

Conférence générale

GC(51)/INF/3
11 juillet 2007

Distribution générale
Français
Original : Anglais

Cinquante et unième session ordinaire

Point 17 de l'ordre du jour provisoire
(GC(51)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un *rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire*, le présent faisant ressortir les faits importants survenus essentiellement en 2006.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007* passe en revue les domaines suivants : applications énergétiques, fission et fusion avancées, données atomiques et nucléaires, utilisation des accélérateurs et des réacteurs de recherche, applications des radio-isotopes et technologie des rayonnements, techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, ressources en eau et environnement. On trouvera sur le site www.iaea.org en anglais des informations complémentaires sur les progrès accomplis dans la conception et le développement technologique des réacteurs de faible ou moyenne puissance ; les tendances en ce qui concerne le combustible nucléaire pour les filières actuelles de réacteurs de puissance ; le développement durable : préparation de la session de 2007 de la Commission du développement durable (CDD-15) ; la mise au point de matériaux de structure du cœur de réacteur résistant aux rayonnements ; les radiopharmaceutiques : production et disponibilité ; l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture : rôle des techniques nucléaires et isotopiques ; l'utilisation des isotopes dans la compréhension des océans et des changements climatiques.
- Des informations sur les activités de l'AIEA dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires figurent également dans le *Rapport annuel pour 2006* (GC(51)/5), en particulier dans la partie Technologie, et dans le *Rapport sur la coopération technique pour 2006* (GC(51)/INF/4).
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations faites par le Conseil et d'autres observations communiquées par les États Membres.

Table des matières

A.	Applications énergétiques	3
	A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	3
	A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire	6
	A.3. La partie initiale du cycle du combustible	8
	A.4. Combustible usé et retraitement	9
	A.5. Déchets et déclassement	10
	A.6. Autres facteurs déterminants pour l'avenir de l'électronucléaire	11
	A.6.1. Développement durable et changements climatiques	11
	A.6.2. Considérations économiques	12
	A.6.3. Sûreté	12
	A.6.4. Résistance à la prolifération	13
B.	Fission et fusion avancées	14
	B.1. Fission avancée	14
	B.1.1 Réacteurs à eau ordinaire	14
	B.1.2. Réacteurs à eau lourde	15
	B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz	15
	B.1.4. Réacteurs rapides refroidis par métal liquide	16
	B.1.5. Systèmes alimentés par accélérateur	17
	B.1.6. INPRO et GIF	17
	B.2. Fusion	18
C.	Données atomiques et nucléaires	19
D.	Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche	20
	D.1. Accélérateurs	20
	D.2. Réacteurs de recherche	20
E.	Applications des radio-isotopes et technologie des rayonnements	23
	E.1. Applications des radio-isotopes dans le domaine de la santé	23
	E.2. Technologie des rayonnements	24
	E.2.1. Greffage par irradiation des polymères	24
F.	Techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture	26
	F.1. Isotopes du sol et surveillance des polluants	26
	F.2. Amélioration des cultures	26
	F.3. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail	27
	F.4. Lutte contre les insectes ravageurs par la technique de l'insecte stérile	28
	F.4.1. La TIS contre les mouches des fruits	28
	F.4.2. La TIS contre la lucilie bouchère	29
	F.4.3. La TIS contre les moustiques	29
	F.5. Qualité et sécurité sanitaire des aliments	29
	F.5.1. Suivi de la sécurité sanitaire des aliments : mesures des résidus de pesticides	29
G.	Santé humaine	29
	G.1. Progrès en cardiologie nucléaire	29
	G.2. Progrès récents en radiothérapie	30
	G.3. Nutrition	31

H.	L'eau et l'environnement	32
	H.1. Données isotopiques pour la gestion des ressources en eau	32
	H.2. Environnement marin et terrestre	33
	H.2.1. Microanalyse des particules radioactives dans les sédiments marins	33
	H.2.2. Radiotraceurs et sécurité sanitaire des poissons et fruits de mer	33
	H.3. Suivi de la pollution atmosphérique	34
	H.4. Le radon dans l'atmosphère	35
	H.5. Matières de référence et qualité des analyses	35

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. L'année 2006 a été caractérisée par une intensification des activités dans le domaine de l'électronucléaire. Des plans importants de développement de l'électronucléaire ont été annoncés par plusieurs pays, tandis que d'autres prévoient son introduction. L'année a commencé avec des propositions faites à la fois par la Fédération de Russie et les États-Unis d'Amérique concernant un cycle du combustible international en prévision d'une croissance substantielle de l'électronucléaire dans le monde. En janvier, le Président russe, Vladimir Poutine, a présenté une proposition visant à créer un système de centres internationaux fournissant des services du cycle du combustible nucléaire, y compris l'enrichissement, sur une base non discriminatoire et sous contrôle de l'AIEA. En février, les États-Unis ont proposé un partenariat mondial pour l'énergie nucléaire visant à mettre au point des technologies avancées de recyclage n'entraînant pas la séparation de plutonium pur, une collaboration internationale pour fournir du combustible aux États qui acceptent de ne pas entreprendre d'activités d'enrichissement et de retraitement, des réacteurs avancés pouvant utiliser le combustible usé recyclé tout en fournissant de l'énergie et des petits réacteurs sûrs et sécurisés adaptés aux besoins des pays en développement.

2. Les nouvelles projections à moyen terme de l'AIEA et de l'Agence internationale de l'énergie font ressortir des possibilités importantes de développement du nucléaire, mais avec encore une incertitude notable. La Chine, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, le Pakistan et la République de Corée ont annoncé des plans de développement important. Les annonces de demandes de licences prévues des compagnies et consortiums américains font état d'environ 25 nouveaux réacteurs. Deux demandes de préparation de site ont été soumises au Canada. Un examen approfondi de la situation énergétique du Royaume-Uni a conclu que de nouvelles centrales nucléaires apporteraient une contribution majeure à la réalisation des objectifs de la politique énergétique du pays. Des compagnies d'électricité estoniennes, lituaniennes et lettonnes ont lancé une étude de faisabilité commune pour une centrale nucléaire qui desservirait les trois pays. Le Bélarus, l'Égypte, l'Indonésie, le Nigeria et la Turquie ont annoncé les mesures qu'ils sont en train de prendre pour la construction de la première centrale nucléaire.

3. À la fin de 2006, il y avait 435 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, représentant une capacité totale de 370 GWe. Pendant l'année 2006, deux nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau et huit ont été retirés du service, ce qui s'est traduit par une légère augmentation nette de la capacité globale de la production électronucléaire en 2006, de 1 443 MWe, compte tenu de l'augmentation de la puissance nominale des réacteurs déjà en service. Trois centrales ont été mises en chantier et les travaux de construction d'une centrale ont repris activement en Fédération de Russie, ce qui représentait un total de 23 641 MWe à la fin de l'année.

