wilmington en Caroline du Nord (États-Unis) a achevé en juin 2013 la première phase du programme relatif à la boucle d'essai pour démontrer l'utilisation de la technologie des lasers pour l'enrichissement de l'uranium. Après les études plus détaillées de la deuxième phase, la première installation commerciale devrait pouvoir produire six millions d'UST par an. D'après la société Silex, le DOE a commencé des pourparlers avec GLE sur la construction d'une autre usine d'enrichissement par laser au site de Paducah pour enrichir ses stocks (environ 100 000 tonnes) de rejets à forte teneur en uranium appauvri.

50. En France, AREVA a officiellement inauguré son installation d'enrichissement d'uranium Georges Besse II Nord en mars 2013, en plus de son usine Sud inaugurée en décembre 2010.

51. En 2013, la licence d'exploitation de l'usine électrochimique de la société TVEL à Zelenogorsk (Fig. A-12), l'une des quatre installations d'enrichissement de l'uranium en service en Fédération de Russie, a été renouvelée jusqu'en 2023. En 2012, les sociétés TVEL et Kazatomprom ont convenu de participer à l'augmentation du capital de risque de l'installation d'enrichissement du Combinat électrochimique ouralien, dont la capacité prévue est de cinq millions d'UTS par an.



Fig. A-12 Usine électrochimique de Zelenogorsk (Fédération de Russie). (Photo : TVEL)

52. Il y a aussi de petites installations d'enrichissement en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran. L'Argentine reconstitue ses capacités d'enrichissement par diffusion gazeuse à Pilcaniyeu. Elle importe actuellement des services d'enrichissement des États-Unis.

53. La capacité mondiale de déconversion⁵ est restée d'environ 60 000 t d'UF₆/an en 2013.

54. 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 dans les assemblages combustibles, mais devrait atteindre environ 8 000 t d'U par an d'ici 2015. En ce qui concerne les réacteurs à eau lourde sous pression (REL P), les besoins étaient de 3 000 t d'U/an. Il existe actuellement plusieurs fournisseurs en concurrence pour la plupart des types de combustibles. La capacité mondiale totale de fabrication de combustible s'est maintenue à environ 13 500 t d'U par an (uranium enrichi dans les éléments combustibles et grappes de combustible) pour le combustible des REO et de 4 000 t d'U par an (uranium naturel dans les éléments combustibles et grappes de combustible) pour le combustible des REL P. Dans le cas du combustible à l'uranium naturel destiné à ces réacteurs, l'uranium est purifié et converti en dioxyde d'uranium (UO₂) en Argentine, au Canada, en Chine, en Inde et en Roumanie.

55. En Chine, la capacité de production annuelle de l'usine de fabrication de combustible de la CNNC à Yibin était d'environ 600 t d'U en 2012. Celle de l'usine de la CNNC située à Baotou, en Mongolie intérieure, qui fabrique des assemblages combustibles pour les REL P CANDU de Qinshan, est portée actuellement de 200 à 400 t d'U par an. Une nouvelle usine est en construction à Baotou pour la fabrication de combustible destiné aux réacteurs AP1000 de la Chine.

56. Une installation de fabrication de combustible d'une capacité prévue de 1 200 t d'U par an prévue au Kazakhstan comme coentreprise AREVA-Kazatomprom devrait être achevée en 2014.

57. La construction d'une usine de fabrication de combustible pour réacteurs VVER-1000 d'une capacité annuelle prévue de 400 t d'U s'est poursuivie près de Smoline (Ukraine).

58. Au cours des dernières années, la société TVEL a conçu un assemblage combustible destiné aux REP, et quatre assemblages pilotes seront chargés pour essai dans l'usine REP Ringhals-3 en Suède en 2014.

⁵ Pour fabriquer du combustible à l'uranium enrichi, il faut reconverter l'UF₆ en poudre d'UO₂. C'est la première étape de la fabrication de combustible enrichi. Elle est appelée reconversion ou déconversion.

59. Les opérations de recyclage d'uranium retraité et de combustible MOX offrent une source d'approvisionnement secondaire en combustible nucléaire. Actuellement, environ 100 t d'uranium retraité sont produites par an pour AREVA par Elektrostal (Fédération de Russie). Une chaîne de l'usine d'AREVA à Romans (France) recycle annuellement environ 80 tonnes de métal lourd (ML) d'uranium retraité en combustible destiné aux REO en France. La capacité mondiale de fabrication de combustible MOX est actuellement d'environ 250 t de ML, les principales installations étant situées en France, en Inde et au Royaume-Uni et quelques installations plus petites en Fédération de Russie et au Japon.

60. L'Inde et la Fédération de Russie fabriquent du combustible MOX destiné aux réacteurs à neutrons rapides. En Fédération de Russie, une installation de fabrication de combustible MOX pour le réacteur à neutrons rapides BN-800 est en construction à Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26). La Fédération de Russie dispose aussi d'installations pilotes à l'Institut de recherche sur les réacteurs nucléaires de Dimitrovgrad et à la centrale de Mayak à Ozersk.

61. Une trentaine de REO ont utilisé du combustible MOX dans le monde en 2013.

62. En octobre 2013, l'installation MELOX de fabrication de combustible d'AREVA a commencé à produire du combustible MOX pour la centrale nucléaire de Borssele (Pays-Bas). Au cours des 30 dernières années, 375 tonnes de combustible usé en provenance de Borssele ont été retraitées à l'usine d'AREVA à La Hague.

Assurance de l'approvisionnement

63. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA au Kazakhstan. En 2012 et 2013, le Secrétariat de l'Agence a poursuivi les activités relatives aux dispositions financières, juridiques et techniques ainsi que les évaluations de sites en vue de l'établissement de cette banque. Des contributions de plus de 150 millions de dollars ont été annoncées par des États Membres, l'UE et la Nuclear Threat Initiative (NTI) pour la réalisation de ce projet. À la fin de 2013, les contributions promises avaient été intégralement versées par le Koweït (10 millions de dollars), la Norvège (5 millions de dollars), la NTI (50 millions de dollars), les Émirats arabes unis (10 millions de dollars) et les États-Unis (environ 50 millions de dollars) ; l'UE a versé 20 millions d'euros sur une contribution promise de 25 millions d'euros⁶.

A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible nucléaire

64. Deux stratégies différentes sont mises en œuvre pour la gestion du combustible nucléaire usé. Celui-ci est soit retraité pour en extraire des matières utilisables (uranium et plutonium) pour du combustible neuf, soit simplement considéré comme déchet et entreposé en attendant le stockage définitif. Aujourd'hui, des pays comme la France, la Chine, l'Inde et la Fédération de Russie retraitent leur combustible usé, tandis que d'autres pays, comme le Canada, la Finlande et la Suède ont opté pour le stockage définitif direct dans une localité hôte volontaire. La plupart des pays n'ont pas encore décidé quelle stratégie adopter et entreposent actuellement le combustible usé en se tenant au courant de l'évolution de la situation en ce qui concerne les deux options possibles.

65. En vertu de la directive 2011/70/Euratom du Conseil de l'Union européenne (UE), les États membres de l'UE ont l'obligation juridique d'établir et de maintenir une politique de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. Dans le domaine de la gestion du combustible usé,

⁶ Les autres mécanismes d'assurance de l'approvisionnement actuellement en place sont décrits dans le Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2012.

l'attention s'est aussi tournée vers des efforts visant à démontrer le comportement de ce combustible dans les systèmes d'entreposage à sec, car il est reconnu qu'il n'y aura pas de dépôt de déchets de haute activité dans de nombreux pays ayant des activités électronucléaires importantes pendant plusieurs décennies.

66. La construction d'une installation d'entreposage à sec pour le combustible utilisé provenant de la centrale nucléaire Sizewell-B d'EDF au Royaume-Uni a démarré en janvier 2013. Cette installation devrait devenir opérationnelle d'ici à 2015.

67. Après avoir suspendu en 2012 toutes les décisions définitives relatives aux demandes de nouveaux réacteurs ou de renouvellement de licences de réacteurs en attendant une mise à jour de sa « décision relative à la confiance vis-à-vis des déchets » et de sa « règle d'entreposage temporaire », la NRC des États-Unis a publié en mars 2013 un document intitulé *Waste Confidence Generic Environmental Impact Statement Scoping Process: Summary Report*. Le projet de déclaration générique d'impact environnemental et la règle d'entreposage temporaire proposée ont été mis à disposition pour permettre de recueillir les observations du public en 2013. La Direction chargée de la question de la crédibilité des options relatives aux déchets actualise la décision relative à la confiance vis-à-vis des déchets et la règle d'entreposage temporaire, tandis que la NRC poursuit, parallèlement, l'examen des demandes de réacteurs, des demandes de renouvellement de licence et des demandes de renouvellement des autorisations d'installations indépendantes d'entreposage de combustible utilisé spécifiques au site.

68. En 2013, quelque 10 000 t de ML ont été déchargées sous forme de combustible utilisé de toutes les centrales nucléaires. En décembre 2013, la quantité totale cumulée de combustible utilisé déchargé dans le monde était d'environ 370 500 t de ML, dont quelque 253 700 t de ML sont entreposées dans des installations situées sur des sites ou hors des sites de réacteurs. Moins d'un tiers de la quantité cumulée de combustible utilisé qui a été déchargée dans le monde, soit environ 112 800 t de ML, a déjà été retraité. En 2013, la capacité mondiale de retraitement commercial, répartie dans quatre pays (Fédération de Russie, France, Inde et Royaume-Uni), était d'environ 4 800 t de ML par an.

69. L'Inde a poursuivi en 2013 la construction à Kalpakkam de l'installation du cycle du combustible du réacteur à neutrons rapides. L'installation proposée est conçue pour fabriquer du combustible destiné au prochain prototype de surgénérateur à neutrons rapides et les deux tranches supplémentaires ultérieures.

70. L'usine de retraitement commercial de 800 t de ML par an de la société Japan Nuclear Fuel Limited à Rokkasho, où les travaux ont été temporairement suspendus en raison du séisme et du tsunami du 11 mars 2011, était prête pour être mise en service à la fin de 2013. Des essais de production de déchets vitrifiés dans l'un des deux fours de fusion ont été achevés avec succès. Lorsqu'elle sera opérationnelle après avoir reçu les autorisations réglementaires, cette usine aura une capacité maximum de retraitement de 800 tonnes par an (Fig. A-13).



Fig. A-13 Usine de retraitement de Rokkasho (Japon). (Photo : JNFL)

71. La Chine a annoncé une proposition de retraitement de combustible usé de réacteur dans une nouvelle usine d'une capacité de retraitement de 800 tonnes de combustible usé par an qui sera construite en coopération avec AREVA.

72. En octobre 2013, le gouvernement du Royaume-Uni a annoncé un accord conclu avec EDF autorisant la construction de la première centrale nucléaire dans le pays en 20 ans. Le livre blanc de 2008 du gouvernement indique que la base de construction de cette centrale devrait être que le combustible usé ne serait pas retraité. La stratégie actuelle de gestion du combustible usé à Hinkley Point C sera l'entreposage sur le site du réacteur pendant une durée pouvant atteindre 10 ans, puis un entreposage intérimaire dans une installation indépendante d'entreposage de combustible usé jusqu'à ce qu'une installation de stockage géologique soit disponible. La base de conception de cette installation d'entreposage est un entreposage en piscine, avec immersion d'échangeurs de chaleur dans celle-ci et évacuation passive de la chaleur thermique. Ce type de technologie est aussi en train d'être évaluée par le Brésil.

73. Entre mars et mai 2013, les neuf châteaux d'entreposage à sec de la zone de garde des châteaux située près de la mer à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ont été transférés à la piscine commune d'entreposage de combustible usé pour inspection et ultérieurement transportés dans la nouvelle zone de garde et d'entreposage temporaire des châteaux. Les inspections ont montré que ni le confinement des châteaux, ni l'intégrité du combustible n'avaient souffert. D'autres opérations de récupération de combustible ont démarré sur le site en novembre 2013, avec des activités ordinaires de récupération à partir de la piscine d'entreposage du combustible usé de la tranche 4, ce qui constitue une étape cruciale sur la voie de la réduction des risques et du déclassement.

74. En octobre 2013, la Société d'entreposage de combustible recyclable du Japon (une filiale de la Compagnie d'électricité de Tokyo et de la Japan Atomic Power Company) a achevé la construction d'un bâtiment d'entreposage intérimaire du combustible usé dans la ville de Mutsu, dans la préfecture d'Aomori. Sa licence actuelle prévoit l'entreposage de 3 000 t d'U de combustible usé, avec une capacité éventuelle prévue de 5 000 t d'U. L'Autorité de réglementation nucléaire a assisté aux essais officiels finals. D'autres avancées dépendent toutefois de la certification par rapport aux nouvelles normes de sûreté de la NRA.

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

75. Les déchets radioactifs résultent de l'emploi de techniques nucléaires pour la production d'énergie, des activités de recherche, et des applications médicales et industrielles. Outre le combustible usé déclaré comme déchet ou les flux de déchets dérivant du retraitement de combustible usé, des déchets radioactifs sont produits pendant l'exploitation d'installations nucléaires, leur déclassement et la remédiation connexe de sites, y compris ceux qui ont été ou sont utilisés à des fins militaires et ceux qui se trouvent en situation post-accidentelle. Pour les gérer de manière sûre, il faut en gérer les flux de manière adaptée, les traiter puis les conditionner, et disposer de capacités adéquates pour l'entreposage, le transport entre installations et enfin, le stockage définitif.

Estimations du stock mondial des déchets radioactifs

76. Le stock mondial des déchets radioactifs déclarés comme étant entreposés en 2013 était d'environ 68 millions de m³ (tableau A-2). Le volume cumulé des déchets radioactifs stockés définitivement jusqu'en 2012 était d'environ 76 millions de m³, y compris quelque 29 millions de m³ de déchets liquides injectés dans des puits profonds et environ 4 000 m³ de déchets solides de haute activité provenant principalement de Tchernobyl qui étaient stockés définitivement. L'accumulation annuelle de déchets de haute activité (DHA) traités reste assez constante, avec un taux moyen d'accumulation d'environ 850 m³ par an dans le monde (combustible usé non compris).

77. En décembre 2013, 467 installations d'entreposage et 154 installations de stockage définitif étaient en service dans le monde⁷ pour gérer ces stocks de déchets.

Tableau A-2. Estimation du stock mondial des déchets radioactifs pour 2013⁸

Classe de déchets	Entreposage⁹ (mètres cubes)	Stockage définitif cumulé (mètres cubes)
Déchets de très faible activité (DTFA)	163 000¹⁰	193 000
Déchets de faible activité (DFA)	56 663 000¹¹	64 992 000¹²
Déchets de moyenne activité (DMA)	8 734 000	10 588 000
Déchets de haute activité (DHA)	2 744 000	72 000¹³

Source : Base de données Internet sur la gestion des déchets (2013), rapports officiels nationaux et données librement accessibles.

Déclassement

78. En décembre 2013, 149 réacteurs de puissance avaient été mis définitivement à l'arrêt dans le monde. Au total, 16 réacteurs de puissance sont maintenant complètement démantelés, 52 sont en

⁷ D'après les informations communiquées par les États Membres à la Base de données Internet de l'Agence sur la gestion des déchets (NEWMDB), accessible en ligne à l'adresse <http://newmdb.iaea.org/>.

⁸ Les chiffres du tableau A-2 sont des estimations et non un compte exact des quantités de déchets radioactifs actuellement gérées dans le monde. En outre, il existe des différences intrinsèques entre les estimations des quantités entreposées d'une année sur l'autre à cause des facteurs suivants : a) variations de masse et de volume au cours du processus de gestion ; b) variations dans les données communiquées et modifications ou corrections apportées à leurs propres données par les États Membres ; et c) adjonction de nouveaux États Membres à la base de données.

⁹ Les déchets traités et conditionnés passent par diverses étapes de manipulation durant leur entreposage et avant d'être stockés définitivement. La masse et le volume des déchets radioactifs changent donc continuellement au cours de leur gestion avant stockage définitif. Ceci peut expliquer les écarts constatés dans les quantités estimées de déchets entreposés d'une année sur l'autre.

¹⁰ L'estimation relative aux DTFA est très inférieure à celle concernant les DFA parce que de nombreux États Membres détenant d'importants volumes de déchets n'ont pas défini de classe pour les DTFA. Nombre de ces États Membres sont cependant en train de réévaluer les classes de déchets qu'ils ont définies afin de les aligner davantage sur les classes recommandées dans la publication intitulée « *Classification of Radioactive Waste* » (collection Normes de sûreté de l'AIEA n° GSG-1, 2009), en sorte que ce chiffre augmentera probablement à l'avenir, ce qui conduira à une baisse correspondante dans la catégorie des DFA.

¹¹ L'estimation concernant les DFA entreposés ne comprend pas environ 4×10^8 m³ de DFA liquides signalés comme étant contenus dans des réservoirs spéciaux qui ne sont pas isolés du milieu environnant, car ils ne satisfont pas de ce fait à la définition du terme « entreposage » telle qu'elle figure dans le *Glossaire de sûreté de l'AIEA* (2007). C'est la raison pour laquelle la question de savoir si ces déchets doivent être inclus dans cette estimation n'est toujours pas tranchée.

¹² La différence sensible dans l'estimation du volume cumulé de DFA et de DMA stockés définitivement par rapport au rapport précédent tient à l'inclusion des estimations de la Fédération de Russie.

¹³ Ce volume de déchets de haute activité inclut à la fois les déchets liquides stockés définitivement qui ont été indiqués par la Fédération de Russie et environ 4 000 m³ de déchets radioactifs solides indiqués par l'Ukraine, qui sont considérés comme entreposés provisoirement en attendant qu'un concept/emplacement ou une solution plus durable ait été trouvé. Le stockage définitif de DHA ukrainiens résultait de l'assainissement d'urgence entrepris à la tranche 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl.

cours de démantèlement, 59 sont maintenus en attente sûre ou en attente de démantèlement final, trois sont placés sous massif de protection et, pour 17 autres, la stratégie de démantèlement n'a pas encore été définie. Environ 40 % des 434 réacteurs nucléaires en service dans le monde ont aujourd'hui plus de 30 ans et approximativement 7 % d'entre eux ont plus de 40 ans. Même si certains pourront encore fonctionner jusqu'à 60 ans, nombre d'entre eux seront retirés du service dans les 10 à 20 prochaines années. Sauf dans des cas particuliers, comme pour les réacteurs modérés au graphite pour lesquels des solutions de stockage définitif des déchets ne sont pas encore en place, la stratégie de déclasserment généralement privilégiée dans la plupart des États Membres est le « démantèlement immédiat », processus par lequel le stock de déchets radiologiques est retiré du site et le contrôle réglementaire levé dans les 15 à 25 années suivant la mise à l'arrêt.

79. Sur les 480 réacteurs de recherche et assemblages critiques qui ont été mis à l'arrêt définitivement, 70 % ont déjà été entièrement déclassés. Plusieurs centaines d'autres installations nucléaires, telles que des installations de gestion des déchets radioactifs ou du cycle du combustible, ont été déclassées ou sont en cours de démantèlement.

80. Les États Membres ayant un programme électronucléaire de grande ampleur, c'est-à-dire ceux ayant commencé à produire de l'énergie nucléaire dans les années 1950 et 1960, ont accompli des progrès importants dans la gestion des déchets hérités de leurs premières activités. Ils ont développé des technologies et des compétences pour la mise en œuvre de programmes de déclasserment et de remédiation de l'environnement. Ces compétences sont en place dans les organismes de réglementation, les organismes chargés de la mise en œuvre et un ensemble d'organismes techniques fournissant des services d'approvisionnement aux propriétaires des installations et des sites à déclasser ou à assainir. Des efforts supplémentaires devront cependant être encore accomplis pendant plusieurs décennies pour que la remédiation des principaux sites de production d'uranium et des sites utilisés pour les premières activités de recherche soit complète. On trouvera ci-après des exemples de programmes où des progrès considérables ont été enregistrés en 2013 en matière de déclasserment des centrales nucléaires :

- France – décontamination et retrait de générateurs de vapeur de la centrale nucléaire de Chooz A et leur stockage définitif sur le site prévu à Morvilliers pour les déchets de très faible activité ;
- Espagne – achèvement de la segmentation et du retrait des internes du réacteur de la centrale nucléaire José Cabrera ;
- Royaume-Uni – décontamination des piscines d'entreposage du combustible usé à la centrale nucléaire de Bradwell en vue d'une mise en attente sûre d'ici à 2015 ;
- États-Unis – retrait en cours de déchets de faible activité de la centrale nucléaire de Zion dans le cadre d'une décision visant à remplacer la précédente stratégie de démantèlement différé par une stratégie de démantèlement immédiat.

81. Dans les États Membres n'ayant pas de programme électronucléaire de grande ampleur, les progrès sont souvent beaucoup plus lents. Cela s'explique notamment par l'absence de cadres appropriés aux niveaux juridique, politique et réglementaire et de mécanismes de financement connexes, l'insuffisance des moyens technologiques et des compétences appropriés, et l'inadéquation des mécanismes de collaboration avec les parties prenantes concernées.

82. Les autorités japonaises ont continué à mettre en œuvre la feuille de route à moyen et long terme pour le déclasserment des tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO (publiée en 2011 et mise à jour en juin 2012). La phase 1 de la feuille de route (décembre 2011-décembre 2013) était axée sur les travaux d'assainissement et de stabilisation en vue du retrait du combustible des piscines d'entreposage du combustible usé (dans la phase 2). Le retrait du combustible de la tranche 4 a commencé en novembre 2013, soit un mois avant la date initialement prévue. Le retrait de combustible de la tranche 3 est prévu pour 2015 et des tranches 1 et 2 pour 2017.

En outre, des plans sont actuellement élaborés pour le retrait, lors de la phase 3 (après décembre 2021), des débris de combustible provenant des bâtiments des réacteurs. En fonction de la résistance sismique des bâtiments endommagés, il faudra peut-être y construire de nouvelles superstructures afin qu'ils puissent supporter les appareils de manutention du combustible. Ces questions seront traitées en 2014 et des solutions appropriées seront proposées. D'importants travaux de recherche-développement se sont poursuivis pour permettre la mise au point d'appareils commandés à distance pour la détection des dommages causés aux enveloppes de confinement primaire.

Remédiation

83. La remédiation de l'environnement comprend toutes les mesures qui peuvent être mises en œuvre pour réduire l'exposition à des rayonnements due à une contamination existante de terres en agissant sur la contamination elle-même (la source) ou sur les voies d'exposition des êtres humains. Dans de nombreux sites à travers le monde, des actions correctives sont appliquées ou doivent encore l'être. Les travaux de remédiation font généralement appel à d'énormes ressources et nécessitent une planification appropriée, une bonne gestion des projets, du personnel qualifié, ainsi qu'un cadre réglementaire adéquat. L'impact de chacun de ces points sur la mise en œuvre des projets de remédiation et de déclassement est actuellement analysé par l'Agence dans le cadre du projet sur les contraintes à la mise en œuvre des programmes de déclassement et de remédiation de l'environnement (CIDER). À la fin de ce projet, l'Agence devrait pouvoir savoir clairement pourquoi ces activités n'ont pas beaucoup progressé et proposer des solutions créatives et innovantes.

84. L'année 2013 a été marquée par les progrès des opérations d'assainissement menées dans les zones touchées par l'accident de Fukushima Daiichi. Les autorités japonaises ont consacré d'importantes ressources à l'élaboration de stratégies et de plans et à la mise en œuvre d'activités de remédiation des grandes zones contaminées en dehors du site. En particulier, des efforts ont été faits pour permettre aux personnes évacuées de regagner leur domicile. La coordination des activités de remédiation et des efforts de reconstruction et de revitalisation a aussi bien progressé. Une mission de suivi de l'Agence exécutée en octobre 2013 a aidé le Japon à évaluer les progrès réalisés depuis la précédente mission en 2011, examiné les stratégies, plans et travaux de remédiation, et communiqué ses conclusions à la communauté internationale.

Déchets radioactifs hérités du passé

85. Le Groupe de contact d'experts pour les initiatives internationales relatives à l'héritage nucléaire en Fédération de Russie (CEG) contribue au succès de la mise en œuvre des programmes internationaux dans ce domaine. Le programme de démantèlement des sous-marins nucléaires déclassés est maintenant près d'être achevé. On est en train de sceller les réacteurs des sous-marins déchargés de leur combustible et de les placer dans des installations d'entreposage à long terme. Actuellement, 65 réacteurs de sous-marins sont placés dans une installation d'entreposage dans le nord-ouest de la Fédération de Russie, et trois autres dans l'extrême-est du pays. Un programme analogue est exécuté aux États-Unis, où 114 sous-marins et navires nucléaires ont été démantelés. Deux centres régionaux de conditionnement et d'entreposage de déchets radioactifs sont en construction dans le nord-ouest (Fig. A-14) et l'extrême-est de la Fédération de Russie. En outre, un programme international de récupération de puissants générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (GTR) qui étaient utilisés dans des phares le long des côtes de la Fédération de Russie est actuellement mis en œuvre avec succès.