4. En raison notamment des attentes croissantes suscitées par l'électronucléaire, les prix de l'uranium sur le marché libre ont continué d'augmenter en 2006, s'élevant à neuf fois leur valeur historiquement basse de 2000. Les coûts de prospection annuels ont plus que triplé depuis 2001.

5. Le Brésil a mis en service sa nouvelle installation d'enrichissement à Resende, et les travaux de construction de l'Installation nationale d'enrichissement aux États-Unis et de l'usine d'enrichissement Georges Besse II en France ont débuté. Les derniers essais pour la mise en service de l'usine de retraitement de Rokkasho, au Japon, ont commencé en mars.

6. Aux États-Unis, l'installation pilote de confinement des déchets, seul dépôt géologique en service au monde, a reçu de l'Agence de protection de l'environnement son premier renouvellement d'homologation, depuis son ouverture en 1999. La France a adopté une nouvelle législation qui fixe des objectifs pour une demande de licence pour un dépôt géologique profond, dont l'ouverture est prévue en 2025, et pour un prototype de réacteur en 2020, qui servirait notamment à tester la transmutation des radio-isotopes à longue période. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a déposé une demande pour une usine d'encapsulation à Oskarshamn ; il s'agit de la première étape en vue d'un stockage définitif.

7. S'agissant des modèles de réacteurs avancés, le modèle AP-1000 doté de systèmes de sûreté passive de Westinghouse a été homologué par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis en 2006. Le nombre de participants au Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'Agence est passé à 28 avec l'adhésion du Bélarus, du Japon, du Kazakhstan et de la Slovaquie, et le Forum international Génération IV (GIF) en compte désormais 13, avec l'adhésion de la Chine et de la Russie. L'INPRO est entré dans sa deuxième phase suite à l'achèvement de la méthodologie destinée à aider les États Membres à évaluer et à sélectionner des systèmes d'énergie nucléaire innovants en vue de les développer. La phase 2 de l'INPRO est axée sur la mise au point d'approches institutionnelles et infrastructurelles innovantes pour introduire ces systèmes, sur des évaluations communes et sur des projets de collaboration entre les États Membres. En 2006, les membres du GIF ont signé quatre accords de collaboration, portant respectivement sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis par sodium, les réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz, les réacteurs à très haute température refroidis par gaz et les réacteurs refroidis par eau supercritique. Ces accords fournissent un cadre pour des travaux de recherche-développement sur diverses technologies menés en collaboration par les pays membres du GIF.

8. On enregistre une demande croissante de bases de données atomiques et nucléaires plus précises à l'appui des applications nucléaires en matière de recherche, d'énergie et de production de radionucléides à visée thérapeutique. Les applications radio-isotopiques dans le domaine de la santé se développent et les besoins d'émetteurs de positons pour la tomographie à émission de positons (PET) augmentent.

9. L'intérêt que suscite la technologie des rayonnements a été démontré par trois réunions internationales importantes sur le radiotraitement, la radiochimie, et la production et l'utilisation de polymères. Le greffage par irradiation des polymères est à la base de techniques de fabrication à coût réduit qui ont de multiples applications, allant des piles à combustible à la médecine et à la biotechnologie.

10. Les techniques nucléaires et isotopiques continuent à jouer un rôle important dans de nombreux aspects de l'alimentation et de l'agriculture. On utilise de plus en plus les isotopes aux fins de la surveillance des polluants des sols, en particulier les radionucléides provenant de retombées de l'ère des essais d'armes nucléaires. Les techniques d'induction de mutations pour la sélection des plantes bénéficient de l'amélioration de la méthode de séquençage des génomes, ce qui pourrait permettre d'augmenter le nombre de variétés végétales résistant à des conditions rudes. On utilise les isotopes

stables pour améliorer la productivité du bétail grâce à une meilleure compréhension de l'absorption des nutriments par les animaux et à l'optimisation de leur alimentation. Le recours à la technique de l'insecte stérile s'accroît, et de bons résultats ainsi que la mise en place de nouvelles installations de production de mouches stériles ont été signalés.

11. Des progrès sont faits en cardiologie nucléaire grâce à de nouvelles techniques d'imagerie qui permettent désormais une évaluation de la maladie à un stade très précoce. Ces mêmes techniques, combinées à des systèmes informatiques complexes, favorisent des progrès rapides en radiothérapie, apportant des avantages tels que la possibilité d'administrer des doses précises à des organes qui bougent et de réduire les doses reçues par les tissus sains adjacents. En matière de nutrition, les programmes faisant appel aux techniques isotopiques bénéficient d'un accès accru aux appareils d'analyse que l'on peut utiliser pour évaluer la composition corporelle et la prise de lait maternel chez les nourrissons.

12. La compréhension du cycle de l'eau est un élément essentiel pour la gestion durable des ressources en eau. La mesure de la teneur isotopique d'échantillons d'eau de diverses origines (précipitations, eaux souterraines, etc.) contribue à la compréhension du cycle de l'eau et du climat, et de plus en plus d'efforts sont faits au niveau national pour accroître la disponibilité des données isotopiques. Ces efforts renforceront encore le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations, qui fournit un outil pour interpréter les données isotopiques locales ou nationales.

13. Dans le cadre des études environnementales, les radiotraceurs offrent un moyen à la fois efficace et économique d'analyser l'absorption de métaux toxiques par les organismes marins, contribuant ainsi à l'évaluation de la sécurité sanitaire et à l'amélioration de la qualité des poissons et fruits de mer. Les études visant à déterminer la composition et l'origine des polluants atmosphériques s'appuient aussi sur des techniques nucléaires, telles que la fluorescence X et les analyses par activation neutronique, et la mesure du radon, un gaz naturel, est de plus en plus utilisée pour étudier l'atmosphère, notamment dans le cadre du programme Veille de l'atmosphère globale de l'Organisation météorologique mondiale.

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

14. À la fin de 2006, il y avait 435 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, représentant une capacité de production totale de 370 GWe (tableau A-1). En 2006, l'électronucléaire a fourni environ 15 % de l'électricité produite dans le monde.

15. Deux nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau en 2006, un en Chine et un en Inde, alors qu'il y avait eu quatre nouveaux réacteurs couplés (plus un autre, qui avait été arrêté, puis reconnecté) en 2005 et cinq nouveaux réacteurs couplés (plus un autre reconnecté) en 2004. Huit réacteurs nucléaires de puissance ont été mis à l'arrêt en 2006 : deux en Bulgarie, quatre au Royaume-Uni, un en Slovaquie et un en Espagne, contre deux en 2005 et cinq en 2004. Compte tenu des augmentations de puissance des réacteurs déjà en service, il en a résulté une légère augmentation nette de la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire en 2006 de 1 443 MWe.

16. Trois centrales ont été mises en chantier en 2006 : Lingao-4 (1 000 MWe) et Qinshan II-3 (610 MWe) en Chine et Shin Kori-1 (960 MWe) en République de Corée. En outre, la construction du réacteur Beloyarsk-4 en Russie a repris.

17. En comparaison, il y avait eu trois mises en chantier en 2005 et la reprise des travaux de construction de deux réacteurs ; en 2004, il y avait eu deux mises en chantier plus la reprise de la construction de deux autres réacteurs.

18. Le développement du secteur et les perspectives de croissance à court et à long terme se concentrent en Asie. Comme le montre le tableau A-1, sur les 29 réacteurs qui étaient en construction, 17 étaient en Asie, de même que 26 des 36 derniers réacteurs couplés au réseau.

19. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé huit renouvellements supplémentaires de licences de 20 ans chacun (pour une durée totale de vie autorisée de 60 ans pour chaque centrale), ce qui porte à 47 le nombre total de renouvellements de licences approuvés à la fin de l'année. Aux Pays-Bas, le gouvernement a approuvé une prolongation de 20 ans pour la centrale nucléaire de Borssele, portant à 60 ans sa durée totale de vie autorisée. Il a également fixé les conditions pour de nouvelles centrales nucléaires, alors que le pays avait auparavant opté pour une politique d'abandon progressif du nucléaire. L'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a approuvé sous conditions l'exploitation des 20 réacteurs à eau sous pression de 1 300 MWe d'Électricité de France pour dix années supplémentaires, ce qui porte désormais à 30 ans leur durée totale d'exploitation autorisée. Au Canada, Point Lepreau a bénéficié d'un renouvellement de licence de trois ans, jusqu'en 2011.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 1er janvier 2007)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2006		Expérience d'exploitation totale en 2006	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			10,1	4,4	44	3
ALLEMAGNE	17	20 339			158,7	31,8	700	5
ARGENTINE	2	935	1	692	7,2	6,9	56	7
ARMÉNIE	1	376			2,4	42,0	32	8
BELGIQUE	7	5 824			44,3	54,4	212	7
BRÉSIL	2	1 901			13,0	3,3	31	3
BULGARIE	2	1 906	2	1 906	18,2	43,6	141	3
CANADA	18	12 610			92,4	15,8	528	1
CHINE	10	7 572	4	3 610	51,8	1,9	66	7
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	20	17 454	1	960	141,2	38,6	279	8
ESPAGNE	8	7 450			57,4	19,8	245	6
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	103	99 257			788,3	19,4	3 188	2
FÉDÉRATION DE RUSSIE	31	21 743	5	4 525	144,6	15,9	901	4
FINLANDE	4	2 696	1	1 600	22,0	28,0	111	4
FRANCE	59	63 260			429,8	78,1	1 523	2
HONGRIE	4	1 755			12,5	37,7	86	2
INDE	16	3 577	7	3 112	15,6	2,6	267	7
IRAN, RÉP. ISLAM. D'			1	915				
JAPON	55	47 587	1	866	291,5	30,0	1 276	8
LITUANIE	1	1 185			7,9	72,3	40	6
MEXIQUE	2	1 360			10,4	4,9	29	11
PAKISTAN	2	425	1	300	2,6	2,7	41	10
PAYS-BAS	1	482			3,3	3,5	62	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 323			24,5	31,5	92	10
ROUMANIE	1	655	1	655	5,3	9,0	10	6
ROYAUME-UNI	19	10 965			69,4	18,4	1 400	8
SLOVAQUIE	5	2 034			16,6	57,2	118	7
SLOVÉNIE	1	666			5,3	40,3	25	3
SUÈDE	10	9 097			65,1	48,0	342	6
SUISSE	5	3 220			26,4	37,4	158	10
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	84,9	47,5	323	6
Total ^{b, c}	435	369 682	29	23 641	2 660,9	15 %	12 599	1

a. Données tirées du Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA

(<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>)

b. Le total inclut les chiffres suivants pour Taiwan (Chine) :

— 6 réacteurs (4 921 MWe) en service ; 2 réacteurs (2 600 MWe) en construction ;

— 38,3 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 19,5 % de la production électrique totale en 2006 ;

— Expérience d'exploitation : 152 ans et un mois à la fin de 2006.

c. L'expérience d'exploitation totale comprend aussi les centrales mises à l'arrêt en Italie (81 ans) et au Kazakhstan (25 ans et 10 mois).

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

20. En 2006, des projections actualisées du développement de l'électronucléaire jusqu'en 2030 ont été publiées par l'AIEA¹, et par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans ses '*Perspectives énergétiques mondiales 2006*'². L'AIEA publie une projection haute et une projection basse pour l'électronucléaire. Les *Perspectives énergétiques mondiales 2006* présentent un scénario de référence ainsi qu'un scénario alternatif prévoyant des mesures supplémentaires destinées à renforcer la sécurité énergétique et à réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂).

21. En 2005, l'AIE avait publié une étude complémentaire avec sept scénarios allant jusqu'en 2050³. Il s'agit d'un scénario de base et de six scénarios d'accélération technologique qui examinent les options technologiques permettant de limiter ou de réduire les émissions de CO₂ et la consommation de pétrole au niveau mondial. Les trois publications présentent donc onze scénarios au total. Leurs projections pour l'électronucléaire sont résumées dans la figure A-1.

22. Dans la figure A-1, la projection basse de l'AIEA suppose qu'aucune nouvelle centrale nucléaire ne sera construite en dehors de celles déjà en construction ou fermement planifiées à ce jour et que les anciennes centrales nucléaires seront retirées du service comme prévu. Selon cette projection, la production d'électricité d'origine nucléaire atteindrait seulement 3 100 TWh en 2020 (1,1 % par an) et resterait plus ou moins semblable jusqu'en 2030. La projection haute de l'AIEA incorpore des projets électronucléaires plausibles planifiés et proposés autres que ceux qui sont déjà fermement annoncés. Elle montre une croissance régulière jusqu'au niveau de 5 040 TWh en 2030 (2,6 % par an).

23. Ces données globales masquent les différences régionales, en particulier dans la projection basse. Selon cette dernière, la production d'électricité d'origine nucléaire en Europe occidentale chuterait de près de 60 % entre 2005 et 2030, le nombre des réacteurs retirés du service étant systématiquement supérieur à celui des réacteurs mis en construction, tandis qu'elle augmenterait de 80 % en Extrême-Orient et de près de 50 % en Europe orientale. La projection haute prévoit une augmentation de la production d'électricité d'origine nucléaire dans toutes les régions. Dans les deux projections, c'est, dans l'ordre, en Extrême-Orient, en Europe orientale, en Amérique du Nord et au Moyen-Orient/Asie du Sud-Est qu'il y a le plus de nouvelles constructions.

¹ IAEA, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030*, collection Données de référence n° 1 (RDS-1), AIEA, Vienne, juillet 2006.