Fig. A-14. Construction du Centre régional de conditionnement et d'entreposage à long terme des déchets radioactifs dans le nord-ouest de la Russie. (Photo : Energiewerke Nord GmbH)

Traitement et conditionnement des déchets radioactifs

86. Les déchets liquides radioactifs proviennent en grande partie du cycle du combustible nucléaire, notamment des réacteurs de puissance, des installations de retraitement et de traitement des déchets, et des activités de déclassement. Les techniques de traitement permettant de réduire le contenu radioactif sont notamment la précipitation chimique, l'adjonction d'absorbants de fines particules radioactives (techniques toutes deux suivies du retrait des matières solides), et l'utilisation d'absorbants-échangeurs d'ions en forme de colonne. Deux autres techniques pouvant être utilisées sont l'évaporation ou l'osmose inverse (filtration au niveau de l'atome). Les caractéristiques des absorbants-échangeurs d'ions spécialisés continuent d'être perfectionnées grâce au renforcement de leur sélectivité pour les principaux radionucléides et à l'amélioration de leurs propriétés physiques pour l'utilisation en colonne, par exemple à l'aide de matériaux composites. Le traitement des déchets liquides a constitué un aspect important des activités de remédiation après l'accident de Fukushima Daiichi et a été conduit à l'aide d'une installation de traitement fournie par la communauté internationale. Tous les processus susmentionnés sont combinés pour enlever une grande partie des divers radionucléides présents à Fukushima.

87. Le conditionnement des déchets recouvre l'immobilisation des radionucléides, la mise en conteneur des déchets et la fourniture d'emballages supplémentaires. Les méthodes d'immobilisation courantes sont notamment la solidification des déchets radioactifs liquides de faible ou moyenne activité à l'aide de ciment, de bitume ou de verre, et la vitrification des déchets radioactifs liquides de haute activité dans une matrice de verre ou leur incorporation dans une matrice de métal. La tendance actuelle est de continuer d'améliorer les caractéristiques des processus d'immobilisation des déchets de faible ou moyenne activité (DFMA). L'Égypte, les États-Unis, la Fédération de Russie, l'Inde et la Serbie ont modifié les processus en utilisant des mélanges destinés à renforcer les propriétés physiques du ciment et à adapter le potentiel d'immobilisation à certains types ou groupes de déchets et à contrecarrer l'effet dommageable possible de types de déchets inactifs. La Chine, les États-Unis, la France, le Royaume-Uni, la Russie et la Suisse ont mis au point de nouveaux liants pour pallier les limites des propriétés du ciment Portland. La France a fait part de la stabilisation de sels de zinc solubles à l'aide de ciment de sulfoaluminat de calcium.

88. L'Agence a récemment évalué quatre types de nouveaux matériaux cimentaires : le ciment de sulfoaluminat de calcium, le ciment d'aluminat de calcium, le géopolymère composé de silicate de métal alcalin et de métakaolin (SIAL), et le ciment au phosphate de magnésium¹⁴. L'expérience de construction positive acquise récemment avec des matériaux géopolymères semble indiquer qu'il est

¹⁴ AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, The Behaviours of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste: Results of a Coordinated Research Project, IAEA TECDOC-1701, AIEA, Vienne (2013).

possible de les appliquer plus largement au conditionnement des déchets. Les géopolymères SIAL ont montré une meilleure résistance à la compression et une faible lixivibilité du césium-137, et leur utilisation est autorisée en République tchèque et en Slovaquie pour les boues radioactives et la solidification de résine. Des travaux de recherche menés en Australie, en Fédération de Russie, au Royaume-Uni et en Slovaquie devraient permettre de produire davantage d'informations, notamment sur la durabilité de ces matériaux.

Entreposage de déchets radioactifs

89. L'entreposage de déchets permet de les confiner et de les isoler de manière appropriée et facilite leur récupération en vue d'un traitement ultérieur ou de leur stockage définitif. Des tendances notables ont été observées ces dix dernières années dans ce domaine, telles que la prolongation de la durée d'entreposage et le renforcement de la sûreté dans les installations d'entreposage. Elles ont connu un succès croissant en particulier pour les déchets radioactifs de haute activité. Le document d'orientation de l'Autorité du déclassé nucléaire du Royaume-Uni, *Interim Storage of Higher Activity Waste Packages — Integrated Approach*, publié en 2012, est un guide contenant de bonnes pratiques pour réglementer l'entreposage des déchets radioactifs. Il s'appuie notamment sur les principes suivants : prise en compte du cycle de vie complet ; conditions cohérentes pour l'emballage et l'entreposage des déchets afin de limiter le plus possible la production de déchets ; prévention vaut mieux que guérison ; anticipation dans la conception ; et gestion efficace des connaissances. Le document prévoit que les installations d'entreposage devraient avoir la capacité de durer au moins 100 ans.

90. Pour les nouveaux entrepôts, la durée de vie nominale devrait être en principe d'au moins 100 ans. En outre, s'il est proposé d'utiliser une structure existante comme entrepôt, avec les modifications voulues, il faudrait démontrer qu'elle répond aux normes de construction modernes, que les matériaux choisis pour les travaux de modification sont appropriés, et que l'entrepôt résultant correspond à l'objectif de durée de vie nominale d'au moins 100 ans.

Stockage définitif de déchets radioactifs

91. Des installations de stockage définitif pour toutes les catégories de déchets radioactifs, sauf pour les DHA et/ou le combustible usé, sont en service dans le monde entier. Elles comprennent les installations de stockage définitif en tranchées pour les DTFA (en Espagne, en France et en Suède, par exemple) ou pour les DFA dans les régions arides (comme en Afrique du Sud, en Argentine, aux États-Unis et en Inde) ; les installations construites en surface ou à faible profondeur pour les DFA (par exemple, en Chine, en Espagne, en France, en Inde, au Japon, en République tchèque, au Royaume-Uni, en Slovaquie et en Ukraine) ; les installations construites sous la surface pour les déchets de faible et moyenne activité (DFMA) (en Suède et en Finlande, par exemple) ; les puits de stockage définitif de DFA utilisés aux États-Unis ; et les installations de stockage géologique destinées à recevoir des DFMA (aux États-Unis et en Hongrie, par exemple). Les options de stockage définitif pour les déchets de matières radioactives naturelles varient suivant les réglementations nationales et vont des installations de stockage définitif en tranchées aux installations construites sous la surface (en Norvège, par exemple).

92. Des mesures ont été prises en vue de l'octroi d'autorisations pour des installations de stockage géologique de DHA et/ou de combustible usé en Finlande, en France et en Suède.

93. Le Canada continue de mettre en place deux installations de stockage géologique. La première, sur le site de Bruce (Ontario Power Generation) pour les DFA et les déchets de moyenne activité (DMA), en est actuellement au stade de l'autorisation – les audiences publiques ont été achevées en 2013 et une décision réglementaire devrait être prise fin 2014 ou début 2015 – et la deuxième, dont le site n'est pas encore déterminé, est un dépôt pour combustible nucléaire irradié et un centre

d'expertise. Collaborant avec 21 groupes volontaires ayant communiqué leur souhait de connaître le plan du Canada pour la gestion sûre et à long terme du combustible nucléaire usé, la Société de gestion des déchets nucléaires a achevé une première phase d'évaluation préliminaire avec huit d'entre eux et poursuit les évaluations avec les 13 autres. Quatre des huit premiers groupes ont été jugés aptes à passer à l'étape suivante de l'évaluation.

94. La Chine a suivi le plan à moyen terme qu'elle a établi pour la gestion de ses DFMA dans cinq sites régionaux de stockage définitif, d'une capacité totale d'environ un million de m³ d'ici 2020. Deux d'entre eux sont en service, avec des capacités actuelles de 20 000 m³ et 80 000 m³, le troisième site est en construction et les deux autres sites doivent être mis au point. La Chine prévoit actuellement des besoins en matière de stockage géologique liés aux 140 000 tonnes de combustible usé provenant d'un parc de 48 réacteurs. Il faudra une solution de stockage définitif pour les DHA correspondants après retraitement. Pour cela, les plans sont notamment les suivants : choix du site (2014), construction (2017) et exploitation d'un laboratoire de recherche souterrain d'ici 2020 ; conduite de travaux de R-D in situ et lancement de la construction d'un dépôt géologique profond d'ici 2040 ; et démarrage des opérations de stockage définitif d'ici 2050.

95. En Finlande, Posiva espère recevoir une autorisation de construction pour son dépôt géologique profond d'ici fin 2014 ou début 2015 et se prépare à effectuer des démonstrations en grandeur nature pour résoudre les questions scientifiques et techniques restantes en vue d'obtenir une licence d'exploitation. Elle prévoit de commencer les opérations au début des années 2020.

96. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) prépare la phase industrielle de son projet de stockage réversible Cigéo pour les DMA et les DHA et a entrepris une analyse de faisabilité et un processus formel public d'engagement des parties prenantes avant de présenter une demande d'autorisation. En 2013, les plans pour l'installation Cigéo ont atteint le stade de l'ultime consultation publique, organisée par la Commission nationale du débat public. Les plans initiaux de réunions publiques ont été remplacés par des débats en ligne après une série de manifestations. Un panel de citoyens créé dans le cadre de ce processus a par la suite conclu qu'il n'était a priori pas hostile au projet Cigéo. L'Andra prévoit la mise en service de l'installation d'ici 2025, sous réserve que la demande d'autorisation soit présentée en 2015 et que l'autorisation de construction soit octroyée en 2018.

97. L'Allemagne a adopté une loi sur la sélection d'un site de dépôt en juin 2013. Une commission indépendante conduira le processus de sélection du site du nouveau dépôt pour les déchets calogènes. L'installation qui avait été envisagée à Gorleben n'est pas exclue du nouveau processus.

98. Après une cérémonie d'inauguration en décembre 2012, les opérations courantes ont commencé à l'installation de stockage définitif de Bataapáti, en Hongrie, conçue pour recevoir 40 000 m³ de DFMA issus de l'exploitation de la centrale nucléaire. La conception permet la construction de nouvelles casemates de stockage parallèlement aux opérations de mise en place de déchets dans celles qui existent déjà.

99. En République de Corée, la construction du Centre de stockage définitif des déchets de faible ou moyenne activité de Wolsong est presque achevée et la première phase de fonctionnement de ce centre, abritant 100 000 fûts, doit être achevée en juin 2014. Le gouvernement a mis sur pied une commission pour que soient discutées publiquement les futures options de gestion du combustible usé. Le Laboratoire de recherche souterrain du KAERI sera étendu pour accueillir le programme de R-D prévu à l'appui du stockage géologique.

100. La mise au point du dépôt lituanien en surface ou à faible profondeur pour les DFA en est actuellement au stade de la planification détaillée et la construction du dépôt de DTFA devrait commencer pendant le deuxième semestre de 2014. En attendant que le stockage définitif puisse

commencer, les colis de déchets sont placés dans une installation d'entreposage tampon de 4 000 m³, dont la mise en service a été autorisée par l'Autorité lituanienne de sûreté nucléaire en mai 2013.

101. L'Institut national polonais de géologie a entamé des préparatifs pour relancer le développement d'un programme de stockage géologique. Les caractérisations préliminaires de sites visant à sélectionner les sites possibles pour une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur seront suivies d'une phase de consultation publique et administrative au niveau local.

102. En Fédération de Russie, des études de conception sont menées actuellement en vue de la création d'un laboratoire souterrain dans le massif granitoïde de Nizhnekanskiy, à une profondeur de 500 m, dans la région de Krasnoyarsk en Sibérie, pour étudier la possibilité de stocker définitivement des déchets de haute et moyenne activité à longue période. Ce laboratoire devrait pouvoir contenir 7 500 châteaux de déchets calogènes et 155 000 m³ de déchets non calogènes. Le site d'une installation de stockage définitif de DFA et de DMA à courte période a été choisi dans la région de Leningrad, dans une formation argileuse à une profondeur de 60-70 m (Fig. A-15). Elle est conçue pour recevoir, pendant la première phase des opérations, 50 000 m³ de DFA dans des chambres de stockage définitif de type casemate.

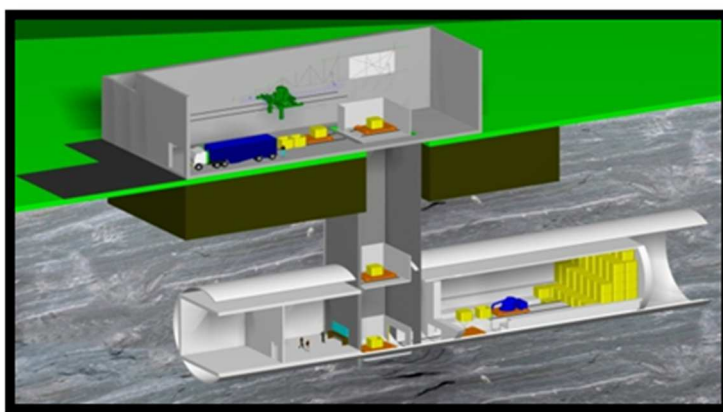


Fig. A-15. Concept des opérations de mise en place des DHA dans l'installation de stockage définitif prévue à cette fin en Fédération de Russie. (Graphique : Institut russe de conception et de recherche pour la technologie énergétique intégrée)

103. En Suède, le processus d'autorisation de l'installation de stockage définitif du combustible usé devrait durer plusieurs années encore. En septembre 2013, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires SBK a présenté, pour examen, le tout dernier programme de recherche, développement et démonstration dans le domaine du stockage géologique en Suède et révisé actuellement les calculs des futurs coûts du programme de gestion du combustible usé. Le gouvernement s'appuiera sur cette révision pour décider des contributions à verser au Fonds pour les déchets nucléaires, qui finance ce programme.

104. La Suisse révisé actuellement son ordonnance sur le fonds de désaffectation et sur le fonds de gestion des déchets. Dans les propositions d'amendement des futures estimations des coûts, on prévoit une réduction du taux d'inflation (de 3 % à 1,5 %) et du retour sur investissement (de 5 % à 3,5 %) par rapport aux estimations précédentes ainsi qu'un « supplément de sécurité forfaitaire » de 30 %. Le gouvernement fédéral a approuvé le programme d'ensemble établi par la Nagra pour la gestion des déchets, qui couvre les DFMA et les DHA. Des propositions ont été faites en 2013 concernant l'emplacement d'installations en surface et à faible profondeur, et l'étape 2 du plan sectoriel, visant la sélection d'au moins deux sites pour le dépôt de DFMA et de DHA, est en cours.

105. L'Ukraine, en collaboration avec la CE, élabore actuellement un plan national pour le stockage géologique des déchets radioactifs et a l'intention de procéder à des évaluations préliminaires de la

sûreté pour trois sites potentiels d'ici 2017. La capacité de l'installation ukrainienne de stockage de DFMA en surface et à faible profondeur de Buryakovka créée à la suite de l'accident de Tchernobyl, d'environ 700 000 m³, est actuellement accrue de 120 000 m³ dans le cadre d'un projet de reconstruction financé par la Commission européenne.

106. La région britannique de Cumbria occidentale s'est retirée du processus de sélection de sites de stockage géologique en janvier 2013. Le gouvernement du Royaume-Uni continue de mettre l'accent sur le développement du stockage géologique et sollicite des propositions sur la manière de réviser et d'améliorer ce processus.

107. Aux États-Unis, la partie 7 de l'installation pilote de confinement des déchets du Ministère de l'énergie a été approuvée par le Département de l'environnement du Nouveau-Mexique aux fins du stockage définitif de matières du secteur de la défense contaminées par des radio-isotopes artificiels plus lourds que l'uranium. Sur la base des recommandations de la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis, la stratégie nationale de gestion des DHA et du combustible usé prévoit la mise au point d'installations d'entreposage provisoire plus grandes à l'échelle pilote et enregistre des progrès manifestes pour ce qui est du choix et de la caractérisation des sites de stockage géologique. La NRC continuera de traiter la demande d'autorisation pour le projet de Yucca Mountain.

Gestion des sources radioactives scellées retirées du service

108. Les options de stockage définitif des sources scellées retirées du service, comme leur stockage avec d'autres déchets dans des installations appropriées, l'augmentation du nombre des options de recyclage et de rapatriement, ou le stockage dans des puits spéciaux sont des solutions qui sont sérieusement à l'étude dans plusieurs pays dont l'Afrique du Sud, le Ghana, la Malaisie et les Philippines.

109. Un certain nombre d'opérations ont été menées avec succès en 2013 pour enlever des sources scellées retirées du service des locaux des utilisateurs et les placer sous contrôle en les transférant dans une installation nationale d'entreposage de déchets radioactifs ou dans un autre établissement où ils pouvaient être entreposés dans des conditions adéquates. La cellule chaude mobile a été expédiée aux Philippines en avril 2013 aux fins du conditionnement de 22 sources de haute activité et de leur entreposage sûr et sécurisé. En Bosnie-Herzégovine, cinq sources ont été récupérées et retirées du pays pour être recyclées. Le rapatriement de sources de fabrication française des catégories 1 et 2 a commencé dans plusieurs États Membres, dont le Cameroun, le Liban et le Maroc. Le rapatriement de deux sources au Soudan a été achevé en 2013.

110. D'importants efforts ont été accomplis pour associer la cellule chaude mobile à un modèle de stockage en puits en vue de limiter le plus possible la manipulation de sources et d'éviter des transports inutiles.

111. Divers documents techniques et modules de formation ont été établis et utilisés pour aider les États Membres à acquérir les compétences techniques nécessaires pour le conditionnement sûr et sécurisé des sources retirées du service des catégories 3 à 5. Des opérations de conditionnement de telles sources ont été achevées en Égypte et au Maroc, et une formation a été dispensée au personnel local et régional.

112. L'Agence a élargi l'accès au Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes à un grand nombre de personnes désignées dans chaque pays à cette fin et à des organismes internationaux comme Europol, facilitant ainsi l'identification des sources scellées retirées du service trouvées sur le terrain.

113. La Conférence internationale sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives : maintien au niveau mondial du suivi continu des sources tout au long de leur cycle de vie, organisée à Abou Dhabi (Émirats arabes unis) en octobre 2013, a mis en évidence le fait que des défis considérables demeurent concernant la gestion et le stockage définitif des sources scellées retirées du service, comme l'absence de colis de transport certifiés, d'installations d'entreposage à long terme, et d'orientations sur la gestion de la fin de vie.

A.4. Sûreté

114. En 2013, la sûreté des centrales nucléaires du monde entier a continué d'être améliorée, notamment grâce au recensement et à l'application des enseignements tirés jusqu'à présent de l'accident de Fukushima Daiichi. Des progrès importants ont été accomplis dans plusieurs domaines clés, comme des évaluations des vulnérabilités de la sûreté des centrales nucléaires, des améliorations des capacités de préparation et de conduite des interventions d'urgence, un appui aux États Membres prévoyant de lancer un programme électronucléaire, l'intensification et la poursuite de la création de capacités, et la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants. Ces progrès ainsi que ceux faits dans d'autres domaines ont contribué au renforcement du cadre mondial de sûreté nucléaire.

115. L'Agence continue de partager et de diffuser les enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi. Le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, adopté par la Conférence générale après l'accident de Fukushima, est resté au cœur des mesures de sûreté prises par les États Membres, le Secrétariat et d'autres parties prenantes concernées. En 2013, l'Agence a organisé la Réunion d'experts internationaux sur le déclassement et la remédiation à la suite d'un accident nucléaire (du 28 janvier au 1^{er} février 2013), la Réunion d'experts internationaux sur les facteurs humains et organisationnels dans le domaine de la sûreté nucléaire à la lumière de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (du 21 au 24 mai 2013) et la Conférence internationale sur les systèmes de réglementation nucléaire efficaces (du 8 au 12 avril 2013). En 2013, l'Agence a publié les rapports intitulés *IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident*, *IAEA Report on Strengthening Nuclear Regulatory Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant* et *IAEA Report on Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*.

116. À la 56^e session ordinaire de la Conférence générale, le Directeur général a annoncé que l'Agence allait établir un rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi, qui serait achevé en 2014. Le rapport comprendra les points suivants : description de l'accident et contexte dans lequel il a eu lieu, évaluation de la sûreté, préparation et conduite de l'intervention d'urgence, conséquences radiologiques et relèvement après l'accident.

117. Sur le plan opérationnel, le niveau de sûreté des centrales nucléaires reste élevé, comme le montrent les indicateurs de performance en la matière recueillis par l'Agence et l'Association mondiale des exploitants nucléaires. La figure A-16 montre le nombre d'arrêts non programmés pour 7 000 heures de fonctionnement (environ un an). Cet indicateur est couramment utilisé pour donner une idée de l'amélioration de la sûreté des centrales, notamment par la réduction du nombre de transitoires thermohydrauliques et de réactivité indésirables et non programmés nécessitant un arrêt du réacteur. Comme il ressort de cette figure, des améliorations constantes ont été apportées ces dernières années. La hausse observée entre 2010 et 2011 est liée au nombre élevé d'arrêts non programmés déclenchés par le séisme de mars 2011 au Japon.

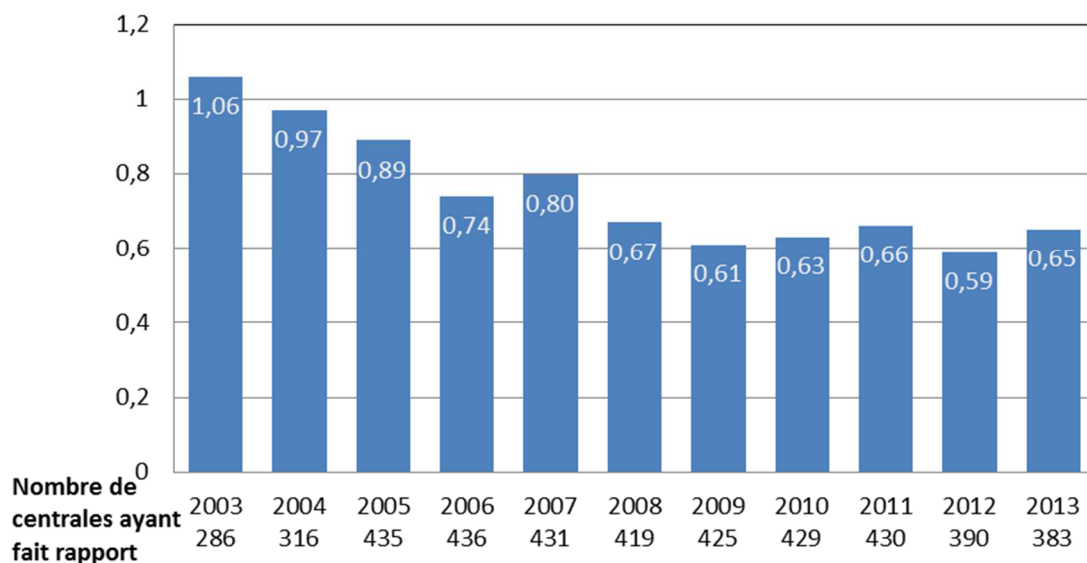


Fig. A-16. Taux moyen d'arrêts non programmés (automatiques ou manuels) – nombre d'arrêts non programmés pour 7 000 heures de fonctionnement. (Source : Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA <http://www.iaea.org/pris>)

118. On peut trouver d'autres informations sur la sûreté nucléaire dans le *Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour 2014*.

B. Fission avancée et fusion

B.1. Fission avancée

B.1.1. Réacteurs refroidis par eau

119. Au Canada, la Commission canadienne de sûreté nucléaire a achevé son troisième et dernier examen de préautorisation du modèle CANDU 6 (EC6) amélioré de 740 MWe, qui comporte diverses mesures de renforcement de la sûreté pour satisfaire aux normes canadiennes et internationales les plus récentes. Candu Énergie a aussi achevé la mise au point du réacteur CANDU avancé (ACR-1000), qui est caractérisé par une normalisation très poussée des composants et fonctionne à l'uranium légèrement enrichi pour compenser l'utilisation d'eau ordinaire comme caloporteur primaire. Deux étapes de l'examen de préautorisation du modèle ACR-1000 ont été achevées. Candu Energy collabore en outre avec des partenaires internationaux à la mise au point de variantes du modèle EC6 en vue d'utiliser des combustibles avancés (uranium retraité, combustible Mox et combustible au thorium).

120. En Chine, 29 réacteurs à eau sous pression (REP) sont en construction. Il s'agit notamment de REP évolutifs de 650 MWe et 1 080 MWe basés sur la technologie de centrales actuellement en service, ainsi que des modèles plus récents de l'AP-1000 et du réacteur européen à eau sous pression (EPR). Un nouveau réacteur, Hongyanhe-1, de modèle CPR 1000, a été couplé au réseau en février 2013. La Chine continue la mise au point des modèles CAP-1400 et CAP-1700, qui sont des versions à grande échelle de l'AP-1000. Dans le même temps, elle continue d'investir dans la recherche pour concevoir son propre RESC.