² *Perspectives énergétiques mondiales, 2006*, AIE, Paris, 2006.

³ IEA, *Perspectives des technologies de l'énergie : Scénarios et stratégies à l'horizon 2050*, AIE, Paris 2006.

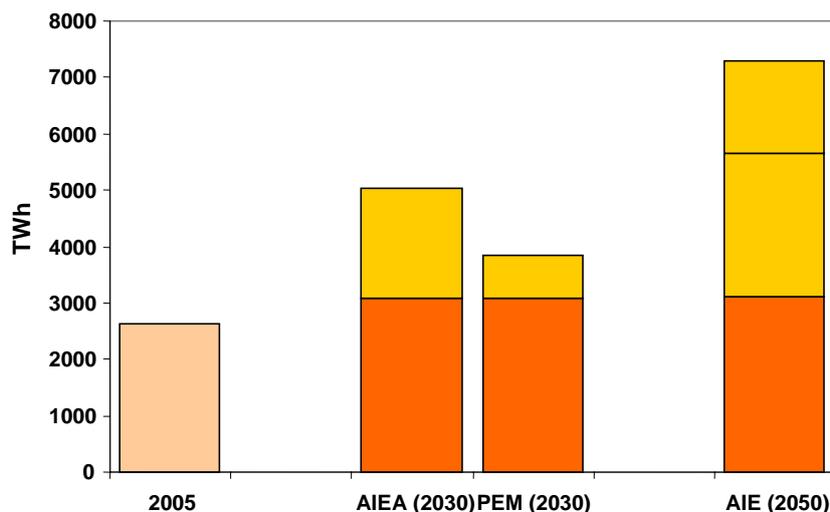


FIG. A-1 : Production mondiale d'électricité d'origine nucléaire en 2005 et fourchettes des projections pour 2030 et 2050 issues de trois études (orange foncé : projection basse ; jaune-orange : projection haute ; beige : niveau de référence 2005.)

24. Le scénario de référence des Perspectives énergétiques mondiales (PEM) est un scénario de 'statu quo' qui suppose que les politiques et tendances actuelles vont se poursuivre. La production d'électricité prévue selon ce scénario est presque identique à celle de la projection basse de l'AIEA. Les mesures du scénario alternatif visant à renforcer la sécurité énergétique et à réduire les émissions de CO₂ sont censées favoriser la production d'électricité d'origine nucléaire, comme le montre la figure, mais pas assez pour égaler la projection haute de l'AIEA.

25. S'agissant des scénarios de l'AIE en 2050, à droite de la figure A-1, la partie inférieure de la colonne représente le scénario de base et des prévisions basses pour le nucléaire. Il s'agit essentiellement d'une prolongation du scénario de référence des Perspectives énergétiques mondiales 2006. La partie supérieure de la colonne représente le scénario TECH Plus, qui suppose une réduction accélérée des coûts des piles à combustible, des énergies renouvelables, des biocarburants et de l'électronucléaire. Selon ce scénario, la production d'électricité d'origine nucléaire continue à augmenter jusqu'en 2050 à peu près au même rythme que dans la projection haute de l'AIEA, et sa part dans la production électrique mondiale atteint 22 %. Les quatre autres scénarios de l'AIE se situent autour de la barre noire de la colonne, à environ 5 650 TWh, avec un taux de croissance moyen de 1,7 % à partir de 2005.

26. Ensemble, ces nouvelles projections et ces scénarios font ressortir des possibilités importantes de développement du nucléaire, mais avec encore une incertitude notable. Un certain nombre de faits nouveaux en 2006 laissent penser que le regain d'intérêt pour l'électronucléaire pourrait assez rapidement conduire à de nouvelles mises en chantier. Ce sont notamment : les plans de développement annoncés en 2006 par le Japon et la Fédération de Russie, et ceux préalablement annoncés par la Chine, l'Inde, la République de Corée et le Pakistan ; les nombreuses demandes de licence combinée annoncées par des compagnies et consortiums aux États-Unis, qui concernent environ 25 nouveaux réacteurs ; les deux demandes de préparation de site faites au Canada et la conclusion de l'examen de la situation énergétique au Royaume-Uni selon laquelle de nouvelles centrales nucléaires apporteraient une contribution majeure à la réalisation des objectifs de la politique énergétique du pays ; l'étude de faisabilité commune lancée par des compagnies d'électricité estoniennes, lituaniennes et lettonnes pour une nouvelle centrale qui desservirait les trois pays, et enfin les mesures annoncées par le Bélarus, l'Égypte, l'Indonésie, le Nigeria et la Turquie en vue de la construction de leur première centrale.

A.3. La partie initiale du cycle du combustible⁴

27. En raison notamment du regain d'intérêt suscité par l'électronucléaire, les prix de l'uranium sur le marché libre ont continué d'augmenter en 2006, atteignant les 72 dollars/livre d' U_3O_8 en fin d'année, ce qui représente plus de dix fois leur valeur historiquement basse de décembre 2005⁵. La prospection et le développement minier ont suivi le mouvement et les coûts de prospection ont plus que triplé entre 2001 et 2005.

28. Les dernières estimations des ressources mondiales d'uranium publiées par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) et l'AIEA en 2006 (*Uranium 2005 : Ressources, production et demande*) montrent que, bien que des ressources d'uranium importantes devraient être disponibles, il faudra mettre de nouvelles mines en exploitation à un rythme accéléré. Le tableau A-2 résume la disponibilité potentielle des ressources mondiales traditionnelles d'uranium. Il donne des estimations concernant la durée des ressources d'uranium traditionnelles, pour l'actuel cycle du combustible sans retraitement des réacteurs à eau ordinaire et pour un cycle du combustible des réacteurs à neutrons rapides⁶, basées sur l'hypothèse que la production d'électricité d'origine nucléaire reste à son niveau de 2004.

Tableau A-2. Disponibilité de l'uranium pour l'électronucléaire (en années)⁶

Réacteur/Cycle du combustible	Années de production d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2004 (ressources traditionnelles répertoriées)	Années de production d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2004 (total des ressources traditionnelles)	Années de production d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2004 (total des ressources traditionnelles et non traditionnelles)
Cycle du combustible actuel sans retraitement des REO	85	270	675
Cycle du combustible de réacteurs à neutrons rapides avec recyclage	5000–6000	16 000–19 000	40 000–47 000

29. L'enrichissement de l'uranium a fait l'objet d'une attention accrue au niveau international en 2006. Comme celui de l'uranium, le prix de l'unité de travail de séparation (UTS) a augmenté, avec une hausse d'environ 45 % entre 2001 et 2006. La demande va probablement dépasser la capacité prévue après 2013, avec l'expiration programmée de l'accord entre le gouvernement des États-Unis et le gouvernement de la Fédération de Russie concernant la réutilisation de l'uranium hautement enrichi provenant des armes nucléaires⁷, et peut-être même plus tôt en cas de développement rapide de la construction de centrales nucléaires à court terme. Des augmentations de capacité importantes sont

⁴ Des informations complémentaires sont disponibles sur IAEA.org sous 'Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007'. De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la partie initiale du cycle du combustible figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

⁵ La plupart de l'uranium est toutefois acheté dans le cadre de contrats de longue durée et, entre 2000 et 2005, les prix de l'uranium à moyen et long terme n'ont augmenté que de 20 à 40 %.

⁶ Les valeurs de la dernière ligne du tableau A-2 supposent que les réacteurs à neutrons rapides transforment pratiquement tout l'uranium 238 en plutonium 239 pour servir de combustible, à l'exception de faibles pertes de matières fissiles au cours du retraitement et de la fabrication du combustible. Elles sont, de ce fait, supérieures aux estimations d'un tableau similaire de la publication '*Uranium 2005 : Ressources, production et demande*', où on suppose que tout l'uranium 238 n'est pas transformé en plutonium 239.

⁷ L'accord prévoit la dilution et le recyclage de l'uranium de qualité militaire provenant d'ogives nucléaires russes démantelées de manière à produire du combustible qui est principalement utilisé par les centrales américaines.

possibles en plus de celles qui sont fermement planifiées, mais, en particulier si la croissance de la capacité nucléaire reprend, les prix de l'UTS comme ceux de l'uranium continueront d'augmenter.

30. Parmi les exemples de l'attention croissante portée à l'enrichissement de l'uranium, il convient de signaler la mise en service officielle de l'installation de Resende au Brésil, la mise en chantier de l'installation nationale d'enrichissement aux États-Unis et de l'usine d'enrichissement Georges Besse II en France, l'intention affichée par l'Afrique du Sud, l'Argentine et l'Australie de relancer ou d'envisager des programmes d'enrichissement, et l'achat par la General Electric Company de droits sur la technologie avancée d'enrichissement de l'uranium par laser de l'entreprise australienne Silex Systems. Parallèlement, la proposition du Président Poutine de créer un système de centres internationaux fournissant des services du cycle du combustible nucléaire, y compris l'enrichissement, sur une base non discriminatoire et sous contrôle de l'AIEA, et la mise en place ultérieure par la Fédération de Russie et le Kazakhstan d'un centre international d'enrichissement de l'uranium à Angarsk, ainsi que plusieurs autres propositions visant à garantir l'approvisionnement en uranium enrichi en cas d'interruption pour des raisons politiques, ont démontré la volonté des États d'élaborer de nouvelles approches internationales du cycle du combustible nucléaire.

31. Dans ce contexte, une conférence internationale intitulée 'Nouveau cadre pour l'utilisation de l'énergie nucléaire au XXI^e siècle : assurances en matière d'approvisionnement et de non-prolifération' a été organisée en tant qu'événement spécial en marge de la 50^e session de la Conférence générale de l'AIEA. Le président de cette conférence a rappelé, dans son rapport, combien il est difficile de satisfaire les besoins énergétiques mondiaux croissants à travers l'expansion de l'électronucléaire, tout en limitant autant que possible les risques de prolifération liés à la diffusion encore plus large de technologies nucléaires sensibles telles que l'enrichissement de l'uranium et le retraitement du plutonium. La conférence a examiné un certain nombre de suggestions utiles récentes concernant de nouvelles approches du cycle du combustible nucléaire, qui visent à mettre en place un approvisionnement assuré en combustible nucléaire, comme mesure de substitution au marché commercial dans certaines situations. Elle a considéré ces propositions comme une étape de l'élaboration plus large et à plus long terme d'un cadre multilatéral qui pourrait englober des mécanismes d'assurance de l'approvisionnement à la fois en uranium naturel et faiblement enrichi et en combustible nucléaire, ainsi que la gestion du combustible usé. Les participants ont reconnu que la mise au point d'un cadre multilatéral pleinement développé, équitable et accessible pour tous les utilisateurs de l'énergie nucléaire agissant conformément aux normes de non-prolifération nucléaire en vigueur est un effort complexe qui nécessiterait probablement une approche progressive. Les discussions de la conférence devraient être prises en compte par le Secrétariat lorsqu'il élaborera ses propositions en vue de leur examen par le Conseil des gouverneurs de l'AIEA dans le courant de 2007.

A.4. Combustible usé et retraitement⁸

32. Le combustible usé retiré de l'ensemble des réacteurs dans le monde représente un total de 10 500 tonnes de métaux lourds (tML) par an. Deux stratégies différentes sont mises en œuvre pour la gestion du combustible nucléaire usé. Dans le cadre de la première, le combustible usé est retraité (ou entreposé en vue d'un futur retraitement) pour en extraire les matières utilisables (uranium et plutonium) et fabriquer du combustible à mélange d'oxydes (MOX). Environ un tiers du combustible usé retiré dans le monde a été retraité. La deuxième stratégie consiste à traiter le combustible usé comme un déchet et à l'entreposer en attendant son stockage définitif. Grâce à plus de 50 années d'expérience de l'entreposage sûr et efficace du combustible usé, il existe un haut niveau de confiance dans les technologies de l'entreposage en piscine et à sec, ainsi que dans leur capacité de faire face à

⁸ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le combustible usé et le retraitement figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

des volumes de plus en plus importants avant la mise en place de sites de stockage définitif pour tous les déchets de haute activité.

33. À ce jour, la Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon et le Royaume-Uni retraitent ou entreposent en vue d'un futur retraitement la plupart de leur combustible usé. Le Canada, les États-Unis, la Finlande et la Suède ont pour l'instant opté pour le stockage définitif direct, mais les États-Unis ont annoncé, en février 2006, un Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), qui prévoit notamment la mise au point de technologies avancées de recyclage qui seront utilisées dans ce pays.

34. La majorité des pays n'ont pas encore choisi une stratégie. Ils entreposent leur combustible usé et se tiennent au courant des nouveautés associées aux deux solutions.

35. Les derniers essais pour la mise en service de l'usine de retraitement de Rokkasho (Japon), ont commencé en mars 2006 et devraient durer 17 mois. Le produit fini fabriqué par l'usine est une poudre MOX, qui a été produite pour la première fois en novembre. La production à l'échelle industrielle devrait débuter au cours du second semestre 2007. La capacité de retraitement maximale de l'usine sera de 800 tonnes d'uranium par an, ce qui peut permettre de retraiter 80 % du combustible usé produit annuellement par le Japon. En Chine, la mise en service sans matières radioactives de la première usine de retraitement expérimentale du pays a été menée à bien. De nouveaux procédés de recyclage sont actuellement mis au point, comme le procédé UREX+ aux États-Unis qui consiste à recycler le combustible nucléaire usé sans séparer le plutonium pur et à convertir les éléments transuraniens séparés en combustible pour réacteurs incinérateurs rapides avancés.