121. En France, AREVA continue à commercialiser l'EPR de 1 600+ MWe. En outre, le groupe met au point actuellement le REP ATMEA de 1 100+ MWe avec l'entreprise japonaise Mitsubishi Heavy Industries, et le réacteur à eau bouillante (REB) KERENA de 1 250+ MWe en partenariat avec la compagnie allemande E.ON. Il est prévu que le premier réacteur ATMEA1 soit mis en place sur le site de Sinop en Turquie.

122. En Inde, cinq réacteurs sont en construction, soit quatre réacteurs à eau lourde sous pression (RELP) évolutifs de 700 MWe et un réacteur de puissance refroidi et modéré par eau (VVER) de 1 000 MWe. Le réacteur Kudankulam-1 (VVER) a été couplé au réseau en octobre 2013 et la deuxième tranche est actuellement soumise à des essais de démarrage. Le Centre de recherche atomique Bhabha est en train de finaliser la conception d'un réacteur avancé à eau lourde (RAEL) de 300 MWe qui utilisera du combustible à l'UFE et à mélange d'oxydes (Mox) de thorium, avec de l'eau lourde comme modérateur, et intégrera des tubes de force verticaux, et des dispositifs techniques de sûreté passive.

123. Au Japon, deux réacteurs avancés à eau bouillante (RAEB) sont en construction. Hitachi-GE Nuclear Energy a mis au point des versions de classe 600 et 900 MWe du RAEB (RAEB-600 et RAEB-900) pour répondre à divers besoins. Toshiba Corporation a modifié le RAEB afin de satisfaire aux exigences des États-Unis et de l'Europe, et a dès lors mis au point un RAEB pour les premiers et un RAEB pour la seconde. Le Japon continue ses travaux de recherche-développement sur des modèles innovants de RESC.

124. En République de Corée, la construction du premier réacteur de puissance avancé, l'APR-1400, progresse comme prévu. Le processus de certification du modèle par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis est en cours, la demande ayant été soumise en octobre 2013. Parallèlement, la mise au point de l'APR+ de 1 500 MWe et de l'APR-1000 s'est poursuivie en 2013.

125. Aux États-Unis, cinq REP, dont quatre réacteurs AP1000, sont en construction. La NRC continue l'examen des demandes de certification de la conception pour le réacteur à eau bouillante simplifié économique (GE-Hitachi Nuclear Energy), l'US-EPR (AREVA NP) et l'US-APWR (Mitsubishi Heavy Industries).

126. La construction de sept réacteurs VVER, dont deux VVER-1000 et cinq VVER-1200 (NPP-2006), a continué en Fédération de Russie. Les projets de mise au point du VVER-1200A, ainsi que du VVER-600, VVER-600 (NPP-2006/2) et du VVER-1800, basés sur le modèle VVER-1200 actuel, se sont poursuivis. En outre, la Fédération de Russie a continué de travailler sur un modèle innovant de RESC, le VVER-SC, et la construction du KLT-40S, petit réacteur flottant destiné à des applications spécialisées, suit son cours.

B.1.2. Systèmes à neutrons rapides

127. Le rôle important des réacteurs à neutrons rapides et des cycles du combustible connexes pour la durabilité à long terme de l'électronucléaire est reconnu depuis longtemps. Le rapport de surgénération positif pouvant être atteint et le multirecyclage des matières fissiles à partir du combustible utilisé de réacteurs à neutrons rapides permettent d'utiliser pleinement le potentiel énergétique de l'uranium et du thorium. Cette technologie garantit un approvisionnement énergétique pour des milliers d'années et améliore considérablement la durabilité de l'électronucléaire en réduisant la quantité de déchets nucléaires de haute activité et à longue période.

128. Toutefois, l'implantation à grande échelle de réacteurs à neutrons rapides ne peut être couronnée de succès que si la recherche et le développement de la technologie créent les conditions permettant d'exploiter pleinement le potentiel des systèmes à neutrons rapides et des cycles fermés du

combustible connexes, et si les critères de compétitivité économique, de strictes prescriptions de sûreté, de développement durable et d'acceptabilité par le public sont adéquatement respectés.

129. Depuis 1960, d'importants programmes de mise au point et d'implantation de réacteurs à neutrons rapides ont été exécutés de par le monde, ce qui a permis d'atteindre un niveau de maturité élevé en ce qui concerne les connaissances liées à ces réacteurs et aux technologies connexes du cycle du combustible. La technologie de réacteurs à neutrons rapides la plus avancée est celle du réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na). Elle repose sur une expérience de 350 années-réacteur acquise lors de la conception, de la construction et de l'exploitation de RNR-Na de type d'expérimental, comme prototype, à des fins de démonstration ou pour utilisation commerciale dans divers pays comme l'Allemagne, la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon et le Royaume-Uni. La performance générale des RNR-Na a été remarquable, avec des réalisations importantes telles que la démonstration de la faisabilité de la régénération de nouveau combustible par le biais du cycle du combustible de réacteurs à neutrons rapides, l'efficacité thermique pouvant atteindre 43 à 45 %, niveau le plus élevé dans le domaine nucléaire. Une expérience indispensable a aussi été accumulée dans le déclassement de plusieurs réacteurs de ce type.

130. Quatre RNR-Na sont actuellement en service : le réacteur rapide expérimental chinois en Chine, le surgénérateur à neutrons rapides d'essai en Inde et les réacteurs BOR-60 et BN-600 en Fédération de Russie. Deux autres, les réacteurs Joyo et Monju au Japon, sont temporairement à l'arrêt. La construction de deux RNR-Na devrait être achevée en 2014 : le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe en Inde (Fig. B-1) et le réacteur commercial BN-800 de 880 MWe en Fédération de Russie.



Fig. B-1. Les travaux de construction du prototype de surgénérateur à neutrons rapides de Kalpakkam (Inde), sont bien avancés. (Photo : Centre de recherche atomique Indira Gandhi)

131. En Fédération de Russie, une certaine expérience a été acquise avec des métaux lourds liquides tels que le plomb ou l'eutectique plomb-bismuth grâce à l'exploitation de sept sous-marins nucléaires de classe Projet 705/705K équipés d'un réacteur de 155 MWth refroidi au Pb-Bi.

132. Quatre types différents de réacteurs à neutrons rapides (tableau B-1) sont actuellement mis au point au niveau national et international afin de répondre à des normes plus strictes en ce qui concerne la sûreté, la viabilité, les aspects économiques, la protection physique et la résistance à la prolifération. Il s'agit du réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), du réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb), du réacteur à neutrons rapides refroidi par gaz (RNR-G) et du réacteur rapide à sels fondus (RSF).

Tableau B-1. Modèles de réacteur à neutrons rapides

Modèle	Type	Puissance	Concepteurs
CFR-600	RNR-Na, réacteur de type piscine	600 MWe	Institut chinois de l'énergie atomique (Chine)
Astrid	RNR-Na, prototype de réacteur de type piscine	600 MWe	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, EDF, AREVA NP, Alstom, Bouygues, Comex Nucléaire, Toshiba, Jacobs, Rolls-Royce et Astrium Europe (France)
FBR-1 & 2	RNR-Na, réacteur de type piscine	500 MWe	Centre de recherche atomique Indira Gandhi (Inde)
4S	RNR-Na, petit réacteur	10 MWe	Toshiba (Japon)
JSFR	RNR-Na, réacteur de type boucle	750 MWe (moyenne puissance), 1 500 MWe (forte puissance)	Agence japonaise de l'énergie atomique (Japon)
PGSFR	RNR-Na, prototype de réacteur de type piscine	150 MWe	Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique (République de Corée)
BN-1200	RNR-Na, réacteur de type piscine	1 220 MWe	Bureau d'études pour la construction de machines (Fédération de Russie)
MBIR	RNR-Na, réacteur de recherche de type piscine	100 MWe	Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (Fédération de Russie)
PRISM	RNR-Na, réacteur de type piscine	311 MWe	GE-Hitachi (États-Unis)
TWR-P	RNR-Na, réacteur à onde progressive	600 MWe	TerraPower (États-Unis)
MYRRHA	RNR-Pb, réacteur de recherche de type piscine refroidi au plomb-bismuth	-	Centre d'étude de l'énergie nucléaire (Belgique)
CLEAR-I	RNR-Pb, réacteur de recherche de type piscine refroidi au plomb-bismuth	-	Institut de technologie pour la sûreté (Chine)
ALFRED	RNR-Pb, centrale de démonstration de type piscine refroidie au plomb	125 MWe	Ansaldo Nucleare (Europe/Italie)
ELFR	RNR-Pb, réacteur de type piscine refroidi au plomb	630 MWe	Ansaldo Nucleare (Europe/Italie)
PEACER	RNR-Pb, centrale de démonstration de type piscine refroidie au plomb-bismuth	300 MWe	Université nationale de Séoul (République de Corée)
BREST-OD-300	RNR-Pb, réacteur de type piscine refroidi au plomb	300 MWe	Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (Fédération de Russie)
SVBR-100	RNR-Pb, petit réacteur modulaire refroidi au plomb-bismuth	101 MWe	AKME Engineering (Fédération de Russie)
ELECTRA	RNR-Pb, réacteur d'entraînement refroidi au plomb	-	Institut royal de technologie (Suède)
G4M	RNR-Pb, petit réacteur modulaire refroidi au plomb-bismuth	25 MWe	Gen4 Energy Inc. (États-Unis)
ALLEGRO	RNR-G, réacteur expérimental	-	Communauté européenne de l'énergie atomique (Europe)
EM ²	RNR-G, réacteur à haute température	240 MWe	General Atomics (États-Unis)
MSFR	RSF	1 500 MWe	Centre national de la recherche scientifique (France)

B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz

133. Le Royaume-Uni exploite des réacteurs commerciaux refroidis par gaz depuis de nombreuses années. Un réacteur Magnox et 14 réacteurs avancés refroidis par gaz y sont toujours en service. Ils continuent de jouer un rôle important dans le domaine des réacteurs à haute température refroidis par gaz (RHTRG) et fournissent un appui aux exploitants ainsi qu'à de nombreuses universités techniques dans la recherche de solutions aux problèmes liés aux RHTRG. Ceux-ci se distinguent fondamentalement des réacteurs refroidis au CO₂ au Royaume-Uni par l'utilisation de particules combustibles enrobées, des températures de sortie des gaz plus élevées (≥ 750 °C) et l'utilisation de l'hélium comme caloporteur. Contrairement au Royaume-Uni, où il est en recul, le développement de la technologie des RHTRG se poursuit dans de nombreux États Membres.

134. En Chine, les premiers bétons (Fig. B-2) ont été coulés en décembre 2012 pour la construction du réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM), après la prise en compte des prescriptions de la réévaluation de la sûreté à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi. Cette centrale industrielle de démonstration de 200 MWe est composée de deux tranches de réacteur de 250 MWth, qui devraient entrer en service d'ici la fin de 2017.



Fig. B-2. Site de construction du HTR-PM dans la baie de Shidao, à Weihai (Chine). (Photo : Institut de technologie de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles)

135. La technologie chinoise de fabrication de combustible a été établie et des boulets sont soumis à des essais au niveau international pour des conditions normales et accidentelles. La construction de la nouvelle usine de fabrication de combustible de Baotou a débuté en 2013 et des essais à grande échelle des principaux composants seront effectués dans la boucle de test de 10 MW refroidie à l'hélium, qui est achevée. Le réacteur de recherche HTR-10 a fait l'objet de mises à niveau en 2013 et servira à d'autres activités d'expérience d'exploitation, de collecte des données et d'essai.

136. En Indonésie, l'Agence nationale de l'énergie nucléaire (BATAN) examine une étude de conception d'un RHTRG, qui peut valablement être implanté en dehors des îles de Java, Madura et Bali. Les activités se concentrent sur l'étude de la demande, les aspects économiques, la chaleur industrielle et la fabrication de combustible.

137. Au Japon, le réacteur d'essais techniques à haute température (HTTR) de 30 MWth est actuellement soumis à un examen réglementaire. D'autres essais de démonstration de la sûreté, comprenant la perte de refroidissement primaire par circulation forcée et la perte de refroidissement de la cuve, sont prévus pour simuler une perte totale des alimentations électriques de la centrale. En réponse à l'accident de Fukushima Daiichi, l'Agence japonaise de l'énergie atomique a entamé la conception d'un RHTRG naturellement sûr, basé entièrement sur des caractéristiques de sûreté intrinsèques, et d'un réacteur à haute température à caloporteur gaz et combustion propre pour la

combustion des surplus de plutonium au Japon. Les travaux de développement de la production d'hydrogène se poursuivent.

138. La République de Corée continue d'investir dans des installations de test d'un RHTRG pour la production d'hydrogène. Des applications de la chaleur industrielle sont aussi prévues en coopération avec des utilisateurs de cette chaleur. La mise au point de particules combustibles enrobées progresse bien et des essais d'irradiation seront effectués au réacteur avancé à haut flux neutronique.

139. Les travaux se sont poursuivis sur le projet conjoint Fédération de Russie/États-Unis de réacteur modulaire refroidi par hélium et couplé à une turbine à gaz (GT-MHR) pour neutraliser le plutonium de qualité militaire en l'utilisant pour la production d'électricité et des applications de la chaleur industrielle. Ils se concentrent sur des technologies essentielles pour le réacteur, comme le combustible, le graphite, les matériaux haute température, un système de conversion de l'énergie avec turbine à gaz et d'autres systèmes de réacteurs.

140. En Ukraine, une décision gouvernementale a autorisé l'implantation éventuelle de RHTRG, ce qui relance la recherche sur les équipements et les technologies industriels.

141. Aux États-Unis, le projet de centrale nucléaire de la prochaine génération est axé sur la qualification de combustible TRISO et la qualification de matériaux en graphite et haute température, les installations d'essai pour illustrer les caractéristiques de sûreté passive et l'élaboration du cadre d'obtention de licences. Le dernier combustible fabriqué a montré une excellente performance pendant l'irradiation à des températures d'exploitation élevées (1 250 °C) et des taux de combustion très élevés (19 % de fissions par atome métallique initialement chargé), et à des températures accidentelles pouvant aller jusqu'à 1 800 °C, témoignant d'une sûreté accrue et de marges importantes dans la conception des réacteurs et la performance du combustible. Aux États-Unis, la NRC s'est attelée à résoudre des questions en ce qui concerne l'octroi de licences, en particulier la sélection d'événements de base, la détermination du terme source, la performance fonctionnelle du confinement et la planification des interventions d'urgence.

142. L'Agence a mené deux projets de recherche coordonnée sur les RHTRG pour une meilleure compréhension du comportement de fluage sous irradiation du graphite nucléaire et pour une analyse des incertitudes relatives à la physique, à la thermohydraulique et à l'appauvrissement dans les réacteurs RHTRG.

143. Le projet de R-D de la Commission européenne sur la cogénération de chaleur et d'électricité à l'aide de réacteurs avancés à haute température vise à étendre la technologie européenne des RHTRG à l'appui de la cogénération nucléaire, en mettant l'accent sur les aspects de sûreté du circuit primaire couplé à une application industrielle. En Pologne, un projet d'étude des possibilités de construction d'un système RHTRG, parrainé par le gouvernement, a été approuvé. En Allemagne, les activités sont limitées à de la recherche spécifique sur la sûreté et à la participation aux programmes de RHTRG de la Commission européenne. Aux Pays-Bas, le Groupe de recherches et de consultations nucléaires à Petten et l'Université de technologie de Delft appuient les programmes de la Commission européenne.

144. À l'OCDE/AEN, une comparaison de codes sur des calculs transitoires de neutronique/thermique des fluides est en cours sur la conception du cœur prismatique des RHTRG pour étudier les conditions d'exploitation et d'accident comprenant des scénarios de perte de caloporteur et une pénétration d'humidité.

B.1.4. Réacteurs de faible ou moyenne puissance

145. Les réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP) sont des sources potentielles de production d'électricité pour les États Membres qui ont des communautés relativement isolées ou un réseau électrique peu développé. Ils pourraient aussi constituer une solution efficace en remplacement de sources de production d'électricité obsolètes, vieillissantes ou à forte émission de carbone, sans modification notable des infrastructures existantes. Les États Membres ont noté que le dessalement de l'eau de mer au moyen de l'énergie nucléaire a été démontré avec succès dans divers projets menés dans certains États Membres et qu'il est généralement rentable, reconnaissant dans le même temps que les aspects économiques de la mise en œuvre dépendront de facteurs propres aux sites. Les RFMP sont par ailleurs considérés comme une option technologique potentielle pour la cogénération.

146. D'après la classification adoptée par l'Agence, les réacteurs de faible puissance sont des réacteurs de puissance électrique inférieure à 300 MWe et les réacteurs de moyenne puissance des réacteurs de puissance électrique comprise entre 300 MWe et 700 MWe. Actuellement, 4 RFMP avancés sont en construction dans quatre pays : Argentine, Chine, Fédération de Russie et Inde. Des RFMP sont en train d'être mis au point dans toutes les principales filières de réacteurs, y compris les REO, les réacteurs à eau lourde (REL), les RHTRG et les réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide (RRML). La tendance de ces travaux est d'implanter des réacteurs nucléaires avancés de faible puissance en tant que centrale nucléaire multi-modules. L'approche intégrée est adoptée pour le circuit primaire de certains RFMP refroidis par eau, les composants du circuit d'alimentation en vapeur nucléaire étant installés dans une cuve commune avec le cœur du réacteur. Les progrès enregistrés dans la mise au point et l'implantation de RHTRG de faible puissance et de réacteurs à neutrons rapides refroidis par métaux lourds liquides sont examinés dans les parties correspondantes du présent document. Plusieurs pays enregistrent des progrès dans la mise au point et l'application de centrales nucléaires transportables, y compris les RFMP flottants et les RFMP immergés.

147. Quelque 45 concepts innovants de RFMP sont à différents stades de recherche-développement. Certains des modèles de RFMP refroidis par eau mis au point en vue d'une implantation à court terme sont décrits dans les paragraphes suivants.

148. En Argentine, l'implantation du réacteur CAREM, un modèle de REO sous pression de type intégré de faible puissance, où tous les composants du circuit primaire sont à l'intérieur de la cuve du réacteur et dont la production électrique est de 150 à 300 MWe, a débuté. Les travaux de terrassement du site pour le prototype de centrale CAREM-25 de 27 MWe sont déjà achevés. Le gouvernement a octroyé la licence de construction du CAREM-25 en octobre 2013. Le premier coulage de béton est prévu pour le premier trimestre de 2014.

149. La Chine a mis au point des REP de 300 MWe et 600 MWe. Plusieurs tranches ont déjà été installées, et trois tranches CNP-600 sont en construction. Le Pakistan a également installé deux tranches CNP-300 en provenance de Chine et deux tranches CNP-300 supplémentaires sont en construction. De plus, la CNNC a mis au point l'ACP-100, un RFMP de type REP intégré avec des pompes montées horizontalement dans la cuve du réacteur, qui génère une puissance de 100 MWe. La Chine prévoit de construire deux tranches ACP-100 dans la province du Fujian pour la production d'électricité et le dessalement d'eau de mer. L'Institut de recherche et de conception en ingénierie nucléaire de Shanghai a mis au point le CAP-150, un réacteur avancé de faible puissance de 150 MWe doté de dispositifs de sûreté passive, et le CAP-FNPP, un RFMP flottant de 200 MWth.

150. En France, DCNS met au point Flexblue, un réacteur modulaire transportable de faible puissance (160 MWe). Fonctionnant au fond des mers, ce réacteur refroidi par eau utilise des technologies nucléaires navales, offshore et passives pour tirer profit de la mer, en tant que source froide infinie et disponible en permanence.

151. En Inde, de nombreux REL de 220 MWe, 540 MWe et 700 MWe sont en service ou en construction. Le RAEL de 304 MWe, mis au point par le Centre de recherche atomique Bhabha (BARC), en est à la phase de conception détaillée.

152. En Italie, l'Université polytechnique de Milan poursuit l'élaboration du concept du réacteur international innovant et sécurisé (IRIS), qui avait été auparavant mis au point par un consortium international dirigé par Westinghouse Corporation. IRIS est un REO avec circuit primaire modulaire intégré, qui produit une puissance électrique moyenne (335 MWe). Ce concept de réacteur est élaboré pour répondre aux exigences de sûreté renforcée, de facteurs économiques améliorés, de résistance à la prolifération et de réduction du volume des déchets.

153. Au Japon, un REO de moyenne puissance (350 MWe) avec circuit primaire intégré, appelé réacteur modulaire intégré (RMI), a été mis au point. Des tests de validation, des travaux de recherche-développement sur les composants et les méthodes de conception, et la mise au point d'un modèle de base sont en cours pour faciliter l'octroi de la licence. Le RMI est conçu pour assurer à la fois la production d'électricité et la cogénération.

154. La République de Corée a mis au point le modèle de réacteur avancé modulaire intégré (SMART), d'une capacité thermique de 330 MWth. Le SMART est destiné à être utilisé à la fois pour la production d'électricité et le dessalement de l'eau de mer. Un projet d'étude de centrale pilote a été lancé en vue d'une vérification complète de la performance. Le SMART de 100 MWe a obtenu un agrément du modèle type de la Commission de la sûreté et de la sécurité nucléaires en juillet 2012 et est actuellement en phase de préparation en vue de la construction de la première centrale de ce type.

155. La Fédération de Russie finalise la construction d'une centrale nucléaire flottante comptant deux réacteurs KLT40S de 35 MWe qui sont destinés à la cogénération d'électricité et de chaleur industrielle. Le type KLT-40S est basé sur le modèle commercial du réacteur à propulsion marine KLT40 et est une variante avancée du réacteur qui alimente les brise-glaces nucléaires. Le réacteur ABV-6M de 8,6 MWe en est au stade de conception détaillée. Il s'agit d'un REO sous pression de type intégré à circulation naturelle du caloporteur primaire. Le réacteur RITM-200 de 50 MWe, actuellement au stade de conception détaillée, est un réacteur de type intégré à circulation forcée destiné aux brise-glaces nucléaires.

156. Aux États-Unis, quatre REO de type intégré sont à l'étude. Le réacteur B&W mPower est un modèle de centrale bimodulaire de 180 MWe par module. NuScale Power envisage la conception d'une centrale nucléaire composée de 12 modules de 45 MWe. Le RFMP de Westinghouse est un modèle conceptuel de 225 MWe qui comporte des systèmes de sûreté passive et des composants éprouvés de l'AP1000. Le Holtec SMR-160 est un réacteur de 160 MWe qui fonctionne en convection naturelle et ne nécessite donc ni pompe de refroidissement, ni source d'alimentation électrique externe. Les demandes d'examen de la certification des quatre concepts devraient être transmises à la NRC dans le courant de 2014-2016.

157. En 2012, l'Agence a publié la brochure *Status of Small and Medium Sized Reactor Designs*¹⁵ en complément de son Système d'information sur les réacteurs avancés (ARIS). Le tableau B.2 répertorie les modèles de RFMP refroidis par eau qui seront disponibles à court et moyen terme.

¹⁵ Disponible à l'adresse : <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/smr-status-sep-2012.pdf>

Tableau B-2. Modèles de RFMP refroidis par eau qui seront disponibles à court et moyen terme.

Modèle	Type	Capacité nette (MWe)	Concepteurs	Situation
CAREM-25	REP intégré, circulation naturelle	27	Commission nationale de l'énergie atomique (Argentine)	Un prototype de tranche en construction
CNP-300	REP à double boucle	315	CNNC (Chine)	Trois tranches en service, deux en construction
ACP-100	REP intégré	100	Compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) (Chine)	Conception détaillée
CAP-150	REP intégré	150	SNERDI (Chine)	Étude de conception
Flexblue	Petit réacteur modulaire amarré sur les fonds marins	160	DCNS (France)	Étude de conception
AHWR300-LEU	Tube de force	304	Centre de recherche atomique Bhabha (Inde)	Conception détaillée
IMR	REP modulaire intégré, circulation naturelle	335	Mitsubishi Heavy Industries Ltd. (Japon)	Étude de conception
SMART	REP intégré	100	Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique (République de Corée)	Agrément du modèle type accordé en juillet 2012
ABV-6M	REP intégré, circulation naturelle	8,6	Bureau d'études pour la construction de machines (OKBM) (Fédération de Russie)	Conception détaillée
VBER-300	REP intégré	325	OKBM (Fédération de Russie)	Conception détaillée
RITM-200	REP intégré	50	OKBM (Fédération de Russie)	Conception détaillée
KLT-40S	Centrale nucléaire flottante montée sur barge	70	OKBM (Fédération de Russie)	2 tranches en phase finale de construction
WWER-300	REP intégré	300	Gidropress (Fédération de Russie)	Conception détaillée
VK-300	REB	250	Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (Fédération de Russie)	Étude de conception
UNITHERM	REP intégré de très faible puissance, avec circulation naturelle	2,5	Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (Fédération de Russie)	Étude de conception
Shelf	Petit réacteur modulaire amarré sur les fonds marins	6	Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (Fédération de Russie)	Étude de conception

Modèle	Type	Capacité nette (MWe)	Concepteurs	Situation
IRIS	REP intégré	335	Consortium international IRIS (Italie)	Étude de conception
B&W mPower	REP intégré (double module de 180 MWe)	360	B&W Generation mPower (États-Unis)	Conception détaillée
NuScale	REP intégré à circulation naturelle (12 modules de 45 MWe)	45	NuScale Power (États-Unis)	Conception détaillée
Westinghouse SMR	REP intégré	225	Westinghouse Electric Corporation (États-Unis)	Conception détaillée
Holtec SMR-160	REP intégré	160	Holtec Corporation (États-Unis)	Conception détaillée

B.1.5. Initiatives internationales sur les systèmes nucléaires innovants

158. En raison de préoccupations grandissantes quant à la disponibilité des ressources énergétiques, au changement climatique et à la sécurité énergétique, et étant donné que l'énergie nucléaire pourrait apporter une importante contribution à la satisfaction de la demande énergétique croissante dans le monde, plusieurs initiatives internationales ont été lancées ces dernières décennies sur des systèmes d'énergie nucléaire innovants.

159. En particulier, certains États Membres de l'Agence ont reconnu à la fin du siècle dernier la nécessité de prendre des mesures pour veiller au développement durable de l'énergie nucléaire. En conséquence, le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) a été créé en 2000 comme projet de l'Agence, à la suite d'une résolution de la Conférence générale, pour veiller à ce que l'énergie nucléaire puisse contribuer à répondre durablement aux besoins énergétiques mondiaux du XXI^e siècle. Le principal objectif était de rassembler les détenteurs et les utilisateurs de la technologie pour qu'ils envisagent conjointement les mesures internationales et nationales requises pour réaliser les innovations souhaitées dans les domaines des réacteurs nucléaires et des cycles du combustible. Le Groupe de l'INPRO est financé principalement par les 38 États Membres et la CE, qui en sont membres. Le Kenya est le 39^e membre de l'INPRO depuis 2013.

160. L'INPRO est en train de revoir sa méthodologie, qui consiste en une approche holistique pour évaluer les systèmes nucléaires innovants dans les sept domaines suivants : aspects économiques, infrastructures, gestion des déchets, résistance à la prolifération, protection physique, environnement et sûreté. Le Bélarus a achevé une évaluation des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) sur la base de cette méthodologie, et le rapport y relatif a été publié par l'Agence comme document de référence pour les États Membres. Des NESA sont en cours en Indonésie, en Roumanie et en Ukraine.

161. Le Forum international Génération IV (GIF) est une initiative de coopération internationale organisée pour effectuer les travaux de recherche-développement nécessaires pour déterminer la faisabilité et les capacités de performance de la prochaine génération de systèmes d'énergie nucléaire. Fort de 13 membres, il se concentre sur six systèmes d'énergie nucléaire, ainsi que le décrit le

document *Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*¹⁶ publié en 2002 : RNR-G, réacteurs à très haute température (RTHT), RESC, RNR-Na, RNR-Pb et réacteurs à sels fondus (RSF).

162. Les membres du GIF intéressés par la mise en œuvre d'une coopération en R-D sur un ou plusieurs des systèmes sélectionnés ont signé des arrangements-système correspondants. Dans chaque arrangement, un nombre limité de projets de R-D communs a été établi, avec des résultats, des étapes et des échéances bien définis, et dans un cadre contractuel clairement déterminé.

163. Le GIF et 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 et la protection physique, le risque et la sûreté, ainsi que la simulation avancée.

164. Une autre activité importante lancée en 2011 par le GIF en coopération avec l'Agence dans le domaine des RNR-Na est l'élaboration de critères de conception de la sûreté, l'objectif étant d'harmoniser les prescriptions de sûreté entre les organismes de conception représentés au sein du GIF, et de quantifier le niveau de sûreté élevé attendu pour les systèmes de RNR-Na de quatrième génération. La première phase d'un rapport sur les critères de conception de la sûreté a été publié par le GIF en 2013 et est actuellement examiné par l'AIEA, l'OCDE/AEN, le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP) et certains organismes de réglementation d'États membres du GIF. La deuxième phase de ce rapport quantifiera les critères de conception et comprendra l'élaboration de principes directeurs détaillés pour la mise en œuvre des critères généraux.

165. Le champ d'activité du GIF couvre les phases de faisabilité et de performance de la R-D, mais pas sa phase de démonstration. Les prototypes ne font donc pas partie des prérogatives du Forum.

166. La plate-forme technologique pour une énergie nucléaire durable (SNETP) a été officiellement lancée dans l'Union européenne en 2007 pour promouvoir la recherche, le développement et la démonstration des technologies de fission nucléaire nécessaires à la réalisation du Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (Plan SET).

167. La SNETP regroupe aujourd'hui 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. Les activités sont axées sur le maintien de la sûreté et de la compétitivité dans la technologie de la fission, la fourniture de solutions de gestion des déchets à long terme pour 2020, la finalisation de la démonstration d'une nouvelle génération de réacteurs de fission plus durables, et l'élargissement des applications de la fission nucléaire au-delà de la production d'électricité d'ici 2050.

168. 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 de réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération, ainsi que des infrastructures de recherche, des installations de combustible et des travaux de R-D à l'appui de ces technologies. Son travail est axé sur l'élaboration 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 ; et une technologie alternative - un réacteur à neutrons rapides refroidi soit au plomb, soit par gaz - avec la construction, pour démontrer cette technologie, d'un réacteur expérimental dans un autre pays européen disposé à accueillir le programme.

¹⁶ Disponible à l'adresse : <http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf>

B.1.6. Cogénération pour les applications non électriques de l'énergie nucléaire

169. Le couplage de réacteurs nucléaires à des applications industrielles, à savoir la cogénération nucléaire, présente plusieurs avantages pratiques comme la réalisation d'économies par la réutilisation de la chaleur résiduelle des centrales nucléaires, l'augmentation de l'efficacité thermique globale de la centrale, le renforcement de la souplesse du réseau électrique et la réduction des émissions de GES et de leur impact sur l'environnement. En général, tous les réacteurs nucléaires peuvent servir à des applications non électriques. Le processus de cogénération peut différer en fonction de la technologie, du type de réacteur, du type de combustible et du niveau de température. Une partie de la chaleur habituellement rejetée dans l'environnement peut servir au dessalement et au chauffage urbain comme cycle aval. En conséquence, le rendement thermique total peut être accru jusqu'à 70-80 %, contre quelque 33 % pour les REO existants. Les REO, les RESC et les RRML sont tous potentiellement appropriés pour la cogénération avec les applications de production de chaleur industrielle à basse température comme les systèmes de chauffage urbain et de dessalement. Les réacteurs à haute température, à savoir les RHTRG, les RNRRG et les RSF sont plus adaptés à une cogénération avec production de chaleur industrielle à haute température et d'hydrogène. L'approche du cycle indirect est considérée comme appropriée pour tous les réacteurs (voir la figure B-3).

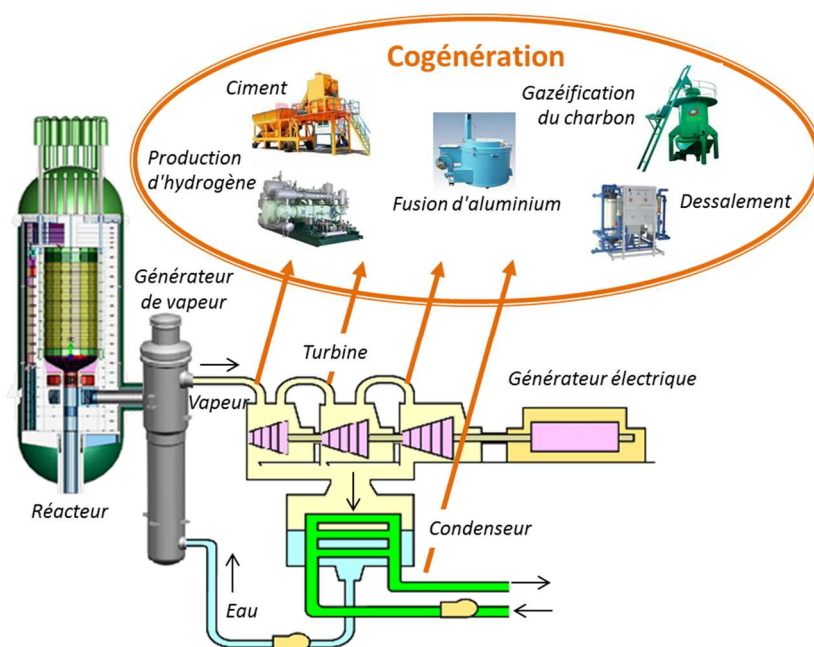


Fig. B-3 Représentation schématique de la cogénération.

170. La cogénération constitue une option idéale pour de nombreuses applications qui sont de grandes consommatrices d'énergie, comme la synthèse de combustible (y compris la production d'hydrogène), la gazéification du charbon et l'extraction du pétrole. L'énergie nucléaire peut représenter une option importante pour répondre au potentiel du marché de la cogénération. Dans la gamme des basses températures, le chauffage urbain (80-150 °C) et le dessalement de l'eau de mer (65-120 °C) sont les applications les plus évidentes. Dans celle des températures moyennes, il existe un grand nombre d'applications de la chaleur comme le raffinage du pétrole et le traitement de schiste et de sable bitumineux. La chaleur aux températures élevées est généralement demandée en pétrochimie, en sidérurgie et dans la production d'hydrogène.

171. La viabilité technique et commerciale des REO a été démontrée dans de nombreuses centrales en service dans divers pays depuis plus de 30 ans. En Bulgarie, en Fédération de Russie, en Hongrie, en Slovaquie, en Suisse et en Ukraine, où le chauffage urbain est pratique courante dans les centrales utilisant des combustibles fossiles, de tels systèmes de chauffage sont aussi couplés à des centrales

nucléaires. La puissance calorifique de ces centrales nucléaires varie entre 20 et 250 MWth, ce qui constitue généralement une fraction minimale de la puissance thermique totale du réacteur. L'eau ou la vapeur destinée au chauffage urbain est portée à 130-150 °C au moyen de vapeur provenant de la turbine.

172. Le dessalement a été effectué par cogénération avec des centrales REO aux États-Unis et au Japon et avec le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium BN-350, situé au Kazakhstan. Au Japon, toutes les centrales nucléaires sont situées en bord de mer. Plusieurs centrales exploitées par les sociétés Kansai Electric Power, Kyushu Electric Power et Shikoku Electric Power ont des systèmes de dessalement de l'eau de mer qui utilisent la chaleur et/ou l'électricité qu'elles dégagent pour faire tourner des systèmes d'appoint d'eau d'alimentation destinés aux générateurs de vapeur et à l'approvisionnement du site en eau potable. Des processus de dessalement par distillation à effets multiples, distillation multistage et osmose inverse (OI) ont été utilisés. Les capacités de dessalement varient d'environ 1 000 à 3 000 m³ par jour selon les centrales.

173. La cogénération pour des applications industrielles a été démontrée par la centrale nucléaire de Stade (Allemagne), d'une puissance de 1 892 MWth et 640 MWe, qui fournissait de la vapeur à une raffinerie de sel située à 1,5 km. L'approvisionnement en vapeur par la centrale présentait une très grande disponibilité dans le temps, avec une bonne expérience d'exploitation entre 1983 et 2003. Le REP de 970 MWe de la centrale de Gösigen (Suisse), qui alimente en vapeur industrielle depuis 1979 une usine de fabrication de cartons située à proximité, en est une autre illustration. La vapeur industrielle est générée dans un circuit tertiaire par de la vapeur vive provenant du REP. Elle est ensuite acheminée par des canalisations jusqu'à l'usine sur une distance de 1,75 km. La centrale de Beznau, également en Suisse, qui compte deux tranches REP de 365 MWe, est aussi utilisée pour le chauffage urbain.

174. La cogénération a également été démontrée au moyen de réacteurs CANDU. Ainsi, la centrale nucléaire de Bruce (Canada) fournit de la chaleur destinée à la production d'eau lourde en même temps que de l'électricité depuis deux décennies. En 2008, une usine de dessalement d'une capacité de 6 300 m³ par jour a été couplée à la centrale nucléaire de Madras, à Kalpakkam (Inde). Le processus hybride de dessalement combine la distillation multistage et l'osmose inverse. Le mélange d'eau qui en résulte est utilisé à des fins industrielles/urbaines. L'utilisation d'un MWe d'énergie thermoélectrique peut permettre de produire 1 500 m³ d'eau par jour par distillation flash et 1 800 m³ par jour par osmose inverse. Par conséquent, après la mise en conformité, il serait possible d'atteindre une production de 6 300 m³ d'eau par jour en réduisant la production électrique d'environ 4 MW. En 2010, la centrale nucléaire de cogénération la plus moderne du monde a été mise en service par le Pakistan. Il s'agit d'un autre projet de mise en conformité, couplant cette fois une unité de distillation à effets multiples (MED) à la centrale nucléaire existante de Karachi, un REL CANDU de 125 MWe. L'usine de dessalement, qui a été achevée, produit 1 600 m³ par jour à partir de l'eau de mer. Le même site exploitait une usine d'OI de 454 m³ par jour en vue de la production d'eau pour des besoins internes.

175. Tous les réacteurs à haute température conviennent à la cogénération. Comme le montre le tableau B-3, les concepts de réacteurs refroidis par gaz comme le réacteur à lit de boulets (PBMR), le réacteur modulaire prismatique et le RNR-G, peuvent permettre de produire de la chaleur pour des processus industriels et la production d'hydrogène. Afin d'en tirer parti, l'UE a lancé l'initiative industrielle de cogénération nucléaire (NCI2). De plus, le système RTHT est considéré comme le plus approprié pour la production d'hydrogène à grande échelle. La cogénération de chaleur et d'électricité en fait une source de chaleur attrayante pour les grands complexes industriels. Il pourrait être implanté dans des raffineries et des industries pétrochimiques afin de remplacer d'autres sources pour la production de grandes quantités de chaleur industrielle à différentes températures, y compris pour la production d'hydrogène en vue de la valorisation du pétrole brut lourd et du pétrole brut aigre.

Tableau B-3. Potentiel des systèmes de réacteurs refroidis par gaz de quatrième génération les plus prometteurs pour les applications de produits énergétiques

Réacteur	PBMR	Réacteur modulaire prismatique	RNR-G	RTHT
Puissance thermique (MWth)	250	600	600	600
Puissance électrique (MWe)	110	286	288	300-360
Température de sortie (°C)	850	850	850	950-1300
Pression d'alimentation (MPa)	7,75	7,07	7	6,8-8
Production d'hydrogène	oui	oui	oui	oui
Dessalement de l'eau de mer	oui	oui	oui	oui
Chaleur industrielle à haute température (raffineries de pétrole, désulfuration de pétrole lourd)	oui	oui	oui	oui
Chauffage urbain	oui	oui	oui	oui

176. Les centrales de cogénération présenteront des avantages supplémentaires si elles sont co-implantées car elles peuvent alors partager de nombreux services collectifs et infrastructures traditionnels, ce qui réduira par conséquent les frais et l'utilisation des terres. D'une manière générale, une attention accrue est donnée aux aspects de sûreté réalisés par le couplage de la centrale nucléaire à l'unité de cogénération lorsqu'une boucle intermédiaire est envisagée.

B.2. Fusion nucléaire

177. Développer la science, l'ingénierie et la technologie de fusion nucléaire jusqu'à pouvoir fournir au réseau électrique de l'énergie de fusion est un des défis les plus exaltants, et peut-être des plus gratifiants, du XXI^e siècle.

178. Avec le lancement du projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) en 2006, plusieurs pays ont associé leurs efforts pour démontrer la faisabilité scientifique et technologique et les dispositifs de sûreté de l'énergie de fusion de plus de 500 MW à des fins pacifiques.

179. Le 10 novembre 2012, le gouvernement français a promulgué le décret 2012-1248 autorisant la création de l'installation nucléaire ITER, ce qui a représenté une étape importante pour ce projet et pour le programme mondial de développement de la fusion. Les travaux de construction progressent sur le site d'ITER et le nouveau siège est en service en octobre 2012. « L'itinéraire spécial » de 104 km permettant le transport de composants volumineux du port de Marseille au site d'ITER est aussi achevé et a été testé avec succès en septembre 2013 avec un convoi composé d'une remorque de 800 tonnes présentant les mêmes dimensions que les composants les plus volumineux et les plus lourds d'ITER (voir la figure B-4). Cet essai couronné de succès ouvre la voie au transport des véritables composants d'ITER, qui débutera à l'été 2014.



Fig. B-4. Le site d'ITER en septembre 2013 (à gauche). La remorque de 800 tonnes, tractée par un véhicule téléguidé, reproduisant le poids et les dimensions des charges les plus volumineuses d'ITER (10 m de haut, 33 m de long, 9 m de large), a avancé à une vitesse moyenne de 5 km/h pendant quatre nuits consécutives pour tester l'itinéraire spécial de 104 km (à droite). (Photos : ITER)

180. Au 21 novembre 2013, soit sept ans jour pour jour après la signature de l'accord ITER à Paris, tous les principaux contrats relatifs aux travaux civils sur site ont été signés, ce qui constitue une étape cruciale pour le projet, et la fabrication des composants clés progressait de manière continue dans les diverses industries. Ceux-ci comprennent des composants critiques comme des bobines supraconductrices, la chambre à vide et le cryostat. En 2013, quelque 500 travailleurs du secteur de la construction étaient à l'œuvre sur le site d'ITER. Ce nombre sera porté à 3 000 au plus fort de la construction en 2014-2015. Le calendrier général actuel prévoit que les machines seront achevées et que l'exploitation du premier plasma aura lieu en novembre 2020. En novembre 2013, une décision importante, qui permettra des économies pour le projet, a été prise : l'exploitation débutera avec un écorceur (la zone d'évacuation de l'énergie dégagée du plasma dans un dispositif de fusion à confinement magnétique) entièrement en tungstène plutôt qu'avec un écorceur en fibre de carbone, qu'il aurait fallu remplacer par un modèle en tungstène au cours de la deuxième phase d'exploitation.

181. Avec la construction en cours d'ITER, le programme mondial sur la fusion par confinement magnétique s'oriente de plus en plus vers la production d'énergie de fusion à l'échelle industrielle d'une centrale de puissance. De nombreux pays élaborent, de manière indépendante, des plans à cet égard et lancent de nouvelles activités de R-D visant à démontrer que l'énergie de fusion peut être commercialisée. De manière collective, ces plans et activités comprennent un programme de centrale de démonstration à fusion (DEMO), même s'il n'y a pas de point de vue unique ou coordonné sur la feuille de route concernant la démonstration de la production d'électricité à partir de la fusion.

182. Il est de l'intérêt de tous de résoudre les questions scientifiques et techniques et les exigences d'installation relatives à DEMO, même si les États ont des orientations et des priorités différentes. L'Agence a mis en place en 2012 plusieurs ateliers annuels sur le programme DEMO afin de faciliter la coopération internationale en ce qui concerne la définition et la coordination des activités. Dès la fin de la 24^e conférence sur l'énergie de fusion de l'AIEA, qui s'est tenue à San Diego (États-Unis), le premier atelier de l'Agence consacré au programme DEMO a été organisé en octobre 2012 à l'Université de Californie, à Los Angeles. Il est ressorti des discussions tenues à cette occasion que la feuille de route d'ITER devait comprendre à la fois les installations intégrées de fusion nucléaire et les installations d'irradiation des matériaux de fusion. Les travaux de planification de certaines de ces installations majeures sont actuellement en cours. La feuille de route et les modes de collaboration optimaux seront définis par les initiatives prises par les parties en vue de la construction et de l'exploitation de ces installations de grande envergure.

183. Ainsi, une feuille de route officielle en vue de la réalisation de l'énergie de fusion a récemment été publiée dans le cadre de l'Accord européen pour le développement de la fusion¹⁷. Cette feuille de route divise le programme en huit missions. Pour chaque mission, elle examine l'état actuel de la recherche, détermine les questions en suspens, propose un programme de recherche-développement et estime les ressources nécessaires. Elle souligne la nécessité d'intensifier la participation des industries et de rechercher toutes les possibilités de collaboration hors d'Europe. Selon cette feuille de route, une centrale à fusion DEMO devrait commencer la production nette d'électricité pour le réseau à hauteur de quelques centaines de mégawatts au début des années 2040, ce qui constituera une étape vers la création d'une centrale à fusion commerciale en Europe. L'évolution du programme de fusion européen d'une approche axée sur la science vers une approche tournée vers les industries et la technologie s'appuie sur le remplacement, dès janvier 2014, de l'Accord européen pour le développement de la fusion par le nouveau consortium EUROfusion. Cette nouvelle organisation aura une approche orientée sur les projets et appuiera les missions définies dans la feuille de route, la recherche dans les processus fondamentaux du plasma et la préparation de la prochaine génération de scientifiques d'ITER. Des initiatives de feuilles de route similaires font progressivement leur apparition dans d'autres pays participant à ITER.

184. Lors du deuxième atelier de l'Agence consacré au programme DEMO, organisé en décembre 2013 au siège de celle-ci, les débats ont tourné autour de trois thèmes majeurs : les codes de conception techniques de la physique de fusion, le contrôle de la dissipation de la puissance dégagée par le plasma et des impuretés liées à celui-ci ainsi que les scénarios et le contrôle du plasma.

185. L'installation nationale d'ignition (NIF) du Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis) utilise un modèle de confinement inertiel faisant appel à des lasers de forte puissance pour provoquer des réactions de fusion, l'objectif étant d'obtenir un gain énergétique important consécutif par le chauffage et la compression d'une pastille cryogénique de deutérium-tritium. En 2013, la NIF a satisfait à bon nombre d'exigences considérées comme nécessaires pour atteindre l'ignition, qui est le point auquel la réaction dégage autant d'énergie que celle qui a été fournie à tout le système : intensité de rayons X suffisante dans la hohlraum, apport précis d'énergie sur la cible et niveaux de compression souhaités. Toutefois, il demeure au moins un obstacle majeur à franchir, la désintégration prématurée de la capsule renfermant le mélange combustible.

186. La 25^e conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, qui constitue le principal événement dans ce domaine, aura lieu à Saint-Petersbourg (Fédération de Russie), en octobre 2014.

C. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

C.1. Accélérateurs

187. Le développement des accélérateurs est un domaine qui évolue rapidement, permettant des applications innovantes qui présentent un impact sociétal. À ce jour, il porte sur deux grands paramètres intervenant dans la définition de la forme et de la longueur d'un accélérateur : le champ magnétique maximum pouvant être appliqué à un faisceau de particules accélérées et le gradient d'accélération maximum que peut atteindre la machine. Aujourd'hui, le plus grand champ magnétique atteignable est d'environ 20 teslas, si des supraconducteurs sont utilisés. Des progrès devraient être accomplis avec l'apparition de nouveaux supraconducteurs à haute température pouvant permettre

¹⁷ <http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

d'atteindre des champs allant jusqu'à 30 tesla. Une telle hausse de l'intensité du champ magnétique est certainement une grande avancée mais ne peut toutefois être considérée comme une percée dans le domaine de la R-D sur les accélérateurs. En revanche, un tournant a été franchi avec les très hauts gradients d'accélération atteints récemment : au lieu des 20-50 MeV/m qu'un accélérateur classique peut atteindre, un accélérateur à champ de sillage dans un plasma peut accélérer un faisceau d'électrons jusqu'à 200 GeV sur la même distance. Dans un accélérateur de ce type, un faisceau d'électrons de faible énergie et de haute intensité (ou une impulsion laser courte et intense) excite le plasma, formé par l'ionisation d'un gaz par laser ou l'ionisation de champ induite par un paquet d'électrons entrant. Le principe de fonctionnement est présenté dans la figure C-1:

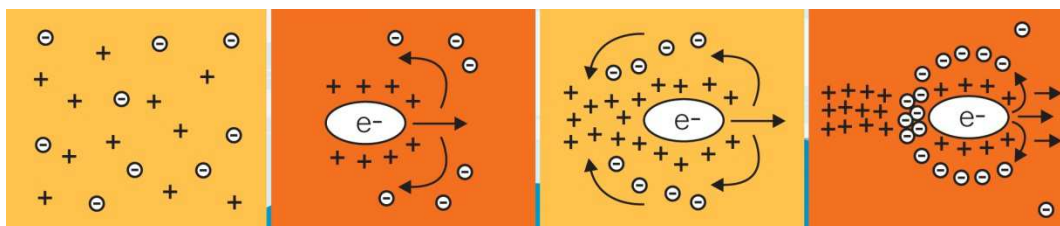


Fig. C-1. De gauche à droite : a) Des ions positifs et des électrons libres forment un plasma, b) un paquet d'électrons entre dans le plasma et repousse tous les électrons libres. Les ions positifs sont attirés autour du paquet, c) les électrons libres déjà déplacés sont alors attirés vers les ions positifs restés à l'arrière du paquet, d) les électrons libres repositionnés derrière le paquet donnent une accélération à ce dernier.