36. En 2006, environ 180 tonnes de combustible MOX d'origine civile ont été chargées à des fins commerciales dans une trentaine de réacteurs à eau sous pression (REP) et deux réacteurs à eau bouillante (REB) en Allemagne, en Belgique, en France et en Suisse. Le pourcentage des assemblages MOX dans le cœur variait entre 25 et 50 %. Aucune augmentation sensible des besoins en combustible MOX n'est prévue d'ici 2010, année au cours de laquelle le Japon prévoit de lancer son programme 'Pluthermal' et de charger du combustible MOX dans 16 à 18 réacteurs de puissance. En Inde, une cinquantaine de grappes de combustible MOX ont récemment été irradiées dans un réacteur à eau lourde sous pression (RELP 220) à titre expérimental.

37. L'usine Belgonucléaire à Dessel a cessé sa production de combustible MOX en août 2006 ; son déclassement devrait s'achever en 2013. Il reste donc deux grands fabricants de combustible MOX, en France et au Royaume-Uni.

A.5. Déchets et déclassement⁹

38. Les programmes de dépôts de déchets des États-Unis, de la Finlande et de la Suède restent les plus avancés, mais il est peu probable que ces pays aient un dépôt en service bien avant 2020. L'installation pilote de confinement des déchets (WIPP), aux États-Unis, est le seul dépôt géologique en service au monde. Depuis 1999, elle accepte les déchets transuraniens à longue période générés par les activités de recherche et la production d'armes nucléaires, mais pas les déchets des centrales nucléaires civiles. L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis a approuvé, en 2006, la première demande de renouvellement d'homologation de la WIPP, soumise en 2004. Ce renouvellement doit être demandé tous les cinq ans. La nouvelle législation adoptée par la France en matière de gestion du combustible usé et de stockage définitif établit le retraitement du combustible usé et le recyclage des matières utilisables comme stratégie nationale, et le stockage définitif en

⁹ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les déchets et le déclassement figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

formations géologiques profondes comme la solution de référence pour les déchets de haute activité à longue période. Cette législation fixe des objectifs pour la demande d'une licence pour un dépôt géologique profond réversible d'ici à 2015, avec une mise en service prévue en 2025, et se prononce également en faveur de l'exploitation d'un réacteur rapide prototype de quatrième génération d'ici à 2020, qui servirait notamment à tester la transmutation des radio-isotopes à longue période (voir aussi le paragraphe 60). En outre, en 2006, le Comité de la gestion des déchets radioactifs du Royaume-Uni a conclu que le stockage en formations géologiques profondes, avec un système solide d'entreposage provisoire jusqu'à la sélection d'un site, était la meilleure option de stockage définitif pour le pays.

39. En novembre, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a déposé, auprès du Service suédois d'inspection de l'énergie nucléaire, une demande de permis pour une usine d'encapsulation à Oskarshamn. L'encapsulation est la première étape vers un stockage définitif par la méthode KBS-3, selon laquelle le combustible est enfermé dans des conteneurs en cuivre et placé dans un socle rocheux à une profondeur d'environ 500 mètres. La décision finale concernant la demande de permis ne devrait être prise qu'après 2009, lorsque la demande relative à un dépôt géologique profond devrait être soumise. Des études de sélection d'un site de stockage définitif sont menées près de Forsmark (Osthammar) et dans la région de Laxemar (Oskarshamn).

40. Le déclassement du site de la centrale nucléaire de Big Rock Point, aux États-Unis, a été achevé en 2006, et le site a retrouvé son état d'origine. Ainsi, à la fin de 2006, neuf centrales avaient été entièrement déclassées dans le monde et leurs sites libérés sans restriction. Dix-sept sont partiellement démantelées et mises en attente sûre, 30 sont en cours de démantèlement avant que leur site puisse être libéré, et 30 autres font l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mises en attente sûre de longue durée.

A.6. Autres facteurs déterminants pour l'avenir de l'électronucléaire

A.6.1. Développement durable et changements climatiques¹⁰

41. La Commission du développement durable des Nations Unies (CDD) a examiné la question de l'énergie pour la première fois à sa neuvième session (CDD-9) en 2001, et toutes les parties ont convenu que « le choix de l'énergie nucléaire relève de la compétence des pays ». Alors que le Sommet mondial pour le développement durable (SMDD) de 2002 a réaffirmé cette conclusion, la CDD a inscrit l'énergie à l'ordre du jour de ses 14^e et 15^e sessions. La CDD-14, en 2006, était une 'session d'examen' visant à analyser l'impact des changements de politique énergétique et des avancées technologiques sur les progrès en matière de développement durable. La 'session d'orientation' correspondante la CDD-15, en mai 2007, ne s'étant pas mise d'accord sur un nouveau texte sur les questions énergétiques, les décisions convenues à la CDD-9 et au SMDD restent les accords CDD en vigueur sur l'énergie.

42. En vertu du Protocole de Kyoto, entré en vigueur en février 2005, la plupart des pays développés doivent limiter leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) durant la 'première période d'engagement' (2008-2012), et ils ont adopté des politiques différentes pour respecter les limites qui y sont énoncées. Toutes ces politiques ne profitent pas à l'électronucléaire, en dépit de ses faibles émissions de GES, mais à long terme, celui-ci devrait constituer une option plus intéressante en raison

¹⁰ De plus amples informations sont disponibles d'une part sur le site IAEA.org dans d'autres documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007*, et d'autre part, à l'adresse : <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/> dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel sur les aspects énergétiques du développement durable et les changements climatiques et à l'adresse : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

des limites imposées en la matière. S'agissant des réductions d'émissions après la première période d'engagement, la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques a décidé, à sa 11^e session en 2005, d'entamer les discussions dans le cadre d'un groupe de travail spécial, qui s'est déjà réuni trois fois, en mai et novembre 2006 et en mai 2007. Les discussions sont toujours à un stade préliminaire et n'ont pas encore porté sur des questions précises telles que l'exclusion actuelle des projets électronucléaires du mécanisme pour un développement propre et de la mise en œuvre conjointe.

A.6.2. Considérations économiques

43. La structure des coûts des centrales, qui sont groupés en début de période, fait que leur construction coûte relativement cher, mais que leur exploitation est relativement bon marché. Celles qui sont bien exploitées continuent donc en général de produire de l'électricité à un prix concurrentiel. Toutefois, pour la construction de nouvelles centrales, la compétitivité économique de l'électronucléaire dépend de plusieurs facteurs, à savoir des autres options disponibles, de la demande globale d'électricité dans un pays et de la rapidité de sa croissance, de la structure du marché et du contexte des investissements, des contraintes en matière d'environnement et des risques d'investissement liés à d'éventuels retards ou changements d'ordre politique et réglementaire. La compétitivité économique varie par conséquent en fonction du pays et de la situation.

44. Au Japon et en République de Corée, le coût relativement élevé des autres options énergétiques favorise la compétitivité de l'électronucléaire. En Inde et en Chine, les besoins énergétiques en croissance rapide incitent à développer toutes les options. En Europe, les prix élevés de l'électricité et du gaz naturel et les limites imposées en matière d'émissions de GES dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne jouent en faveur de nouvelles centrales nucléaires. Aux États-Unis, la loi sur l'énergie de 2005 a nettement renforcé les arguments en faveur de la construction de nouvelles centrales. Auparavant, les nouvelles centrales nucléaires ne représentaient pas un investissement intéressant en raison de l'abondance de charbon et de gaz naturel à bas prix, de l'absence de limites aux émissions de GES et des risques d'investissement liés au manque d'expérience récente en matière d'autorisation de la construction de nouvelles centrales. La nouvelle loi sur l'énergie, qui prévoit notamment des garanties de prêt, la prise en charge par le gouvernement des coûts associés à certains retards potentiels dans les procédures de délivrance des autorisations et un crédit d'impôt sur la production pour une capacité nucléaire avancée maximale de 6 000 MWe, a apporté des arguments suffisamment convaincants pour que des compagnies et consortiums annoncent de possibles demandes de licence combinée, qui concerneraient environ 25 nouveaux réacteurs aux États-Unis.

A.6.3. Sûreté¹¹

45. Les indicateurs de sûreté, tels que ceux publiés par l'Association mondiale des exploitants nucléaires et reproduits dans les figures A-2 et A-3, se sont nettement améliorés dans les années 90. Toutefois, dans certains domaines, les progrès stagnent depuis quelques années. En outre, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant de vastes possibilités d'amélioration.

¹¹ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) et sur le site : <http://www-ns.iaea.org/>.

46. Des informations et les évolutions récentes concernant la sûreté pour l'ensemble des applications nucléaires sont présentées plus en détail dans le *Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire* (GC(51)/INF/2) que l'AIEA publie chaque année.

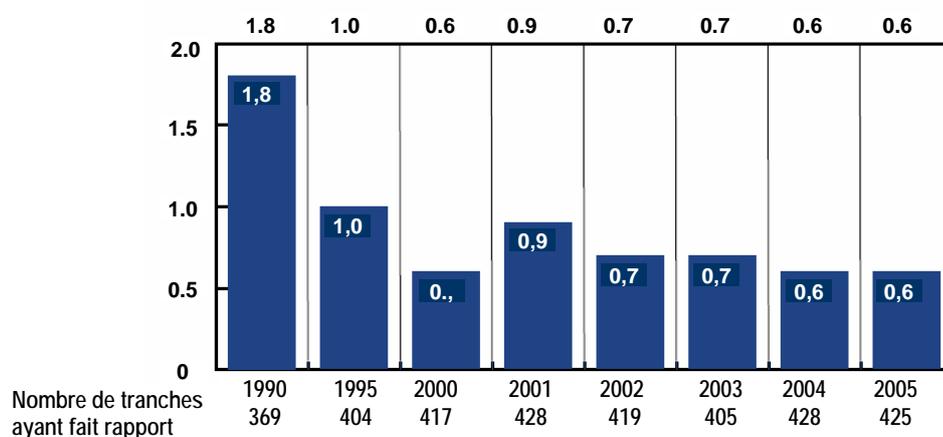


FIG. A-2 : Arrêts d'urgence non planifiés pour 7 000 heures de criticité.
Source : indicateurs de performance WANO en 2005.

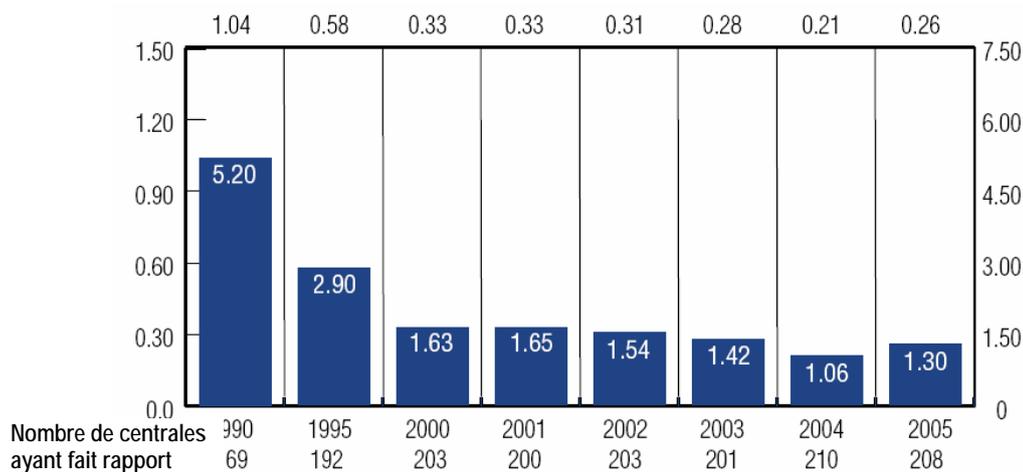


FIG. A-3 : Taux d'accidents industriels dans les centrales nucléaires par million d'heures ouvrées.
Source : indicateurs de performance WANO en 2005.

A.6.4. Résistance à la prolifération¹²

47. Lors de la Conférence d'examen du TNP de 2005, le Directeur général a proposé sept mesures pour renforcer le régime de non-prolifération : réaffirmer l'objectif de l'élimination des armes nucléaires ; renforcer les pouvoirs de vérification de l'Agence ; renforcer le contrôle des phases du cycle du combustible sensibles du point de vue de la prolifération ; sécuriser et contrôler les matières nucléaires (notamment en renforçant la Convention sur la protection physique des matières nucléaires et en réduisant le plus possible la quantité d'uranium hautement enrichi utilisé à des fins civiles) ;

¹² De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la résistance à la prolifération et les garanties figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) et sur le site : <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>.

démontrer un engagement en faveur du désarmement nucléaire ; renforcer le mécanisme relatif au non-respect du TNP ; et répondre aux véritables préoccupations en matière de sécurité des États. La question du contrôle plus strict des éléments du cycle du combustible nucléaire sensibles du point de vue de la prolifération a été examinée à la conférence intitulée ‘Nouveau cadre pour l’utilisation de l’énergie nucléaire au XXI^e siècle : assurances en matière d’approvisionnement et de non-prolifération’ mentionnée dans la section A.3.