188. Les accélérateurs à plasma ont un vaste potentiel de production de faisceaux d'électrons puissants sur une très petite portion de l'espace nécessaire pour les accélérateurs classiques. La réduction possible de la longueur de ces appareils ainsi que la baisse correspondante du coût pourraient permettre la mise au point d'accélérateurs à plasma laser « sur table » dans le futur. Comme il a été démontré au Laboratoire national Lawrence Berkeley, une impulsion laser dans un tube capillaire d'une taille inférieure à la paume d'une main contenant du plasma d'hydrogène permet de créer un champ de sillage pouvant accélérer un faisceau d'électrons à 1 milliard d'eV sur seulement 3,3 cm.

189. La lumière synchrotron est produite par des électrons circulant dans un anneau à une vitesse proche de celle de la lumière. Les électrons sont déviés par le champ magnétique d'aimants de courbure répartis sur toute la circonférence de l'anneau. La lumière synchrotron est une lumière brillante dont la gamme va de l'infrarouge et l'ultraviolet aux rayons X. Les faisceaux de lumière sont émis tangentiellement à la trajectoire des électrons et se dirigent directement vers les lignes de lumière, qui sont des dispositifs constitués d'une série de cabines. La première cabine comprend des dispositifs tels que fentes, filtres, miroirs et monochromateurs.

190. Le rayonnement synchrotron permet l'étude des détails structurels de la matière, en particulier à une échelle comparable à l'échelle des atomes. Les méthodes d'analyse basées sur la lumière synchrotron peuvent fournir des informations sur la structure spatiale de matériaux, la structure chimique et électronique, la microstructure, et les propriétés de surfaces, d'interfaces, de couches minces et de couches multiples. Le rayonnement synchrotron peut être utilisé pour obtenir des images de coupe transversale de la matière afin d'en analyser le comportement à des intervalles se mesurant en nanosecondes. Il s'agit donc d'un outil indispensable pour la recherche appliquée dans des domaines très divers comme la mise au point de nouveaux matériaux présentant un intérêt pour les nanotechnologies, l'électronique et les communications, la production et le stockage d'énergie, la médecine et les soins de santé, le transport et l'environnement.

191. Les accélérateurs sont aussi utilisés pour produire des radio-isotopes tels que le fluor 18, le cuivre 64 et le carbone 11. Un projet de recherche coordonné de l'AIEA, lancé en 2011, porte sur la

production directe en cyclotron de molybdène 99 (^{99}Mo), isotope médical essentiel, et de son produit de filiation, le technétium 99m (Tc-99m). À la différence du processus ordinaire de production de ^{99}Mo dans un réacteur à l'aide de cibles à l'uranium, ces technologies utilisent des cibles au Mo-100. Un accélérateur linéaire peut être utilisé pour produire du ^{99}Mo par transmutation de Mo-100 enrichi tandis que les cyclotrons peuvent être utilisés pour produire directement du Tc-99m en irradiant du Mo-100.

192. Le programme du Canada dans ce domaine est conduit par l'Université d'Alberta (cyclotron), le laboratoire TRIUMF (cyclotron) et le groupe Prairie Isotope Production Enterprise (accélérateur linéaire). Des activités sont en cours pour démontrer la capacité de production d'isotopes en quantités commerciales, et le laboratoire TRIUMF a récemment annoncé une capacité suffisante pour l'approvisionnement de 10 à 20 services hospitaliers de médecine nucléaire. Un avantage environnemental et économique important de ces deux technologies est qu'elles produisent peu de déchets et des projets ont démontré une efficacité de l'ordre de 90 % en ce qui concerne le recyclage de Mo-100. Des travaux sont en cours pour répondre aux prescriptions réglementaires et relever les défis techniques et commerciaux qui subsistent.

193. Dans le cadre de programmes et d'activités spécifiques, le Laboratoire de la spectrométrie et des applications nucléaires de l'Agence (NSAL) soutient le développement de techniques de laboratoire et de spectrométrie X basée sur les accélérateurs pour des applications interdisciplinaires et pour la recherche fondamentale. Sur la base d'un projet de recherche-développement lancé en 2011 par le NSAL, l'Agence et l'installation Elettra en Italie ont signé en 2013 un contrat pour la construction et l'exploitation d'une nouvelle ligne de faisceaux à fluorescence X. La nouvelle station expérimentale fournie par l'Agence y a été installée au dernier trimestre de 2013. Elle permettra aux États Membres de recevoir une formation pratique aux techniques de spectrométrie X avancées telles que la fluorescence X, la fluorescence X à réflexion totale et la fluorescence X en incidence rasante/fluorescence X à émission rasante, ainsi qu'à la réflectivité des rayons X et la spectroscopie d'absorption des rayons X, et aux méthodes de développement des activités de recherche et programmes d'études universitaires pertinents.

194. À cette fin, un projet de recherche coordonnée a déjà été lancé en 2013 pour accroître la qualité et la compétitivité des travaux de recherche des États Membres sur les méthodes de spectrométrie X basée sur le rayonnement synchrotron en soutenant une formation pratique avancée, en guidant des travaux expérimentaux et en conduisant des activités de recherche au poste final de l'enceinte sous ultra-vide (Fig. C-2) de la ligne de faisceaux à fluorescence X d'Elettra.

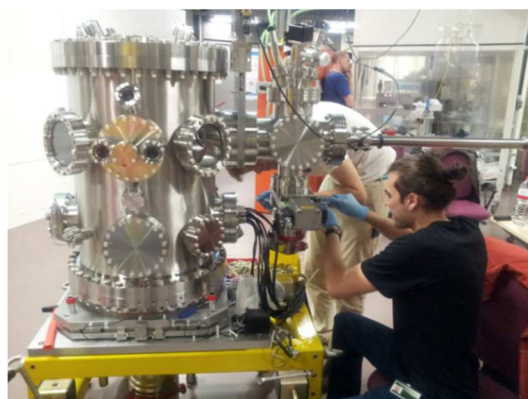


Fig. C-2. Assemblage du poste final de l'enceinte sous ultra-vide.

195. Lors de la caractérisation d'objets anciens, les dommages causés par les rayonnements préoccupent à la fois les scientifiques, les conservateurs, les restaurateurs et les archéologues. La dose élevée délivrée entraîne un risque de dégradation de la matière analysée. Les dommages peuvent

parfois être visibles à l'œil nu, comme la formation de centres de couleurs dans le verre ou le brunissement de composés organiques. Même sans conséquences visuelles directes sur l'échantillon ou l'objet, la perte potentielle d'informations, ou plus grave encore, l'extraction d'informations faussées ou trompeuses à partir d'une zone endommagée par les rayonnements constituent un risque majeur pour l'analyse.

196. Aujourd'hui, il existe quelques études systématiques de la décoloration due à l'analyse par faisceaux d'ions du papier, dont par exemple une faisant état du marquage de deux types de papier de chiffon vieillis artificiellement (l'un avec une couche de fond blanche et l'autre sans couche de fond), par exposition à des protons d'une énergie de l'ordre des MeV dans différentes conditions¹⁸. La figure C-3, extraite de cette étude, présente un ensemble caractéristique d'observations. Les auteurs ont conclu que, si les conditions de l'exposition sont maintenues en-dessous d'un certain seuil, aucun marquage visible n'est observé, même après un processus de reproduction des cycles d'humidité et de température destiné à simuler un vieillissement d'une centaine d'années.

197. Les dommages causés par les rayonnements aux matériaux du patrimoine culturel sont un facteur important de vieillissement et de dégradation. Toutefois, un processus semblable survient lorsque des échantillons de matériaux du patrimoine culturel sont irradiés aux fins de leur caractérisation et préservation. L'Agence traite de ces questions dans des réunions techniques et des exercices interlaboratoires et par l'élaboration de bonnes pratiques et de protocoles. L'objectif est de proposer une nouvelle définition de la méthode de caractérisation des effets radio-induits sur les matériaux du patrimoine culturel. Cette définition prévoirait, outre l'inspection visuelle immédiate, le recensement d'activités pertinentes dans des domaines voisins pour obtenir des informations utiles sur les mécanismes de dégradation des différents matériaux du patrimoine culturel, parfois uniques, l'examen des stratégies de surveillance des dommages causés par les rayonnements, et la proposition de stratégies d'atténuation.

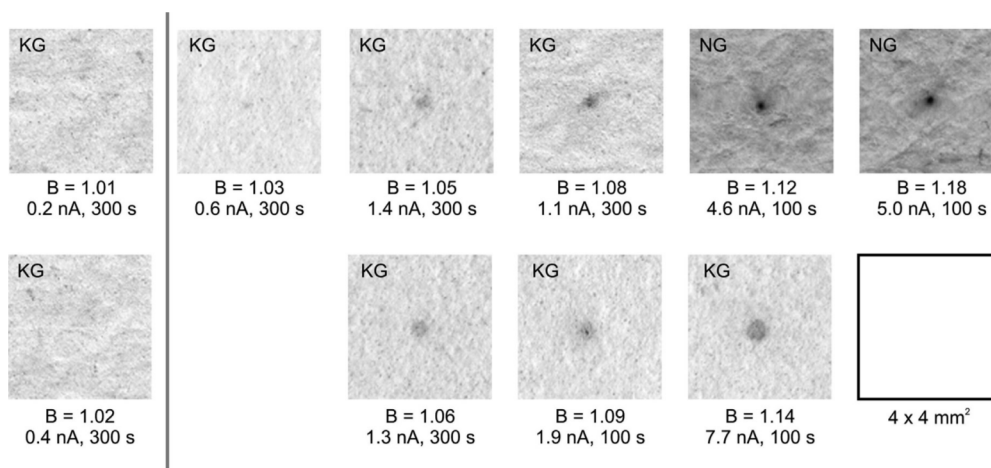


Fig. C-3. Agrandissements de zones de papier irradiées après vieillissement accéléré, classées par ordre croissant d'exposition aux protons. NG correspond à du papier de chiffon sans couche de fond ; KG à du papier de chiffon avec une couche de fond blanche. La valeur de noir B (essentiellement le rapport entre les différentes valeurs de gris d'un point et son environnement) montre le niveau de décoloration induite par les faisceaux. Pour les agrandissements de gauche, séparés du reste par une ligne verticale, la valeur B atteint jusqu'à 1.02 et aucun effet n'est visible. (Source : Milota et al. 2008)

¹⁸ MILOTA P. et al., "PIXE measurements of Renaissance silverpoint drawings at VERA", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 266 (2008) 2279–2285.

198. L'Agence lance actuellement un nouveau Portail des connaissances sur les accélérateurs à l'intention des utilisateurs d'accélérateurs, chercheurs et fournisseurs de services d'analyse dans le monde. Ce portail offre non seulement une base de données sur les accélérateurs de particules d'une puissance de l'ordre des mégavolts dans le monde mais aussi plusieurs fonctionnalités communautaires et de réseautage afin de rassembler les utilisateurs d'accélérateurs de faisceaux d'ions et de fournir des informations à ces derniers et aux décideurs.

C.2. Réacteurs de recherche

199. Les réacteurs de recherche sont principalement utilisés comme source de neutrons pour des applications dans la recherche et divers domaines, notamment pour la formation théorique et pratique, comme indiqué dans le tableau C-1. Leur puissance, qui s'exprime en mégawatts, peut être nulle (comme dans le cas d'un assemblage critique ou sous-critique) ou atteindre jusqu'à 200 MWth, contre 3 000 MWth (soit 1 000 MWe) pour un grand réacteur de puissance classique.

200. Au 31 décembre 2013, on comptait 245 réacteurs de recherche en service dans le monde¹⁹. En outre, 20 réacteurs de recherche étaient mis à l'arrêt temporairement et 142 en arrêt de longue durée. Parmi les réacteurs en service, 57 sont de grande capacité, fonctionnant à des niveaux de puissance supérieurs à 5 MW et offrant des flux de neutrons élevés. Par ailleurs, 338 réacteurs de recherche ont été déclassés. La majorité des réacteurs de recherche en service, qui restent très insuffisamment utilisés, sont très anciens et nécessitent donc des efforts continus de gestion de leur vieillissement, de modernisation et rénovation.

Tableau C-1. Applications courantes des réacteurs de recherche dans le monde²⁰

Type d'application	Nombre de réacteurs de recherche concernés ^a	États Membres dotés d'installations en service
Formation théorique/pratique	174	54
Analyse par activation neutronique	128	54
Production de radio-isotopes	96	43
Irradiation de matériaux/combustible ^c	80	29
Neutronographie	72	41
Diffusion neutronique	50	33
Transmutation (dopage de silicium)	30	19
Géochronologie	26	22
Transmutation (pierres précieuses)	21	12
Thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT), principalement en R-D	18	12
Autres ^b	137	35

^a Sur les 280 réacteurs de recherche considérés (245 en service, 20 en arrêt provisoire, 5 en construction et 10 prévus ; 31 décembre 2013).

^b Parmi les autres applications figurent l'étalonnage et l'essai d'instruments et de systèmes dosimétriques, les expériences de blindage, les expériences de physique des réacteurs, les mesures de données nucléaires, et les visites et séminaires destinés au public.

^c L'Agence met au point un catalogue complet intitulé « Capabilities and Capacities of Research Reactors towards the Deployment of Innovative Nuclear Energy Systems and Technologies ».

¹⁹ Source : Base de données de l'AIEA sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>).

²⁰ Source : Base de données de l'AIEA sur les réacteurs de recherche (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>).

201. Ces dernières années, l'intérêt des États Membres pour l'élaboration de programmes de réacteurs de recherche n'a cessé de croître. Plusieurs d'entre eux ont de nouveaux projets se trouvant à différents stades d'avancement et certains souhaitent se servir de leur premier réacteur de recherche pour se doter d'une infrastructure de science et technologie nucléaires. La construction de nouveaux réacteurs de recherche est en cours en Fédération de Russie, en France et en Jordanie (Fig. C-4). Les États Membres ci-après ont présenté des plans officiels de construction de nouveaux réacteurs de recherche : Afrique du Sud, Arabie saoudite, Argentine, Belgique, Brésil, Fédération de Russie, Inde, Pays-Bas et République de Corée.



Fig. C-4. À gauche : L'assemblage sous-critique jordanien de puissance nulle a reçu une licence d'exploitation en juin 2013 (Photo: Université jordanienne des sciences et des technologies). À droite : la construction du réacteur jordanien de recherche et de formation de 5 MW était achevée à 49 % en octobre 2013. (Photo : Commission jordanienne de l'énergie atomique)

202. D'autres États Membres, comme le Bangladesh, le Bélarus, le Koweït, le Liban, le Nigeria, la République-Unie de Tanzanie, le Soudan, la Thaïlande, la Tunisie et le Viet Nam, envisagent d'en construire de nouveaux²¹.

203. Les réacteurs de recherche anciens étant déclassés et remplacés par des réacteurs polyvalents moins nombreux, le nombre de réacteurs de recherche et d'installations critiques en service devrait continuer à diminuer. Il faudra développer la coopération internationale pour permettre un large accès à ces installations ainsi que leur bonne utilisation. En 2013, les réseaux ou associations de réacteurs de recherche au niveau régional, dont la constitution est facilitée par l'Agence²², ont favorisé une meilleure coopération internationale et contribué à élargir l'assise des parties prenantes aux réacteurs de recherche.

204. En 2013, l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale, lancée par les États-Unis, a poursuivi sa mission visant à réduire le plus possible la présence d'uranium hautement enrichi (UHE) dans le secteur nucléaire civil mondial. En 2009, elle a été étendue et porte désormais non plus sur 129 mais sur quelque 200 réacteurs de recherche utilisant du combustible à l'UHE et, à la fin de 2013, 88 d'entre eux avaient été convertis au combustible à l'UFE ou mis à l'arrêt avant d'être convertis.

205. L'élaboration d'un plan de retrait du combustible à l'UHE et de déclassement pour le réacteur de recherche FOTON à Tachkent (Ouzbékistan) constitue un bon exemple récent d'appui et de coopération pluridisciplinaires au niveau international en vue de la réduction au minimum de l'utilisation d'UHE. À la fin de 2013, le gouvernement ouzbek œuvrait au financement de l'exécution du déclassement du site du réacteur.

²¹ La publication récente 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) vise à aider les États Membres dans ce domaine.

²² L'Agence a constitué différentes associations de réacteurs de recherche dans les régions de la Baltique, des Caraïbes (avec la participation de l'Amérique latine), de l'Afrique centrale, de l'Asie centrale, de l'Europe orientale et de la Méditerranée.

206. En outre, en République tchèque, le réacteur de recherche LVR15 a été converti entièrement au combustible à l'UFE, et le stock final de 70 kg de combustible usé à l'UHE a été réexpédié en Fédération de Russie en avril 2013. Au Viet Nam, après le remplacement du combustible à l'UHE par du combustible à l'UFE dans le réacteur de recherche TRIGA de Dalat, le stock final de près de 12 kg de combustible usé à l'UHE a été réexpédié en Fédération de Russie en juillet 2013. En Hongrie, la conversion du cœur du réacteur de recherche de Budapest de 10 MW a été achevée en janvier 2013 et son stock final d'UHE, de plus de 49 kg, a été expédié par avion en Fédération de Russie en octobre et novembre 2013 (Fig. C-5). Depuis l'achèvement de ces projets, il n'y a plus d'UHE dans ces trois États Membres²³.



Fig. C-5. À gauche : Boulonnage de colis de transport spéciaux renfermant du combustible usé à l'UHE pour les expédier de l'Institut vietnamien de recherche nucléaire de Dalat en Fédération de Russie. À droite : Pose d'un suremballage de protection sur un château de transport contenant du combustible usé à l'UHE en provenance du réacteur de recherche de Budapest, en Hongrie. Ce suremballage a été conçu pour permettre le transport aérien.

207. La conversion à l'UFE et le rapatriement du combustible à l'UHE sont souvent suivis d'une modernisation importante de l'infrastructure. Par exemple, l'Initiative sur les utilisations pacifiques de l'Agence finance un programme de modernisation complet organisé au réacteur de recherche mexicain TRIGA Mark III. En Ukraine, la construction d'une installation sous-critique hybride fonctionnant à l'UFE est en cours à l'Institut de physique et de technologie de Kharkov, avec l'appui financier et technique du Ministère de l'énergie des États-Unis, après la réexpédition de tout l'UHE en Fédération de Russie.

208. La Chine a poursuivi ses efforts visant à remplacer l'UHE par de l'UFE dans ses réacteurs sources de neutrons miniatures et envisage de collaborer avec les États Membres ayant acheté de tels réacteurs pour les aider à les convertir et à rapatrier le combustible à l'UHE.

209. Après une réduction des pénuries d'approvisionnement en ⁹⁹Mo en 2012, des problèmes d'exploitation sont réapparus en 2013 dans des installations de traitement et des réacteurs de recherche anciens. En raison de changements apportés à la gestion de la demande et d'une certaine diversification de l'approvisionnement, les pénuries n'ont pas entraîné de crise de l'ampleur observée entre 2007 et 2010. Le remplacement de l'UHE par de l'UFE dans les processus de production

²³ Au total, plus de 2 000 kilogrammes d'UHE fournis par la Russie ont été transférés en Russie en 56 expéditions depuis le lancement en 2002 d'une initiative conjointe de l'Agence, des États-Unis et de la Fédération de Russie.

d'isotopes médicaux s'est poursuivi. L'Afrique du Sud et l'Australie restent les principaux fournisseurs de ⁹⁹Mo non produit à partir d'UHE, et l'Afrique du Sud a continué de convertir ses processus pour n'utiliser que de l'UFE. Deux autres grands producteurs d'isotopes médicaux, la Belgique et les Pays-Bas, ont poursuivi leurs plans pour remplacer l'UHE par de l'UFE dans leurs processus de production à l'échelle commerciale.

210. Les combustibles avancés de très haute densité à base d'uranium et de molybdène actuellement mis au point sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et à haute performance. Bien qu'on ait enregistré avant 2013 des avancées notables dans ce domaine, des efforts et des essais supplémentaires, notamment dans le cadre de programmes d'irradiation et d'examen après irradiation et dans le domaine des techniques de fabrication, s'avèrent nécessaires pour pouvoir assurer en temps voulu l'approvisionnement commercial en combustibles à l'UFE qualifiés.

211. Après la conversion des réacteurs TRIGA appropriés, la demande mondiale de combustible pour ce type de réacteurs a diminué. Depuis 2010, aucun nouvel élément combustible n'a été fourni, freinant ainsi l'exploitation de plusieurs réacteurs TRIGA dans le monde. Dans cette situation, les utilisateurs de réacteurs TRIGA ont lancé en juin 2012 le réseau mondial de réacteurs de recherche TRIGA (GTRRN). Ce réseau a été officialisé en novembre 2013 à Vienne avec la création de son comité directeur. Il relèvera les défis qui se posent pour les 38 installations TRIGA dans le monde, principalement en proposant plusieurs solutions à des questions telles que l'approvisionnement en combustible neuf, la prolongation du programme de rapatriement établi par les États-Unis pour le combustible nucléaire usé, le renforcement de l'utilisation, la gestion du vieillissement, l'exploitation et la maintenance.

212. En 2013, les activités se sont poursuivies pour promouvoir et renforcer l'utilisation des réacteurs de recherche à des fins de formation théorique et pratique. Parmi les projets internationaux figuraient des projets visant à trouver des moyens d'accroître le nombre, le type et la qualité des cours, à donner accès aux réacteurs de recherche aux jeunes spécialistes de pays en développement et à inclure ce type de réacteurs dans la formation de base et la formation spécialisée dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires.

D. Recours aux techniques nucléaires pour accroître la production animale tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre

213. Produire suffisamment de nourriture pour répondre aux besoins de consommation d'une population humaine de plus en plus nombreuse est un défi mondial. Ce défi est aggravé par l'impact environnemental de l'acquisition de produits alimentaires, qui nécessite des dépenses énergétiques et contribue donc aux émissions de gaz à effet de serre (GES) Le secteur agricole, y compris l'élevage, est responsable d'environ 22 % des émissions totales dans le monde²⁴. De bonnes pratiques d'élevage peuvent permettre d'accroître la quantité et la qualité des animaux et des produits animaux et de réduire les émissions des GES, donc de limiter ce phénomène.

214. La présente section porte sur les technologies nucléaires et connexes innovantes qui peuvent être élaborées et appliquées pour améliorer la nutrition, la reproduction, la sélection et la santé animales, et

²⁴ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Tackling climate change through livestock — A global assessment of emissions and mitigation opportunities, (FAO, Rome, 2013).

ainsi contribuer à une sécurité alimentaire durable tout en atténuant le changement climatique par la réduction des émissions de GES. C'est ce que l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) considère comme une agriculture intelligente face au climat²⁵.

D.1. Gestion de l'élevage respectueuse de l'environnement

215. Pour limiter l'augmentation de la température de la planète à moins de 2 °C²⁰, niveau auquel la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) considère que les impacts du changement climatique pourraient devenir irréversibles, le secteur de l'élevage devra faire face à un double problème : augmenter la production pour assurer la sécurité alimentaire mondiale, tout en réduisant les émissions des GES pour protéger l'environnement. Il faut donc effectuer des travaux de recherche pour élaborer des technologies modernes et des plateformes qui permettront d'atteindre simultanément ces deux objectifs.

D.1.1. Satisfaire la demande croissante de produits alimentaires d'origine animale

216. On s'attend à une hausse de 70 % de la consommation des aliments d'origine animale à l'horizon 2050 en raison de la croissance démographique, de l'augmentation du revenu et de l'urbanisation. Il faudra donc que la production de l'élevage augmente très fortement. Il ressort des estimations actuelles que l'élevage est responsable d'environ 14,5 % (7,1 gigatonnes d'équivalent CO₂ par an) des émissions anthropiques totales de GES²¹. La production et la transformation des aliments du bétail et leur fermentation dans le rumen des animaux sont les deux principales sources d'émissions de GES dues à l'élevage et sont responsables respectivement de 45 % et 39 % de ces émissions. Celles-ci proviennent essentiellement des bovins (65 %), dont les émissions sont constituées à 31 % de méthane entérique. Cela est considéré comme une perte de nutriments et l'amélioration de l'efficacité de la digestion des aliments du bétail permettra de réduire les pertes de ce méthane.

217. Les autres sources d'émissions de GES dues à l'élevage sont le stockage et le traitement du fumier (10 %), l'expansion des pâturages et des cultures d'aliments du bétail dans des zones autrefois occupées par la forêt (9 %) et la consommation transversale de combustible fossile le long de la chaîne d'approvisionnement de ce secteur (20 %). Les objectifs et des augmentations à court et moyen terme d'atténuation des émissions de GES de la production de l'élevage peuvent être réalisés par l'adoption de bonnes pratiques agricoles pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des aliments du bétail ainsi que la productivité des animaux individuellement et à l'échelle des troupeaux. Pour des solutions à long terme, il faut des travaux de recherche innovants pour promouvoir la mise au point d'animaux plus robustes et plus productifs adaptés aux climats rudes, résistants aux maladies et capables d'utiliser des fourrages et des résidus de récoltes de mauvaise qualité (Fig. D-1). Il faut aussi des travaux de recherche pour non seulement améliorer la digestibilité de ces résidus sans nuire aux rendements en grains mais aussi mettre au point des graminées qui poussent dans des climats rudes tout en produisant plus de biomasse ayant une meilleure digestibilité pour la consommation des animaux.

²⁵ <http://www.fao.org/climatechange/climatesmart/fr/>



Fig. D-1. Les bovins de race locale Kouri du Tchad sont d'excellents producteurs de lait et sont adaptés aux conditions environnementales rudes.

D.1.2. Recours aux bonnes pratiques pour réduire les émissions de GES

218. D'après la FAO, on peut réduire les émissions de GES dues à l'élevage de 30 % si tous les producteurs d'une communauté adoptent des pratiques agricoles intelligentes face au climat qui sont déjà adoptées par les 10 % de producteurs de la tranche supérieure²⁶. La recherche devrait viser à réduire les émissions de GES en améliorant les pratiques plutôt qu'en changeant les systèmes de production, lesquels varient en fonction des espèces animales et des régions. Les interventions visant à atténuer ces émissions ne doivent pas augmenter les dépenses énergétiques dans d'autres secteurs. Par exemple, en intensifiant les systèmes de production et en équilibrant les rations fourragères avec des grains, le secteur de l'élevage aux États-Unis d'Amérique et en Europe produit entre 9 et 10 millions de tonnes de protéines tout en émettant environ 0,6 gigatonne d'équivalent CO₂. Par contraste, la région Amérique latine et Caraïbes produit la même quantité de protéines en nourrissant le bétail avec des pâturages et des fourrages de mauvaise qualité et une complémentation limitée de grains et émet 1,3 gigatonne d'équivalent CO₂.

219. Toutefois, il faut effectuer des travaux de recherche pour savoir si l'intensification de l'élevage grâce à la complémentation en grains augmentera les émissions de GES en raison de l'accroissement de la consommation de combustibles fossiles et de la production de grains. L'utilisation excessive d'eau pour intensifier l'élevage pourrait se traduire par d'autres problèmes environnementaux. Cela montre que des recherches approfondies doivent être entreprises pour concevoir des approches holistiques destinées à accroître la productivité de l'élevage tout en maintenant les émissions de GES à des niveaux aussi bas que possible.

D.1.3. Augmentation de la production et interventions d'atténuation : une situation gagnant-gagnant

220. Dans la gestion d'un système de production, la rentabilité est souvent le facteur décisif, et il est probable que c'est elle qui guidera l'adoption des pratiques d'atténuation des émissions de GES. Ces technologies devront donc améliorer l'efficacité de la production de l'élevage au niveau aussi bien de chaque animal que du troupeau. De fait, la plupart des interventions d'atténuation ont des avantages pour l'environnement et l'économie agricole. Par exemple, l'amélioration de la qualité et de l'équilibre nutritionnel des aliments du bétail non seulement réduit les émissions de méthane entérique

²⁶ Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. 2013. *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome.

et de GES du fumier, mais aussi aide à augmenter la productivité et le revenu²⁷. L'amélioration des pratiques de sélection et de santé animales aide à réduire d'une part le nombre d'animaux de sélection non productifs qui consomment des ressources mais ne produisent pas encore, d'autre part les émissions connexes.

221. Il a été constaté que les petites exploitations mixtes produisant à la fois de la viande et du lait émettaient quatre fois moins de GES que les élevages spécialisés produisant séparément de la viande et du lait²⁸. La caractérisation génétique, la sélection à l'aide de marqueurs et l'amélioration de l'alimentation peuvent contribuer à promouvoir et à accroître la production de viande des animaux laitiers. Par exemple, un projet de recherche coordonnée de l'Agence sur la caractérisation génétique des petits ruminants pour la résistance aux parasites gastro-intestinaux a permis de déterminer des espèces d'ovins et de caprins plus résistantes à ces parasites dans tous les 12 États Membres participants (Fig. D-2). Des capacités comme l'extraction d'ADN, la cartographie par le panel d'hybride d'irradiation, le séquençage protonique de gènes entiers, les micro-réseaux de polymorphisme de nucléotide simple et le génotypage, qui ont été transférées par le biais de projets de coopération technique, peuvent être utilisées pour d'autres recherches liées au génome, par exemple en vue de la caractérisation des espèces animales pour le métabolisme de base et l'amélioration de la qualité des fourrages pauvres, des résidus de cultures et des sous-produits.



Fig. D-2. Les chèvres locales d'Angola sont tolérantes aux maladies et vivent de pâturage de mauvaise qualité.

D.2. Recours aux techniques nucléaires pour réduire les émissions de GES

222. Les techniques nucléaires mettant en jeu des isotopes stables et radioactifs ainsi que des rayonnements sont des outils importants dans la recherche sur la production et la santé animales. L'avantage comparé des techniques nucléaires dans la recherche sur l'élevage et le diagnostic des maladies animales est qu'elles sont plus spécifiques et plus sensibles que les techniques non nucléaires²⁹. Celles qui sont décrites dans les paragraphes suivants portent sur les pratiques de quantification et d'atténuation des GES axées sur la fermentation entérique, la décomposition du

²⁷ HRISTOV et al., Special Topics — Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options, *Journal of Animal Science*, 91 (2013): 5045–5069.

²⁸ Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome.

²⁹ VILJOEN et al., The role of nuclear technologies in the diagnosis and control of livestock diseases—a review, *Tropical Animal Health and Production*, 44 (2012): 1341-1355

fumier, la production d'aliments du bétail et de fourrages, l'efficacité de l'utilisation de ces aliments et la gestion des pâturages.

D.2.1. Amélioration de la digestibilité des fourrages grossiers pauvres

223. L'amélioration de la digestibilité chez les ruminants dépend de l'équilibre nutritionnel, qui conduit à l'amélioration de la fermentation par les micro-organismes du rumen qui produisent des acides gras volatiles (acide acétique, acide butyrique, acide propionique) et fournissent ainsi des nutriments aux animaux. Un autre résultat de ce processus est la croissance de la masse microbienne, qui permet de répondre à une partie des besoins en protéines des ruminants concernés. Au cours de ce processus, les bases puriques de l'ADN et de l'ARN des fourrages et des micro-organismes sont dégradées pour donner des dérivés de la purine comme la xanthine, l'hypoxanthine, l'acide urique et l'allantoïde qui sont excrétés dans l'urine.

224. La détection des dérivés de la purine contenus dans l'urine est une technique *in vivo* non destructive d'estimation de la fourniture de protéines microbiennes, qui est préférable aux techniques traditionnelles qui sont invasives. Des traceurs du carbone 14 comme l'acide urique marqué au carbone 14 et l'allantoïne marquée au carbone 14 ont été utilisés pour élaborer des modèles des relations entre l'absorption de la purine et l'excrétion de ses dérivés dans l'urine³⁰. L'infusion d'acide acétique et d'acide propionique marqués au carbone 14 est utilisée pour estimer les taux de production d'acides gras volatiles. L'urée marquée à l'azote 15, le bicarbonate d'ammonium marqué à l'azote 15 et le chlorure d'ammonium marqué à l'azote 15 peuvent être utilisés pour étudier la dégradation microbienne de fibres de qualité médiocre, la masse microbienne, l'utilisation de l'azote non protéique, le recyclage de l'urée, la protéosynthèse microbienne et l'interconversion des acides aminés dans le rumen.

225. La vitesse de la protéosynthèse microbiennes est déterminé par l'incorporation de phosphore 32, de phosphore 33, d'azote 14 ou de sulfure 35 dans les micro-organismes du rumen. Des minéraux marqués comme le phosphore 32, le calcium 45, l'arsenic 76 et le cuivre 67 sont utilisés pour étudier les déséquilibres minéraux chez les animaux d'élevage. L'acide éthylène diamine tétra-acétique marqué au cobalt 58, la phénanthroline marquée au ruthénium 104 et des fourrages marqués au chrome 51 sont utilisés pour déterminer les taux de passage. Des techniques d'infusion de bicarbonate de sodium marqué au carbone 13/carbone 14 sont utilisées pour estimer la production de dioxydes dans le rumen. Ces études fournissent une base pour améliorer la digestibilité, ce qui à son tour augmente les rythmes de conversion des aliments et l'utilisation de l'énergie et réduit les émissions de GES par unité de produit. De plus, l'émission de méthane par les ruminants peut être estimée par la dilution isotopique à l'aide de méthane marqué à l'hydrogène 3 ou au carbone 14³¹.

D.2.2. Caractérisation génétique de la microflore du rumen en vue de l'amélioration de la digestibilité dans le rumen

226. Les micro-organismes du rumen jouent un rôle crucial dans la dégradation des structures végétales complexes en nutriments nécessaires pour leur propre croissance et celle des animaux hôtes. La diversité phylogénique de la communauté microbienne du rumen a été décrite grâce à l'étude de l'ARN ribosomal de la petite sous-unité ou des gènes correspondants. Les techniques comme celles des sondes oligonucléotidiques marquées au phosphore 32, l'électrophorèse en gel de gradient dénaturant, l'hybridation par fluorescence *in situ* et la réaction de polymérisation en chaîne en temps

³⁰ MAKKAR H.P.S., A review of the use of isotopic and nuclear techniques in animal production, *Animal Feed Science and Technology*, 140 (2008) 418–443.

³¹ Voir la note 21.

réel aident à caractériser et à quantifier les micro-organismes du rumen et leur dynamique. La technique du sondage aux isotopes stables basée sur l'ADN offre d'énormes possibilités pour lier les informations génétiques microbiennes aux fonctions biologiques. Des études métagénomiques utilisant des techniques de séquençage de prochaine génération aident à établir un schéma complet du génome et du plasmidome microbiens du rumen. Cela permet de découvrir d'autres unités, qui sont de nouvelles séquences génétiques qui émergent dans les protéines individuelles du fait de leur évolution, et de leurs caractères fonctionnels dans la digestibilité au niveau du rumen³².

D.2.3. Sélection animale pour améliorer la productivité tout en maintenant l'adaptabilité aux conditions locales

227. L'identification de gènes ciblés et la caractérisation des génomes des animaux locaux et adaptés faciliteront la détermination des gènes favorables, tels que ceux responsables de la résistance aux maladies (par exemple : parasites gastro-intestinaux, trypanosomiase) ou de la capacité de développement en condition de contrainte climatique ou de stress nutritionnel. La technique des sondes ADN radiomarquées, l'hybridation par la technique du dot blot et la cartographie par hybrides d'irradiation, associées à des biotechniques non nucléaires telles que la PCR et le séquençage de prochaine génération pour la caractérisation génétique appuient la sélection à l'aide de marqueurs des animaux d'élevage pour améliorer leur productivité et leur adaptabilité.

D.2.4. Amélioration de la productivité du troupeau et réduction des émissions de GES

228. L'augmentation de la proportion d'animaux laitiers d'un troupeau laitier se traduit par la baisse des émissions de GES par unité de lait produit. La progestérone marquée à l'iode 125 a été utilisée dans des radio-immunodosages pour déterminer la progestérone dans le sang, le lait et d'autres fluides corporels et excréments³³. La progestérone est une hormone de la reproduction dont la détermination aide à diagnostiquer la gestation et les troubles du cycle et de la reproduction, par exemple, chez la vache et la bufflesse. Ces diagnostics permettent d'améliorer l'efficacité de la reproduction et d'augmenter le nombre de vêlages et ainsi que la production de lait par troupeau. La technique du radio-immunodosage a aussi été développée pour l'analyse d'autres hormones de la reproduction comme les œstrogènes, la testostérone, l'hormone folliculo-stimulante, l'hormone lutéinisante, la gonadotropine chorionique équine et la gonadotropine chorionique humaine.

229. On a identifié plusieurs molécules dont l'apparition dans le sang et d'autres fluides corporels peut servir au diagnostic précoce de la gestation, et dont la présence peut être détectée par la PCR et le radio-immunodosage. Ces molécules comprennent les glycoprotéines associées à la gestation, le facteur précoce de conception, l'interféron tau (INF tau) et les gènes stimulés par l'interféron tau. Celui-ci est très prometteur pour le diagnostic précoce de la gestation compte tenu de son apparition rapide dans le sang maternel. Ce diagnostic est un outil extrêmement important pour la gestion du niveau de productivité du troupeau par l'identification des animaux qui ne sont pas gravides mais sont aptes à la sélection. Il peut être utilisé pour réduire la proportion d'animaux non producteurs et accroître la productivité du troupeau.

³² FOUTS et al., Next generation sequencing to define prokaryotic and fungal diversity in the bovine rumen, PLoS One, 7 (2012).

³³ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioimmunoassay and related techniques to improve artificial insemination programmes for cattle reared under tropical and sub-tropical conditions, IAEA-TECDOC-1220, IAEA, Vienna (2001).

D.2.5. Caractérisation et sélection des espèces fourragères tropicales et développement de l'agronomie fourragère

230. L'induction des mutations a été largement utilisée pour améliorer les rendements et la qualité des cultures fourragères. Les améliorations qualitatives comprennent l'augmentation de la digestibilité (par exemple faible teneur en lignine) et de la teneur en nutriments (par exemple augmentation de la teneur en protéines) et peuvent être réalisées sans sacrifier les rendements. La sélection des plantes par mutation a aussi été efficace pour la mise au point de cultures fourragères mieux adaptées aux conditions rudes (par exemple à la tolérance aux inondations, à la sécheresse, à la salinité et aux températures extrêmes). Les rendements de ces espèces ont donc été améliorés parce qu'elles peuvent être cultivées dans des régions marginales.

231. Le système mixte agriculture-élevage vise à maximiser la production des animaux et des cultures, y compris de grains pour la consommation humaine, tout en réduisant au minimum les besoins de ressources comme les engrais, l'eau et l'énergie. Les isotopes stables peuvent être utilisés pour évaluer ces améliorations. Les animaux d'élevage contribuent largement à l'intensification durable des systèmes agricoles mixtes en fournissant du fumier utilisé comme engrais et la puissance de traction servant à la culture. Dans ces systèmes, la production d'un processus devient l'intrant d'un autre, et les fuites de nutriments dans l'environnement, par exemple sous forme d'émissions de GES, sont réduites au minimum.

232. L'association des légumineuses et d'autres cultures se traduit par des fonctions complémentaires qui améliorent la qualité et la production fourragères. Les graminées utilisent l'azote fixé dans le sol par les légumineuses pour produire plus de biomasse de meilleure qualité. La fixation d'azote et son transfert à d'autres cultures ne peuvent être mesurés avec précision qu'à l'aide de la technique de dilution à l'azote 15, dans laquelle le sol est marqué avec des engrais à l'azote 15 (par exemple sulfate d'ammonium à l'azote 15/urée à l'azote 15). En outre, on peut utiliser des engrais marqués au phosphore 33 pour estimer l'efficacité de l'utilisation du phosphore dans la production des légumineuses fourragères.

D.2.6. Amélioration de la gestion des pâturages pour la durabilité de l'élevage et de l'environnement

233. Les systèmes sylvopastoraux qui intègrent la foresterie et le pâturage des animaux offrent des avantages par rapport aux systèmes d'élevage basés uniquement sur les pâturages de graminées³⁴. Le sylvopastoralisme non seulement réduit au minimum les émissions de GES et la contamination chimique des sols et des voies d'eau, mais aussi préserve la biodiversité en limitant au minimum l'utilisation de véhicules, d'engrais et d'herbicides (Fig. D-3). En outre, il protège la santé des sols grâce à une meilleure rétention de l'eau, et fournit des aliments supplémentaires pour le bétail sous forme de feuilles riches en protéines, ainsi que de l'ombre pour permettre aux animaux d'être plus à l'aise en période de chaleur, ce qui à son tour augmente la durée du pâturage et améliore la nutrition, avec comme conséquence un accroissement de la production de lait et/ou de viande par unité de surface de la terre, comparé au seul pâturage ordinaire. Les méthodes faisant appel à l'eau doublement marquée (oxygène 18 et hydrogène 2) sont utilisées pour estimer les dépenses énergétiques des animaux de pâturage.

³⁴ <http://www.cam.ac.uk/research/news/sustainable-livestock-production-is-possible>.



Fig. D-3. Les systèmes sylvopastoraux d'élevage atténuent les émissions de GES et la contamination chimique des sols et des voies d'eau et préservent la biodiversité.

D.2.7. Gestion du fumier et recyclage par la technologie du biogaz

234. Au cours du stockage et du traitement, la matière organique du fumier est convertie en méthane et en azote, ce qui entraîne des émissions d'oxyde nitreux. Celles-ci augmentent lorsque le fumier est dans un milieu liquide comme dans des lagunes profondes ou des bassins de rétention. Les excréments marqués à l'azote 15 stable peuvent être utilisés pour suivre la destinée de l'azote excrété dans l'environnement et produire des données sur les émissions de GES.

235. Le biogaz est une source d'énergie renouvelable qui peut être produite par la digestion de la matière organique du fumier par les micro-organismes anaérobies. Sa production diminue la pollution organique des eaux usées qui autrement, consommerait de l'oxygène et réduira ses niveaux dans les eaux de surface. Les effluents de biogaz conservent aussi l'azote et le phosphore du sol sous forme de nutriments pour la production des cultures. En outre, le gaz contient du carbone qui a été fixé dans les plantes à partir du dioxyde de carbone atmosphérique, ce qui conduit à la production de biogaz, qui est neutre en carbone et ne contribue pas aux émissions de GES. Selon la FAO, si on convertissait tout le fumier du bétail en biogaz au lieu de le laisser se décomposer, les émissions de GES pourraient diminuer de 4 %, soit 99 millions de tonnes³⁵.

D.3. Conclusions

236. Les techniques nucléaires, associées aux outils moléculaires, peuvent être appliquées dans la recherche innovante et le développement technologique pour permettre des augmentations durables de la production animale tout en réduisant les émissions de GES. La réalisation de ces deux objectifs devient de plus en plus importante à mesure que la population humaine et sa demande de produits animaux augmentent et que l'atténuation du changement climatique devient de plus en plus nécessaire.

237. Le Programme mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture continue d'élaborer et de valider des ensembles d'informations et de technologies en vue de contribuer à l'atténuation des GES à l'échelle de la planète. Ces ensembles renforceront la sécurité alimentaire et amélioreront les moyens de subsistance. Pour maximiser leur impact, il importe de sensibiliser à l'existence de ces technologies et des pratiques décrites ci-dessus, et d'associer largement les parties prenantes (secteur privé, société civile, organisations internationales, secteur recherche et universités) aux efforts axés sur l'augmentation de la production des animaux d'élevage et leurs émissions effectives (ou potentielles) de GES.

³⁵ GERBER et al., Tackling climate change through livestock — A global assessment of emissions and mitigation opportunities, FAO, Rome (2013).

E. Imagerie numérique et téléradiologie : développements récents, tendances et défis

E.1. Technologie et avantages de l'imagerie numérique

238. Jusqu'à la fin du siècle dernier, la vaste majorité des examens d'imagerie médicale utilisaient le film comme moyen de prendre, d'afficher et de stocker des images. Toutefois, la révolution de l'imagerie numérique a commencé dans l'imagerie diagnostique médicale dans les années 1970 avec l'invention de la tomodensitométrie (TDM) et la mise au point de la tomographie à émission de positons contemporaine. Le développement de ces techniques d'imagerie nucléaires a été suivi dans les années 1980 par l'imagerie par résonance magnétique (IRM), une technique d'imagerie non nucléaire, et l'invention des systèmes numériques d'acquisition par rayons X (comme la radiographie assistée par ordinateur et la radiographie numérique) dans les années 1990. Les techniques modernes d'imagerie médicale telles que la tomodensitométrie, la tomographie à émission de positons et l'IRM produisent des quantités d'informations considérablement plus importantes que leurs prédécesseurs, ce qui a rendu nécessaire une gestion efficace et efficiente desdites informations. Cette nécessité croissante a entraîné la large adoption des technologies numériques de gestion des images qui constituent actuellement la méthode préférée de prise, d'affichage et de stockage des images car elles peuvent accroître la rentabilité et l'accessibilité des techniques nucléaires et non nucléaires modernes d'imagerie.

239. Ce sont les avantages inhérents à la prise, au stockage et à l'affichage numériques par rapport aux méthodes mettant en jeu l'utilisation de films qui rendent ces avantages possibles (tableau 1). Le coût initial des équipements est certes plus élevé que celui du matériel traditionnel mais, à long terme, la technologie numérique permettra généralement des économies grâce à la réduction des dépenses de fonctionnement car elle ne nécessite pas de produits chimiques ou de films, ni la manipulation et le stockage de films. Malgré ces avantages, la mise en œuvre complète de systèmes numériques d'imagerie médicale, y compris l'établissement de rapports, l'archivage et la distribution des images (Fig. E-1) est un processus complexe. Ces systèmes ne sont pas des solutions technologiques clés en main et passe partout, car ils doivent être adaptés pour différentes activités diagnostiques et divers utilisateurs finals et leur utilisation nécessite d'importants efforts de formation.

Tableau E-1. Avantages de la radiologie numérique par rapport à la radiologie traditionnelle basée sur les films³⁶

1	Diffusion efficace de l'information et accès accru aux images
2	Gamme dynamique sensiblement meilleure des systèmes d'acquisition d'images pour prendre plus d'images, et structures plus diverses, anatomiques de chaque image.
3	Fiabilité améliorée, extraction sans erreur des images sans perte d'informations diagnostiques
4	Facilité d'utilisation
5	Possibilité de multi-modalité, imagerie composite
6	Conservation d'informations diagnostiques sous forme de séries d'images numériques
7	Transmission et affichage simultanés d'images dans de multiples zones géographiques
8	Manipulation et traitement d'images, extraction et amélioration de caractéristiques
9	Facilité d'interaction entre les spécialistes, par exemple entre les radiologues avec les médecins traitants
10	Possibilité de diffuser largement les compétences dans les divers domaines de l'imagerie diagnostique
11	Disponibilité des études à des personnes autorisées immédiatement après l'acquisition des images
12	Possibilité de séquençage et d'adaptation des examens, ainsi que d'intégration des données diagnostiques
13	Élimination de problèmes environnementaux, par exemple films rejetés, déchets chimiques

Fig. E-1. Processus typique d'une chaîne d'imagerie numérique. (source : www.carestream.com)

E.2. Passage du système analogue au système numérique

E.2.1. Problèmes généraux

240. Même si l'impact global de l'imagerie numérique est généralement très positif, la transition de la radiologie conventionnelle (écran-film) à l'imagerie numérique est un changement majeur qui doit être mis en œuvre efficacement. Les méthodes traditionnelles basées sur les films ont été utilisées pendant un siècle et ne pourront pas être facilement abandonnées. En outre, certains utilisateurs sont rapidement confrontés à des défis dus au coût de l'investissement requis, y compris pour la mise en

³⁶ AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Worldwide Implementation of Digital Imaging in Radiology, IAEA, Vienna (en préparation).

valeur du capital humain, et à la nécessité de passer à la technologie numérique. Les stratégies de communication et une compréhension des principes de la gestion du changement sont essentielles à cet égard³⁷. Il s'agit d'un problème épineux car le temps et les investissements nécessaires pour effectuer ces transitions varient largement et dépendent beaucoup des circonstances prévalant au début du processus.

241. Certes, ces étapes peuvent réduire les difficultés causées par ces changements, mais il y aura souvent une période d'ajustement au cours de laquelle la transition peut embrouiller, déstabiliser ou même entraîner des dysfonctionnements. Toutefois, presque partout, après la période initiale d'utilisation de l'imagerie numérique, les utilisateurs en viennent à reconnaître et à apprécier ses avantages par rapport à l'imagerie basée sur les films.

E.2.2. Mise en œuvre et défis particuliers pour le personnel médical

242. Le personnel de radiologie (radiologues, techniciens en radiographie, physiciens médicaux et assistants) devrait faire partie d'un groupe plus large de consultants qui fournit des compétences spécialisées au projet. Cela donnera à tout le personnel de radiologie l'occasion de faire des observations et d'apporter des contributions sur les plans et les programmes en cours. La planification et la fourniture des nouvelles formations nécessaires, y compris sur la maîtrise de l'outil informatique, devraient faire partie du plan de mise en œuvre. Étant donné que la vitesse minimum de toute transition est déterminée par la capacité du personnel d'adopter le changement, la mise en valeur des ressources humaines et un programme de formation efficaces et continus constituent certains des éléments importants d'un projet sur l'imagerie numérique.

243. Les utilisateurs finals de tout service de radiologie sont les médecins traitants. L'absence de film pourrait perturber le travail de certains d'entre eux, et l'introduction de l'imagerie numérique pourrait donc, au début, influencer sur leurs efforts de fourniture de services cliniques. Les médecins ont besoin d'être formés à l'utilisation des systèmes informatiques pour la distribution des images, et seront une source précieuse d'informations en retour, tant positives que négatives, sur l'efficacité de la distribution des images numériques en dehors du secteur de la radiologie. Au stade de la planification du projet, il faudrait savoir clairement comment les utilisateurs existants seront servis pendant et après la transition à l'imagerie numérique. La planification devrait aussi déterminer les médecins et les départements qui auront des besoins particuliers pour les services d'imagerie médicale (par exemple cardiologie et orthopédie). Des interactions étroites entre ceux-ci et l'équipe de mise en œuvre de l'imagerie numérique sont essentielles. Il est extrêmement important d'expliquer clairement que le service est mis en place pour leur fournir le plus d'avantages possibles en tant qu'utilisateurs des services de radiologie.

244. Si une installation possède un département ou une section interne ou local(e) de TI, ce groupe devrait être associé tôt à la préparation de la transition vers l'imagerie médicale. Toutefois, il est crucial que le groupe de TI comprenne que les solutions doivent être conformes à des normes et des pratiques bien définies à travers le monde dans la communauté de l'imagerie numérique. Cela pourrait passer par l'élaboration d'un mémorandum d'accord entre le comité directeur du projet et le groupe de TI pour définir les intrants nécessaires. Si des logiciels gratuits et du matériel commercial fait partie de la solution, le groupe local de TI devrait préparer ces composants bien avant l'installation prévue du matériel d'acquisition des images.

³⁷ AMERICAN COLLEGE OF RADIOLOGY, AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE, SOCIETY OF IMAGING INFORMATICS IN MEDICINE, ACR–AAPM–SIIM Technical Standard for Electronic Practice of Medical Imaging, Reston, VA, USA (2012).
<http://www.acr.org/-/media/ACR/Documents/PGTS/standards/ElectronicPracticeMedImg.pdf>

E.3. La téléradiologie

245. L'un des principaux avantages de la technologie d'imagerie numérique est que, grâce aux applications de téléradiologie, elle peut permettre d'avoir des opinions diagnostiques d'experts quelle que soit la distance qui les sépare du lieu d'acquisition. La téléradiologie peut être définie de plusieurs façons, mais en termes généraux, elle peut être définie comme la transmission d'une série d'images à pleine résolution et à pleine intégrité à un centre distant de l'endroit où elles ont été acquises, en vue d'une première interprétation diagnostique et/ou d'un deuxième avis d'expert. Ces technologies sont déjà largement disponibles dans les pays développés et, même si certains pays en développement utilisent aussi la téléradiologie, sa mise en œuvre est encore limitée dans ces pays³⁸.

246. La téléradiologie peut être utilisée localement (par exemple dans la même installation), entre des bâtiments dans un complexe partagé ou dans la même ville, ou entre des installations sanitaires n'importe où dans le monde. Elle offre d'autres solutions de remplacement aux méthodes traditionnelles d'interprétation des images, qui nécessitent la présence sur place de personnel capable d'interprétation des informations radiologiques. La téléradiologie permet :

- D'améliorer l'accès aux avis médicaux, pour une première ou une deuxième interprétation ;
- D'assurer aux centres ne bénéficiant pas de services suffisants l'accès à l'établissement de rapports d'imagerie médicale ;
- D'appuyer les consultations de patients et permettre d'informer ceux-ci des décisions relatives aux traitements ;
- D'assurer aux régions reculées l'accès à l'interprétation des images ;
- De décaler l'établissement de rapports en vue d'une interprétation en temps voulu après les heures normales de travail, et ;
- D'aider à équilibrer le volume du travail d'établissement de rapports entre les centres ayant différents niveaux d'effectifs pour permettre de produire des rapports en temps voulu.

E.3.1. La technologie

247. La téléradiologie a évolué pour adopter des technologies modernes et offrir différentes utilisations³⁹. Lorsqu'elle est utilisée avec un système d'archivage et de communication de photos accessible à distance, ou des archives centralisées, elle ne peut être distinguée d'aucune autre forme d'accès à distance. On utilise généralement l'Internet et la technologie client léger (dans laquelle un ordinateur doit être connecté à un serveur pour être pleinement opérationnel). Les autres cas d'utilisations possibles actuellement en raison de ces avancées comprennent les travaux d'interprétation à temps partiel ou à plein temps à domicile, l'équilibrage des volumes d'interprétation entre différents sites, y compris entre les fuseaux horaires, et l'externalisation de travaux d'interprétation d'urgence et/ou finale à des tiers qui peuvent fournir d'autres compétences.

248. D'un point de vue technique, on peut transférer sans problème presque partout dans le monde, mais pour des solutions de téléradiologie efficaces, il faut des processus de déroulement appropriés pour gérer des nombres élevés de cas de téléradiologie de manière efficiente. La taille des images varie largement, de quelques mégaoctets à des centaines de mégaoctets, et le transfert de grandes séries

³⁸ PAL, A., MBARIKA, V. W., COBB-PAYTON, F., DATTA, P., MCCOY, S., Telemedicine diffusion in a developing country: the case of India, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 9 (2005) 59-65; ZENNARO, F., et al., Digital Radiology to Improve the Quality of Care in Countries with Limited Resources: A Feasibility Study from Angola, PLoS One, 8 (2013).

³⁹ JOHNSON, N. D., Teleradiology 2010: technical and organizational issues, Pediatric Radiology, 40 (2010) 1052-1055.

d'images peut être extrêmement lent et donc peu pratique. Le réseau disponible est donc un élément essentiel des applications de téléradiologie nécessitant une planification et des ressources appropriées, ce qui peut entraver l'adoption de cette technologie.

249. Le type de réseau dépendra de la disponibilité locale, et la largeur de bande sera fonction de la taille et du volume des images à transférer. Toutefois, l'extension des systèmes locaux pour fournir l'accès à distance pourrait être limitée par des problèmes de performance du réseau, en particulier dans les zones rurales, ainsi que dans les régions connaissant des problèmes de sécurité, notamment compte tenu de la nécessité de fournir aux utilisateurs externes des justificatifs d'identité authentifiés et de contrôler leur accès.

250. Les équipements de téléradiologie, y compris tout le matériel d'acquisition d'images, devraient être conformes aux normes conçues par l'Organisation internationale de normalisation pour l'imagerie numérique et les communications en médecine en vue de la communication avec les postes de travail, les dispositifs de télécommunication et le stockage d'images. Certains emplacements n'ont pas de moyens (ou de plans) de connexion aux médecins traitants ou à des services d'interprétation en téléradiologie, alors que d'autres peuvent utiliser des réseaux internes ou externes dans la chaîne d'imagerie médicale.

251. Enfin, étant donné qu'il peut aujourd'hui y avoir une grande distance entre le lieu d'acquisition des images cliniques et celui où elles sont examinées et où sont établis les rapports, il faut que les deux sites comprennent clairement les responsabilités et les politiques de privilège d'accès à suivre et s'entendent là-dessus afin que les données des patients restent confidentielles.

E.3.2. Exemples de mise en œuvre

252. La téléradiologie est différente de la transmission d'un petit nombre d'images de qualité limitée envoyées essentiellement à des fins de discussion ou de démonstration. Un exemple de ce dernier cas est l'utilisation de technologies de communication non médicale comme la téléphonie mobile ou la messagerie électronique. La taille de la mémoire, les possibilités de travail en réseau et la vitesse des processeurs de la plupart des téléphones mobiles et d'autres formes de matériel informatique portable utilisées actuellement sont limitées, et ils ne pourront donc probablement pas être employés pour la première interprétation et l'établissement de rapports de diagnostics. Toutefois, cette situation est en train de changer rapidement et on peut s'attendre à ce que ces dispositifs soient de plus en plus importants dans un avenir proche pour l'envoi et l'examen d'images médicales.

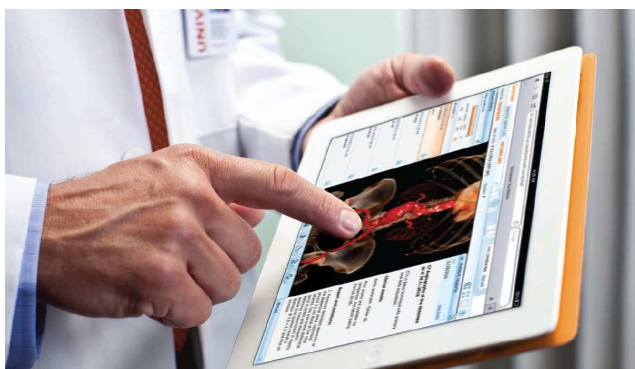


Fig. E-2. Affichage d'une image de tomodensitométrie sur une tablette. (source : www.carestream.com)

253. L'un des exemples les plus communs de mise en œuvre de la téléradiologie est la connexion d'hôpitaux périphériques dans un pays ou une région ayant un établissement central. Cela donne aux médecins des zones rurales, qui pourraient ne pas avoir d'expérience de l'interprétation d'images,

l'occasion de demander un appui en matière de première interprétation diagnostique à des médecins spécialisés d'hôpitaux plus grands ou de centres hospitaliers universitaires ou spécialisés. Cela pourrait se faire pour fournir un diagnostic précis et donc d'un traitement plus efficace localement ou, si nécessaire, pour déterminer la nécessité de transférer des patients dans une installation d'un niveau de soins plus élevé. Les bénéficiaires directs de tels projets de téléradiologie sont les membres du personnel de l'hôpital assisté et, plus important, les patients dont les images sont interprétées par un radiologue spécialisé⁴⁰.

254. La mammographie de dépistage s'est révélée un puissant outil pour le dépistage précoce du cancer du sein. Plusieurs études ont montré que le taux de détection de ce cancer augmentait avec l'adoption de la méthode de double lecture (en vertu de laquelle deux spécialistes interprètent les examens pour permettre un diagnostic plus fiable) et avec l'expérience cumulée du spécialiste chargé d'étudier les images⁴¹. Dans un cadre organisé de téléradiologie (télémammographie), les centres participant au programme de dépistage en tirent des avantages appréciables si la deuxième interprétation indépendante est faite par des radiologues spécialisés d'un service central de traitement du cancer du sein (Fig. E-3). Étant donné qu'ils auront interprété de nombreuses images, ces radiologues seront extrêmement qualifiés et expérimentés dans ce domaine et pourront améliorer l'efficacité du programme de dépistage.



Fig. E-3. Poste de travail sur la mammographie. (source: www.healthcare.siemens.co.uk)

E.4. Conclusions

255. Compte tenu des avantages et des possibilités de l'imagerie numérique, les examens basés sur les films sont progressivement abandonnés en faveur de l'acquisition, du traitement et de l'affichage numériques qui peuvent accroître l'efficacité et l'accessibilité d'importantes techniques nucléaires et non nucléaires d'imagerie. Ce mouvement est actuellement plus prononcé dans le monde développé, mais des pays en développement ont aussi commencé à en bénéficier et pourraient en profiter plus en adoptant plus largement la technologie numérique pour les examens radiologiques.

256. La téléradiologie peut devenir une méthode pratique et efficace pour remédier au problème de la répartition inégale et des pénuries locales de spécialistes de l'imagerie. Son rôle accru pourrait aider à remédier aux pénuries de personnel, même s'il faudra de nouvelles fonctions dans le domaine de l'appui technique en matière d'infrastructure. Le défi pour les pays en développement est de trouver

⁴⁰ ZENNARO, F., et al., Digital Radiology to Improve the Quality of Care in Countries with Limited Resources: A Feasibility Study from Angola, PLoS One, 8 (2013).

⁴¹ LEADER, J. K., et al., A Multisite Telemammography System for Remote Management of Screening Mammography: An Assessment of Technical, Operational, and Clinical Issues, Journal of Digital Imaging, 19 (2006) 216–225.

une méthodologie adaptée à leurs besoins et conditions pour passer efficacement de la méthode traditionnelle - traitement et stockage de films - à l'acquisition et à l'affichage numériques.

F. Recours à la technologie des rayonnements pour le traitement des eaux usées et des biosolides : solutions pour la protection de l'environnement

F.1. Rôle de la technologie des rayonnements dans la protection de l'environnement

257. L'urbanisation et l'industrialisation continues des sociétés à travers le monde constituent des facteurs majeurs de la contamination des ressources d'eau douce déjà réduites et de la production d'énormes quantités de boues d'épuration par les villes. L'apparition de contaminants organiques comme les pharmaceutiques, les colorants textiles, les insecticides et les perturbateurs endocriniens dans les eaux usées et les boues a encore aggravé le problème car ces produits chimiques, même sous forme de traces, pourraient avoir des effets notables sur la vie aquatique, les animaux terrestres et les êtres humains. Le traitement des effluents industriels ainsi que des boues et des eaux usées aide à conserver les ressources en eau et à améliorer les conditions des sols.

258. Grâce aux progrès continus de la technologie de traitement de ces eaux et au resserrement des conditions de leur déversement, la plupart de leurs effluents traités peuvent être déversés en sûreté. Toutefois, le traitement ne suffit pas pour permettre de réutiliser l'eau ou d'utiliser les boues, et il faudrait donc étudier la possibilité d'autres applications. Les techniques radiologiques utilisant les technologies de rayons gamma et de faisceaux d'électrons ont été introduites avec succès pour démontrer le traitement des eaux usées contenant des colorants textiles industriels et l'aseptisation des boues d'épuration en vue des applications agricoles.

259. La technologie des rayonnements utilisée pour le traitement des différents polluants organiques n'a pas encore été adoptée pour une utilisation à pleine échelle, mais son utilité et son efficacité ont été démontrées à diverses échelles d'opération et elle a de vastes potentialités en ce qui concerne les problèmes émergents de traitement des eaux usées et des boues. Étant donné que les effluents et les déchets industriels ne sont pas généralement mélangés et doivent plutôt être traités à la source, ces technologies pourraient être réadaptées pour convenir à divers besoins de traitement des déchets.

F.2. Questions d'actualité concernant le traitement des eaux usées et des boues pour réutilisation

260. Avec l'aggravation des pénuries d'eau, la réutilisation de l'eau suscite un intérêt croissant à travers le monde. Dans le même temps, les risques de contamination microbienne et chimique de l'eau, en particulier par de nouveaux contaminants traces, sont cependant devenus un sujet de préoccupation croissante. L'élaboration de technologies économiques et fiables de récupération de l'eau est donc cruciale pour le succès de la mise en œuvre des projets de réutilisation de l'eau.

261. Les technologies avancées de traitement, telles que celles des rayonnements et leurs combinaisons avec des procédures traditionnelles, sont actuellement testées pour la production d'eau de qualité en vue de sa réutilisation indirecte sous forme d'eau potable, c'est-à-dire que l'eau recyclée serait soumise à un traitement spécial avant d'être traitée par les méthodes traditionnelles pour être

utilisée comme eau potable. On s'attend à ce que ces technologies deviennent les méthodes prédominantes de traitement de l'eau dans un avenir proche.

262. La tendance croissante caractérisée par des normes de plus en plus strictes de déchargement des eaux usées a été bénéfique pour l'environnement, mais ces normes ont aussi entraîné l'augmentation de la production de boues d'épuration. Il existe actuellement un certain nombre d'options de stockage de ces boues, y compris l'incinération, le stockage dans des décharges, ou leur utilisation comme engrais ou nutriments du sol, même si leur composition peut limiter ces choix.

263. On s'attend à ce que les usines de traitement des eaux usées soient des opérations de récupération des ressources de grande valeur, plutôt que des lieux de traitement puis de stockage ultérieur des déchets municipaux. Toutefois, pour que cela devienne une réalité, il est essentiel de déterminer des technologies qui peuvent permettre d'assainir et de stabiliser économiquement les biosolides municipaux. À cet égard, une attention accrue est accordée à la production de biosolides de qualité qui ne présentent pas de risques pour la santé publique et l'environnement et peuvent être utilisés de manière bénéfique.

F.3. Situation actuelle des applications de la technologie des rayonnements dans le traitement des eaux usées et des boues

F.3.1. Traitement par faisceaux d'électrons des eaux usées contenant des colorants textiles

264. L'industrie de la teinturerie et de la production de colorants textiles est responsable de près de 20 % de la pollution industrielle de l'eau dans le monde. Plus de 700 millions de tonnes de colorants sont produites à travers le monde chaque année et les processus de teinturerie sont très gourmands en eau, nécessitant environ 80 000 m³ d'eau par tonne de produit textile fini. Les besoins en oxygène des effluents liquides industriels sont élevés, ce qui indique de fortes concentrations de polluants organiques et une faible biodégradabilité en raison de la salinité, et de la présence d'un large éventail de produits chimiques.

265. Le processus traditionnel de traitement biologique des eaux usées contenant des colorants, outre qu'il nécessite beaucoup de temps, ne peut dégrader les colorants synthétiques compte tenu de leurs structures chimiques complexes. Il a été montré que les électrons de haute énergie produits par des accélérateurs de faisceaux d'électrons dégradaient efficacement ces colorants complexes en molécules plus simples, ce qui facilite leur biodégradation ultérieure. Cette procédure est facile à intégrer au processus existant de traitement biologique. Il a en outre été montré que la présence de particules solides de jusqu'à 3 % d'argile n'avait pas d'impact négatif sur la destruction des produits chimiques. Des solutions contenant des composants absorbant fortement la lumière ne diminuent pas l'efficacité du processus, lequel ne nécessite pas de produits chimiques supplémentaires. Le niveau de dégradation atteint rend les sous-produits vulnérables aux processus ultérieurs de traitement biologique, ce qui diminue les coûts de traitement. Il a été montré que les accélérateurs utilisant jusqu'à 400 kW de puissance étaient extrêmement fiables et robustes et que leur disponibilité opérationnelle était proche de ≥99 %. Ces accélérateurs sont entièrement automatiques pour l'exploitation sur site ou à distance, et leur durée de vie est supérieure à 30 ans.

266. L'accélérateur à faisceaux d'électrons du complexe industriel de teinturerie de Daegu (République de Corée) a démontré l'efficacité de la technologie des faisceaux d'électrons pour traiter jusqu'à 10 000 m³ d'eaux usées contenant des colorants textiles par jour à la dose de 1 kilogray (kGy)

et au coût de 0,30 \$ par m³⁴². Les coûts pour un accélérateur aussi puissant sont d'environ 2 millions de dollars pour l'accélérateur lui-même et son installation, tandis que les tuyauteries, les autres équipements et les travaux de construction coûtent environ 1 million de dollars. C'est la seule installation de ce genre existant actuellement dans le monde, et les coûts initiaux déclarés constituent un obstacle à la mise en place d'autres installations. Les coûts croissants des réglementations et de la remédiation de l'environnement dans certains pays conduisent certaines grandes sociétés de teinturerie à délocaliser dans des pays où les réglementations sont moins strictes, ce qui montre la nécessité d'augmenter les capacités et la rentabilité de ces technologies pour encourager leur adoption plus large.



Fig. F-1. Traitement des eaux usées avec un accélérateur de faisceaux d'électrons. (Photo : Eb Tech, République de Corée)

F.3.2. Traitement des boues avec des rayons de haute énergie

267. Les rayons de haute énergie constituent un moyen efficace et efficient de désactiver les bactéries pathogènes et cette technologie est déjà utilisée à grande échelle à travers le monde pour stériliser le matériel médical. Basée sur un concept similaire, l'utilisation de la technologie des rayonnements pour aseptiser les boues d'épuration a été étudiée dans de nombreux pays. Il a été constaté que les boues traitées étaient des porteurs efficaces de bactéries utiles comme le rhizobium, qui aide à fixer l'azote du sol, et des essais à grande échelle ont démontré qu'elles étaient un excellent fumier enrichi⁴³. Les biosolides peuvent donc remplacer les engrais chimiques qui sont moins respectueux de l'environnement.

268. Le succès et la poursuite de l'exploitation, depuis 1992, de l'irradiateur de recherche sur l'hygiénisation des boues (SHRI) de Valdorada (Inde) ont montré que l'irradiation au cobalt 60 des boues d'épuration ayant un contenu solide de 5 % à une dose de 3 kGy pouvait désactiver 99,9 % des bactéries pathogènes. Cette technologie est facile à intégrer aux usines de traitement des boues d'épuration existantes. En outre, les matières organiques issues de l'exploitation du SHRI ont été utilisées de manière efficace par les agriculteurs et les horticulteurs, qui ont enregistré une plus grande productivité. Cependant, les hauts débits nécessaires pour le processus de traitement et le besoin de

⁴² HAN Bumsoo, et al., Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant, *Radiation Physics and Chemistry*, 81 (2012) 1475–1478.

⁴³ GAUTAM S., et al., Gamma irradiation of municipal sludge for safe disposal and agricultural use, *Water Environment Research*, 77 (2005) 472–479.

rechargement périodique de très grandes quantités de cobalt-60 ont limité la dissémination de cette technologie potentiellement utile.

269. Ces dernières années, il a été montré que la technologie des faisceaux d'électrons de haute énergie était extrêmement efficace comme méthode de désinfection et permettait de réduire sensiblement divers types de bactéries et de virus pathogènes cibles. Les résultats indiquent que des doses comprises entre 8 et 15 kGy détruisaient un grand nombre de bactéries, de virus et de protozoaires pathogènes. Les spécifications techniques d'un système de traitement par faisceaux d'électrons de haute énergie capable de fournir les doses requises ont été élaborées, modélisées et validées empiriquement. Les simulations de Monte Carlo (technique mathématique informatique permettant de tenir compte des risques liés à l'analyse quantitative et à la prise de décisions) et des essais empiriques ont confirmé qu'il était techniquement possible et économique de fournir des doses uniformes de faisceaux d'électrons à des flux de biosolides de diverses concentrations de solides et d'eau de qualité variée à environ 1500 m³/jour⁴⁴. En plus de la faisabilité technique, des estimations préliminaires de coût indiquent que la désinfection basée sur des faisceaux d'électrons de haute énergie pouvait être très économique pour le séchage thermique, le compostage et la stabilisation à la chaux par rapport à certains traitements contemporains comme la digestion par des bactéries thermophiles

270. En outre, la désinfection synergique des pathogènes a été possible lorsque l'irradiation par faisceaux d'électrons était couplée avec l'utilisation d'oxydants chimiques comme le dioxyde de chlore et les ferrates. Il a été constaté que la combinaison de l'irradiation par faisceaux d'électrons et du traitement par des ferrates était efficace pour éliminer les microbes pathogènes, détruire l'activité des œstrogènes et stabiliser les biosolides. Le coût de la production de biosolides de qualité est d'environ 70 \$ par tonne sèche, ce qui est sensiblement plus faible que ceux des autres technologies contemporaines. La capacité de purifier et de stabiliser les biosolides municipaux en combinant l'irradiation par faisceaux d'électrons et l'utilisation d'oxydants chimiques ouvre la voie à des possibilités de réutilisation de ces biosolides et de récupération de ressources.

F.4. Recours à la technologie des rayonnements pour lutter contre les nouveaux polluants de l'eau

271. Dans le domaine du traitement de l'eau, la question des produits chimiques appelés perturbateurs endocriniens (qui peuvent causer des maladies en perturbant les systèmes hormonaux), des produits d'hygiène corporelle et des pharmaceutiques constitue un sujet de préoccupation croissante dans la mesure où ils ne peuvent pas être totalement éliminés ou détruits par les procédures de traitement traditionnelles. Les traces de ces produits, qui sont dangereux pour les animaux aquatiques au taux de 1 ng/dm³, sont difficiles à traiter avec les méthodes existantes. Qui plus est, leurs concentrations dans les environnements d'eau douce qui tendent à recevoir des écoulements d'eau augmentent progressivement en raison de la croissance démographique et de la diversification des pharmaceutiques utilisés actuellement dans le monde.

272. Ces composés peuvent être traités avec des techniques émergentes mettant en jeu des radicaux libres dans des processus d'oxydation avancés. Il semblerait que les méthodes de rayonnements ionisants soient efficaces pour décomposer les polluants organiques persistants comme la dioxine, les polychlorobiphényles et les perturbateurs endocriniens⁴⁵. Il a été démontré que les rayons gamma dégradent ceux-ci et leurs produits d'irradiation dans les eaux usées à la dose de 200 Gy. Le coût

⁴⁴ PILLAI S., Centre de recherche AgriLife de l'Université A&M Texas, communication personnelle (2013).

⁴⁵ KIMURA A., et al., Decomposition of persistent pharmaceuticals in wastewater by ionizing radiation, *Radiation Physics and Chemistry*, 81 (2012) 1508–1512 and references therein.

estimé de l'utilisation de l'irradiateur à faisceaux d'électrons à cette fin dans une usine de traitement est de 0,17 \$/m³. Il ressort en outre d'expériences conduites sur les pharmaceutiques que la technologie des rayonnements peut permettre d'éliminer efficacement des médicaments comme le diclofénac, qui se sont révélés nocifs pour les espèces d'eau douce⁴⁶.

273. En 2010, l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique (KAERI) a mis au point un accélérateur à faisceaux d'électrons mobile qui a été utilisé pour conduire des études sur le terrain sur le traitement de nombreux produits chimiques contenus dans les effluents d'épuration. Les principaux antibiotiques et désintégrateurs endocriniens ayant des concentrations initiales de 0,5 mg/l ont été totalement décomposés avec une dose d'irradiation de moins de 1,5 kGy, et les bactéries coliformes et d'autres micro-organismes ont aussi été éliminés à la même dose d'irradiation. Cette étude a montré que l'exposition aux rayonnements permettait de réduire la toxicité due aux antibiotiques contenus dans les algues. L'accélérateur de faisceaux d'électrons mobile a été conçu pour être un dispositif de démonstration qui peut être facilement transporté dans diverses installations industrielles pour démontrer les possibilités de ces accélérateurs pour le traitement économique -de différents types d'eaux usées, avec comme objectif d'encourager l'adoption accrue de cette technologie. Les résultats de cette étude ont joué un rôle important dans l'attribution par le Ministère coréen de l'environnement d'une certification pour une nouvelle technologie d'excellence sur le traitement avancé des effluents d'épuration par irradiation⁴⁷.



Fig. F-2. Accélérateur de faisceaux d'électrons mobile installé dans une usine de traitement des eaux usées. (Photo: KAERI)

F.5. Besoins et défis futurs de la recherche

274. Alors que les processus liés aux applications des technologies des rayonnements pour le traitement des eaux usées, des boues et d'autres polluants sont relativement bien connus et établis, les défis émergents susceptibles de se poser à l'industrie au cours des prochaines années et les avantages

⁴⁶ HOMLOK R., et al., Elimination of diclofenac from water using irradiation technology, *Chemosphere*, 85 (2011) 603-8.

⁴⁷ LEE M.J., et al., Radiation induced decomposition of emerging organic pollutants in sewage effluent and PCBs in various matrices. Communication présentée à la Réunion technique sur le radiotraitement des polluants, des eaux usées et des boues, tenue du 4 au 8 mars 2013 à l'AIEA à Vienne.

potentiels de l'utilisation de nouvelles applications pour affronter ces défis, indiquent qu'il faut poursuivre les efforts en vue de développer ces applications. Ces défis émergents représentent des opportunités futures d'appuyer le développement des applications de ces technologies dans diverses activités industrielles pour la remédiation de l'environnement.

275. Un de ces défis est la présence de nouveaux produits chimiques préoccupants dans les eaux usées et les boues, ce qui nécessite des analyses détaillées et systématiques dans les usines de traitement des eaux usées. Des moyens sont nécessaires en vue d'évaluer les composés organiques toxiques présents dans les eaux usées et les boues à des concentrations entraînant des risques pour la santé humaine et animale et l'environnement, et ultérieurement, d'évaluer et de garantir l'efficacité de l'irradiation pour le traitement de ces eaux.

276. L'irradiation des effluents tertiaires en vue d'une qualité optimale avant leur déversement dans l'environnement représente un autre défi, et cela nécessite des données empiriques sur les niveaux de désinfection après le traitement de volumes élevés d'eaux usées avec des accélérateurs de faisceaux d'électrons. En outre, la disponibilité de ces accélérateurs offre de nouvelles possibilités de fournir de l'eau propre, désinfectée, non potable, en cas de catastrophe naturelle ou de situations d'urgence similaires pouvant perturber les services de distribution de l'eau, mais d'autres études s'avèrent nécessaires pour de telles applications. Cela pourrait en particulier s'avérer utile dans le contexte de catastrophes naturelles de plus en plus fréquentes et graves liées au changement climatique.

F.6. Conclusions

277. Le recours aux techniques radiologiques pour le traitement des eaux usées et des boues d'épuration peut permettre de faire face à une variété de besoins et de défis dans les domaines de l'environnement, de la santé publique et des ressources. L'efficacité de ces techniques a été démontrée avec succès dans le traitement des eaux usées contenant des colorants textiles industriels et l'aseptisation des boues d'épuration pour fournir des ressources supplémentaires en vue d'applications agricoles. Les études récentes ont démontré les possibilités de dégrader par irradiation les nouveaux composés organiques préoccupants pour les transformer en substances moins nocives ou réduire leurs concentrations jusque dans des fourchettes autorisées. L'utilité et l'efficacité de la technologie des rayonnements pour le traitement de différents polluants organiques ont été adéquatement démontrées à diverses échelles d'opération.

278. La mise au point d'installations à faisceaux d'électrons mobiles a permis aux techniciens en radiologie de démontrer ces processus aux utilisateurs finals dans les conditions effectives de travail, et ces accélérateurs pourraient aussi être utilisés pour intervenir en cas de catastrophe naturelle et d'autres situations d'urgence. En outre, des applications comme celles mentionnées ci-dessus peuvent appuyer la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation dans les zones urbaines et l'industrie, ce qui aidera à faire face au problème de la rareté croissante de l'eau dans le monde due à l'augmentation de la demande humaine et au changement climatique. Grâce à d'autres travaux de recherche-développement, ce type de technologie des rayonnements peut se révéler extrêmement utiles pour l'humanité.

G. Recherche de solutions au problème des proliférations d'algues nuisibles dans un environnement marin en évolution

G.1. Recours aux technologies nucléaires pour le traçage des biotoxines dans les produits de la mer et l'environnement

G.1.1. Impact des toxines des proliférations d'algues nuisibles sur le commerce des produits de la mer

279. Les produits animaux aquatiques sont importants pour de nombreux pays en développement comme sources de protéines animales et pour le commerce. La demande mondiale des produits de la mer augmente, ce qui stimule à la fois les importations et la production locale. Compte tenu de la stagnation des prises des pêches de capture, l'aquaculture couvre aujourd'hui plus de 50 % de la demande totale de produits de la mer dans le monde. Ces produits constituent les denrées alimentaires les plus commercialisées au plan international et leurs exportations à partir des pays en développement dépassent les valeurs totales du café, du cacao, du thé, du tabac, de la viande et du riz combinées⁴⁸. En outre, environ 50 % des exportations mondiales de produits de la mer proviennent de ces pays⁴⁹.

280. La capacité des exportateurs d'adhérer aux prescriptions réglementaires des pays importateurs est devenue un obstacle majeur à l'accès au marché dans le secteur de la pêche⁵⁰. Les importations de produits de la pêche comme les huîtres, les praires, les coquilles Saint-Jacques et les moules sont soumises à des conditions d'étiquetage et de traçabilité et à une certification officielle pour en garantir la qualité et la sécurité sanitaire. Les organismes locaux de réglementation de nombreux pays mettent un accent particulier sur la mise en place et l'application de limites et de critères réglementaires pour les biotoxines marines.

281. Ces biotoxines sont produites par certaines algues marines microscopiques qui peuvent, dans certaines conditions, proliférer et atteindre des densités élevées, pour former des proliférations d'algues nuisibles encore appelées « marées rouges ». Par le biais de l'alimentation, les poissons et les crustacés peuvent accumuler ces biotoxines et devenir dangereuses pour la consommation humaine. Les produits de la mer peuvent ainsi devenir mortels même si l'eau est apparemment claire et semble libre de proliférations d'algues nuisibles. Les produits de la mer toxiques et non toxiques ont le même goût et la même apparence, et les toxines de ces algues ne sont pas détruites par la cuisson ou la congélation.

282. Ces toxines entraînent, dans l'industrie des crustacés, d'énormes pertes économiques dues aux fermetures d'installations de pêche imposées quand les concentrations de toxines des crustacés dépassent les niveaux réglementaires. Lorsqu'il n'y a pas de programme réglementaire en place, l'absence de contrôle des toxines des produits de la mer représente un risque pour les consommateurs et un obstacle à l'exportation. Les poussées de toxines peuvent aussi entraîner des alertes sociales (y compris des impacts plus étendus lorsque des consommateurs non informés évitent tous les produits de la mer) en ayant répercussions négatives sur l'industrie du tourisme et en encourageant les importations de poissons à partir de régions contrôlées au détriment des pêcheries locales. Les techniques nucléaires peuvent être utilisées pour déterminer et mesurer les toxines des proliférations

⁴⁸ FAO. Perspectives de l'alimentation : Analyse des marchés mondiaux, FAO, Rome (2013)

⁴⁹ TACON A.G.J., METIAN M., Fish Matters: Importance of Aquatic Foods in Human Nutrition and Global Food Supply, Reviews in Fisheries Science, 21 (2013) 22–38.

⁵⁰ FAO. Perspectives de l'alimentation : Analyse des marchés mondiaux, FAO, Rome (2013)

d'algues nuisibles et étudier l'impact des changements environnementaux et climatiques sur la dominance des espèces de ces algues, leurs caractéristiques de distribution et la fréquence probable de flambées futures.

283. En réponse aux requêtes d'États Membres lui demandant d'étudier l'impact de ces proliférations, proliférations, l'AIEA crée et renforce, par le biais du programme de coopération technique, des capacités et des compétences nationales et régionales pour la détection des toxines d'algues dans les produits de la mer et la gestion des proliférations d'algues nuisibles en vue de promouvoir des approvisionnements durables et sûrs de ces produits.



Fig. G-1. Les toxines des proliférations d'algues nuisibles peuvent s'accumuler dans des organismes marins comme les moules ou les poissons. Produits de la mer destinés au commerce au Chili (à gauche), et marché aux poissons en Polynésie (à droite).

G.1.2. Méthode nucléaire nouvellement validée d'analyse des toxines des algues

284. La technique nucléaire du dosage récepteur-ligand est une méthode spécifique et sensible élaborée pour l'analyse des toxines des algues associées à l'intoxication paralysante par les mollusques, à l'intoxication diarrhéique par les crustacés, à l'intoxication neurotoxique par les crustacés et à la ciguatera⁵¹. Elle est basée sur la capacité d'une toxine présente dans un extrait d'échantillon de concurrencer une biotoxine radio-marquée au tritium 3 (par exemple la saxitoxine au tritium 3 ou la brevetoxine au tritium 3) pour la liaison à ses protéines pharmacologiques cibles (c'est-à-dire des récepteurs). Cette liaison peut être quantifiée à l'aide d'un compteur à scintillateur liquide qui mesure l'irradiation bêta provenant des radio-isotopes, soit dans des fioles traditionnelles, soit avec un lecteur de microplaques.

285. La technique nucléaire du dosage récepteur-ligand est une application essentielle des technologies nucléaires qui peut permettre de contourner les problèmes liés au dosage biologique sur souris, la méthode traditionnelle largement utilisée pour détecter les toxines. Hautement spécifique, elle fournit une estimation de la puissance toxique totale d'un échantillon et sa limite de détection est très faible, ce qui lui permet de donner aux organismes de réglementation et aux producteurs des informations d'alerte précoce extrêmement importantes concernant les proliférations d'algues nuisibles.

⁵¹ IAEA, The Radioligand-Receptor Binding Assay: A manual of method, IAEA, Vienna (in preparation); BOTTEIN DECHRAOUI M.Y., TIEDEKEN J., PERSAD R., et al., Use of two detection methods to discriminate ciguatoxins from brevetoxins: application to great barracuda from Florida Keys, *Toxicon*, 46 (2005) 261-70).

286. La haute performance de la technique du dosage récepteur-ligand utilisée avec des plaques (Fig. G-2) diminue l'utilisation de réactifs et la production de déchets radioactifs. Les matières radioactives employées pour cette méthode se situent dans les niveaux d'exemption (par exemple pour la toxine radiomarquée au tritium 3, environ 5-37 kBq par plaque), et sont considérées comme sûres pour le transport, les programmes de radioprotection des laboratoires et le stockage des déchets. Les instructions relatives à l'utilisation de la technique du dosage récepteur-ligand sont faciles à suivre, et les procédures ont été présentées en détail dans le document technique IAEA-TECDOC-1729⁵². Celui-ci a été élaboré en collaboration avec l'Administration nationale des océans et de l'atmosphère (NOAA) des États-Unis d'Amérique et la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO pour compléter la publication n° 59 de la collection Manuels et guides de la COI sur les proliférations d'algues nuisibles⁵³.

287. Avec l'appui de l'Agence, cette méthode a été soumise par la NOAA à l'AOAC International, qui établit les normes mondiales pour les analyses chimiques. Elle est aujourd'hui reconnue comme méthode officielle (validation initiale) de l'AOAC pour la mesure de l'intoxication paralysante par les mollusques⁵⁴. Neuf laboratoires de six États Membres (Australie, Chili, Italie, États-Unis d'Amérique, Nouvelle-Zélande, Philippines et Thaïlande), y compris l'Institut philippin de recherche nucléaire, un centre collaborateur de l'AIEA, ont participé aux exercices de comparaison interlaboratoires qui ont conduit à cette reconnaissance. Dans le droit-fil de cette réalisation, l'Agence et ses États Membres œuvrent pour organiser des exercices de comparaisons interlaboratoires -similaires pour d'autres toxines, comme celles responsables de l'intoxication diarrhéique par les crustacés, de l'intoxication neurotoxique par les crustacés et de la ciguatera, qui peuvent être efficacement et économiquement détectées à l'aide de la méthode du dosage récepteur-ligand.

288. D'autres mesures aux plans national et international sont prises pour promouvoir la mise en œuvre de cette technique par les organismes de réglementation. Ainsi, cette méthode a été soumise au Comité d'examen des méthodes de laboratoire de la Conférence inter-États sur la salubrité des mollusques des États-Unis, qui œuvre pour promouvoir la sûreté sanitaire des crustacés grâce à la coopération des organismes de contrôle des États et du gouvernement fédéral, de l'industrie des crustacés et du monde universitaire. Elle est actuellement examinée en vue de son adoption comme méthode approuvée d'utilisation limitée par le Programme de salubrité des mollusques des États-Unis. En outre, sur recommandation du comité consultatif de l'AIEA sur les proliférations d'algues nuisibles du projet de coopération technique interrégional INT7017, un test de validation par l'intermédiaire du laboratoire de référence de l'Union européenne pour le contrôle des biotoxines marines, suivant la réglementation de celle-ci, est à l'étude.

⁵² IAEA, The Radioligand-Receptor Binding Assay: A manual of method, IAEA, Vienna (en préparation).

⁵³ REGUERA B, ALONSO R, MOREIRA A, MENDEZ S. Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas, Intergovernmental Oceanographic Commission (2011).

⁵⁴ VAN DOLAH F.M., FIRE S.E., LEIGHFIELD T.A., MIKULSKI C.M., DOUCETTE G.J., Determination of paralytic shellfish toxins in shellfish by receptor binding assay: collaborative study, Journal of AOAC International, 95 (2012) 795-812.

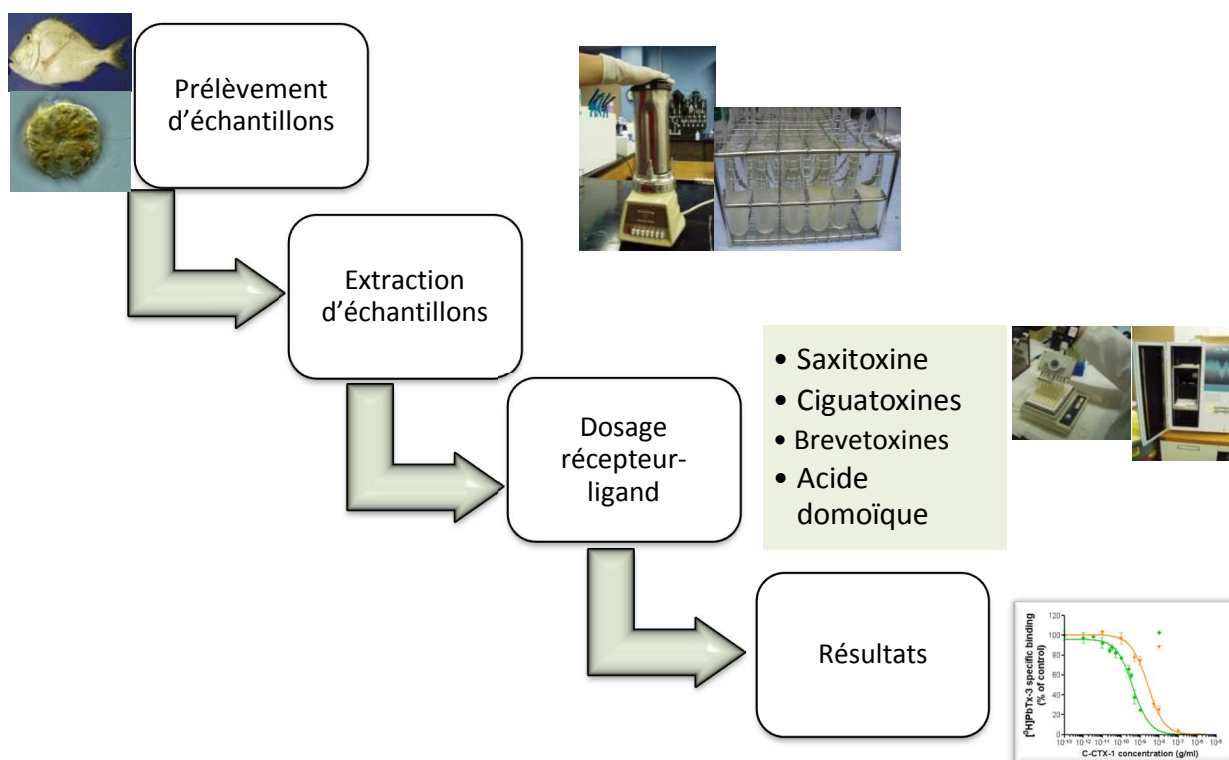


Fig. G-2. Les échantillons de produits de la mer sont soumis à une procédure chimique d'extraction et testés par la méthode radiologique du dosage récepteur-ligand pour déterminer leur niveau de toxine (adapté de Reguera et al, 2013)⁵⁵.

G.2. Recours aux technologies nucléaires pour l'étude des proliférations d'algues nuisibles en rapport avec les changements environnementaux et climatiques passés et actuels

289. La croissance, la toxicité et la distribution géographique des espèces de proliférations d'algues nuisibles dépendent des changements climatiques et environnementaux locaux et mondiaux. L'enrichissement par apport excessif d'éléments nutritifs, aussi appelé eutrophisation, des eaux côtières et intérieures est une conséquence directe de la production d'aliments et d'énergie, et de la production concomitante de déchets et d'eaux usées, pour une population humaine croissante. Le dépôt d'azote dans l'atmosphère (sous forme d'oxyde d'azote dans les pluies acides) contribue aussi à cet apport excessif d'éléments nutritifs.

290. L'excès de nutriments organiques et/ou la modification des rapports entre les nutriments dans les écosystèmes marins entraînent souvent une augmentation de la biomasse des algues dans les masses d'eau et a été lié à de nombreuses proliférations de cyanobactéries et de dinoflagellés⁵⁶. L'eutrophisation est aujourd'hui considérée comme étant l'un des plus grands problèmes de pollution

⁵⁵ REGUERA B., BOISSON F., DARIUS H.T., DECHRAOUI BOTTEIN M.Y. "Toxic microalgal blooms: What can nuclear techniques provide for their management?", *Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies: Proceedings of the International Symposium Held in Monaco, 27 March–1 April 2011, IAEA, Vienna (2011)* 483-91.

⁵⁶ ANDERSON D.M., GLIBERT P.M., BURKHOLDER J.M., Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences, *Estuaries and Coasts*, 25 (2002) 704–26.

dans le monde⁵⁷. Dans ce contexte, les radionucléides et les isotopes stables peuvent permettre de mieux comprendre le cycle du carbone et de l'azote et, plus généralement, l'influence des activités humaines dans les régions touchées par des proliférations d'algues nuisibles.

291. Certains des dinoflagellés les plus nuisibles produisant des toxines (par exemple *Gymnodinium* et *Pyrodinium*) peuvent donner des kystes qui seront enterrés dans les sédiments marins, un stade de repos qui pourrait se fossiliser. Les techniques nucléaires peuvent être utilisées pour extraire de précieuses informations des carottes de sédiments contenant ces fossiles afin de révéler l'impact des changements environnementaux et climatiques sur la dominance et la distribution des espèces de ces proliférations d'algues. Ces techniques comprennent la détermination de la vitesse de sédimentation et la datation basée sur le plomb 210/polonium 210. La reconstitution des conditions paléoclimatologiques est aussi possible, dans ce cas en utilisant les rapports d'isotopes stables comme indicateurs, et permet de mieux comprendre les conditions environnementales prévalant au moment où les kystes ont été produits.

292. Les outils d'isotopes stables comprennent, par exemple, la détermination des rapports carbone 12/carbone 13, oxygène 16/oxygène 18 ou azote 14/azote 15. Ce dernier rapport est fréquemment utilisé comme enregistreur des changements de la productivité ainsi que des niveaux de nutriments dans la colonne d'eau et de l'origine des composés azotés. La relation entre ces facteurs et l'apparition et l'abondance des kystes dans les sédiments aident à comprendre le rôle des paramètres abiotiques dans l'apparition des proliférations d'algues nuisibles.

293. Les séries de données de ce type sont rares mais essentielles pour déterminer si l'introduction des espèces de proliférations dans une région est récente, et si la fréquence, l'intensité et l'extension géographique de ces proliférations augmentent ou suivent juste les fluctuations décennales normales. Ces informations sont importantes pour comprendre et prévoir des changements dans les événements de proliférations d'algues nuisibles, utiliser les outils d'analyse adéquats pour détecter les toxines de manière efficace et efficiente à un stade précoce, et adapter les stratégies de gestion des services écosystémiques et de sûreté sanitaire des produits de la mer.

294. Au cours de la dernière décennie, le changement climatique et l'eutrophisation ont aussi joué un rôle dans l'augmentation de la toxicité des proliférations d'algues nuisibles dans les habitats d'eau douce, y compris les lacs et les estuaires. Les algues apparaissent naturellement dans les eaux douces où elles peuvent se multiplier aussi rapidement que les espèces marines correspondantes lorsque les conditions sont favorables. Les espèces d'algues d'eau douce des lacs et des estuaires comprennent les cyanobactéries, qui produisent de puissantes toxines qui constituent une menace pour les organismes aquatiques, la santé de l'écosystème et la sécurité sanitaire de l'eau de consommation des populations humaine et animale. On sait que ces toxines tuent des milliers d'animaux à la fois. Des algues du genre cyanobactérie produisant des saxitoxines ont été observées dans de nombreux lacs de par le monde, et de faibles niveaux de ces toxines ont été détectés en Nouvelle-Zélande dans l'eau destinée à être traitée et tout au long des processus de ce traitement⁵⁸. Comme pour les toxines des proliférations d'algues marines nuisibles, il semble bien que la méthode du dosage récepteur-ligand puisse être facilement adaptée pour la surveillance des toxines des proliférations d'algues nuisibles d'eau douce. C'est un domaine possible d'application future de cette méthode.

⁵⁷ HOWARTH R.W., RAMAKRISHNA K., CHOI E., et al., "Nutrient Management, Responses Assessment", Ecosystems and Human Well-being, Island Press, Washington, DC (2005) 295–311.

⁵⁸ KOUZMINOV A., RUCK J., WOOD S.A., New Zealand risk management approach for toxic cyanobacteria in drinking water, Australian and New Zealand Journal of Public Health, 31 (2007) 275–81.



Fig. G-3. Animaux terrestres et aquatiques empoisonnés par des proliférations d'algues nuisibles d'eau douce. (Photos : Woods Hole Oceanographic Institution, États-Unis d'Amérique)

G.3. Conclusions

295. On s'attend à voir s'aggraver dans le futur les impacts des proliférations d'algues nuisibles sur les écosystèmes marins et les sources essentielles d'aliments qu'ils fournissent. Ces impacts se feront particulièrement sentir dans le monde en développement, notamment dans certains petits États insulaires en développement qui sont fortement tributaires des produits de la mer comme principale source de protéines. De nouvelles techniques comme le dosage récepteur-ligand sont des outils éprouvés pour contrôler de manière efficace les toxines d'algues dans les produits de la mer et dans l'environnement, et pour améliorer la connaissance de l'impact de la variabilité du climat sur ces proliférations et l'écosystème marin.

296. Des approches régionales et interrégionales sont essentielles pour tenir compte de la nature transfrontière de ce défi environnemental majeur qui touche l'environnement, la santé publique, et les conditions socio-économiques, et pour renforcer la coopération multinationale nécessaire en vue d'améliorer l'efficacité de la gestion des proliférations d'algues nuisibles dans le contexte des changements climatiques et environnementaux mondiaux. L'AIEA œuvre avec la COI et le PNUE dans le cadre du Partenariat mondial sur la gestion des nutriments du programme Écologie et océanographie des efflorescences algales nuisibles à l'échelle mondiale (GEOHAB) de la COI, et le Groupe intergouvernemental de la COI chargé d'étudier les efflorescences algales nuisibles, pour mettre au point un système d'alerte précoce et améliorer les prévisions et les évaluations des impacts des changements environnementaux et climatiques sur ces proliférations. Toutes ces mesures sont essentielles pour permettre la gestion durable des services relatifs aux écosystèmes marins et de la sûreté sanitaire des produits de la mer.

297. En réponse à l'intérêt croissant exprimé par les États Membres pour l'atténuation et la gestion des événements de proliférations d'algues nuisibles et leurs impacts, l'Agence a développé et accéléré ses activités pour étudier les effets de ce phénomène sur l'environnement et la sécurité sanitaire des produits de la mer. La technique du dosage récepteur-ligand et des compétences pertinentes ont été transférées à plusieurs États Membres des régions Amérique latine, Asie-Pacifique et Afrique, et ces efforts seront encore renforcés au cours des prochaines années.