B. Fission et fusion avancées

B.1. Fission avancée¹³

B.1.1. Réacteurs à eau ordinaire

48. AREVA NP a mis au point en France et en Allemagne le réacteur européen à eau sous pression (EPR) de grande puissance pour répondre aux exigences des compagnies d’électricité européennes et profiter des économies d’échelle grâce à un niveau de puissance plus élevé que celui de la série la plus récente de REP existant en France (série N4) et en Allemagne (série Konvoi). En collaboration avec des partenaires internationaux de Finlande, de France, des Pays-Bas et de Suisse, AREVA NP est en train d’effectuer en Allemagne l’étude de conception du réacteur SWR-1000, un REB avancé doté de dispositifs de sûreté passive.

49. Au Japon, les avantages de la standardisation et de la construction en série ont été étendus aux réacteurs à eau bouillante (RAEB). Les deux premiers RAEB ont commencé l’exploitation commerciale en 1996 et 1997, suivis de deux autres en 2005 et 2006. Deux RAEB sont en construction à Taiwan (Chine). Un programme d’élaboration a été lancé en 1991 pour le RAEB-II avec comme objectif de réduire sensiblement les coûts de la production électronucléaire, en partie à travers l’augmentation de la puissance et des économies d’échelle. Le premier RAEB-II devrait être mis en service à la fin des années 2010. Toujours au Japon, les études de base du REP avancé de grande puissance ont été achevées pour les tranches 3 et 4 de la centrale de Tsuruga de la Japan Atomic Power, et une version plus puissante, l’APWR+, est au stade de conception.

50. En République de Corée, on est en train de tirer parti des avantages de la standardisation et de la construction en série avec les réacteurs nucléaires standard (KSNP). Huit KSNP sont en cours d’exploitation commerciale. L’expérience accumulée sert de base pour la mise au point d’une version améliorée de ce réacteur, le réacteur de puissance optimisé (OPR), dont l’exploitation commerciale des premières unités est prévue en 2010 et 2011. Le réacteur coréen de la prochaine génération, dont la mise au point a commencé en 1992, a à présent été baptisé réacteur de puissance avancé 1400 (APR-1400) et sera plus puissant pour profiter des économies d’échelle. L’exploitation du premier APR-1400 devrait démarrer en 2012.

51. Aux États-Unis, les modèles d’un réacteur de forte puissance (le 80+ de Combustion Engineering System) – un REP avancé – et d’un REB de grande puissance (le RAEB de General Electric) ont été agréés en 1997. Les modèles AP-600 et AP-1000 de Westinghouse dotés de systèmes

¹³ De plus amples informations sont disponibles d’une part sur le site AIEA.org dans d’autres documents ayant trait au *Rapport d’ensemble sur la technologie nucléaire 2007*, d’autre part à l’adresse : <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>, dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel sur les activités de l’AIEA ayant trait aux réacteurs à fission avancée.

de sûreté passive, ont été agréés en 1999 et 2006 respectivement. Une équipe internationale dirigée par Westinghouse est en train de mettre au point un modèle modulaire intégré d'IRIS (réacteur international innovant et sécurisé) de 360 MWe équipé d'un cœur capable de fonctionner sur un cycle du combustible de quatre ans. L'homologation du modèle est prévue pour 2008-2010. General Electric est en train d'étudier un modèle de REB européen simplifié de forte puissance qui associe des économies d'échelle et des systèmes modulaires de sûreté passive. Tant le modèle intégré modulaire d'IRIS que ce modèle sont actuellement soumis à un examen réglementaire.

52. En Fédération de Russie, les versions évolutives des centrales VVER-1000 (V-320) comprennent l'AES-2000 de 1 200 MWe et la VVER-1000 (V-392). Le premier VVER-1000 (V-392) a été connecté au réseau à Tianwan (Chine) en 2006. D'autres unités sont en construction en Chine, en Inde et en République islamique d'Iran. Deux unités sont prévues au site de Novovoronezh en Russie. Celle-ci a en outre commencé la mise au point d'un modèle VVER-1500 plus puissant. En juillet, elle a créé avec le Kazakhstan une co-entreprise pour achever la mise au point d'un réacteur VBER-300 de 200 à 400 MWe qui sera utilisé pour des centrales de coproduction électronucléaire flottantes ou terrestres.

53. La compagnie nucléaire nationale chinoise (CNNC) a mis au point le modèle AC-600, et est actuellement en train d'élaborer le modèle CNP-1000 pour la production d'électricité. Elle travaille en outre actuellement à la conception du modèle QS-600e/w pour la production d'électricité et le dessalement de l'eau de mer.

B.1.2. Réacteurs à eau lourde

54. Au Canada, le réacteur avancé CANDU de la société Énergie atomique du Canada limitée (EACL) utilise du combustible à l'uranium légèrement enrichi pour réduire la taille du cœur du réacteur, ce qui diminue la quantité d'eau lourde nécessaire pour modérer le réacteur et permet d'utiliser de l'eau ordinaire comme fluide de refroidissement. En outre, dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF), l'EACL est en train de mettre au point un modèle innovant modéré à l'eau lourde et refroidi par eau supercritique. Ces réacteurs seront en outre dotés d'un système de circulation naturelle à évacuation passive de la chaleur dans la mesure du possible, et d'un système de confinement à évacuation passive de la chaleur.

55. En 2005 et 2006, l'Inde a connecté la première des deux tranches du modèle de réacteur à eau lourde de 540 MWe à Tarapur. Elle est en outre en train de concevoir un nouveau réacteur à eau lourde de 700 MWe ainsi qu'un réacteur à eau lourde avancé, modéré par eau lourde, refroidi par eau ordinaire bouillante, à tubes de force verticaux doté de systèmes de sûreté passive et optimisé pour utiliser du combustible au thorium.

B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz

56. Il y a actuellement 18 réacteurs refroidis par gaz en service utilisant du dioxyde de carbone et deux réacteurs d'essai refroidis à l'hélium dans le monde. PBMR (Pty) Ltd, la compagnie sud-africaine qui produit le réacteur modulaire à lit de boulets, est en train de mettre au point un réacteur modulaire à lit de boulets de 165 MWe qui devrait être mis en service aux alentours de 2010. Le gouvernement sud-africain a alloué un financement initial pour le projet et des commandes de composants essentiels ont déjà été passées. En Chine, les travaux se poursuivent sur les essais de sûreté et l'amélioration de la conception du réacteur refroidi par gaz à haute température (HTR-10) de 10 MWe et des plans sont en place pour la conception et la construction d'un prototype de ce réacteur appelé HTR-PM.

57. Au Japon, un réacteur d'essais techniques à haute température de 30 MWth a été mis en service en 1998, et les travaux se poursuivent sur les essais de sûreté et le couplage à une unité de production d'hydrogène. Le prototype d'un réacteur de puissance de 300 MWe est aussi à l'étude.

58. La Fédération de Russie et les États-Unis continuent les travaux de recherche-développement sur un réacteur modulaire refroidi par hélium et couplé à une turbine à gaz (RMH-TG) pour brûler du plutonium. La France possède un programme actif de R-D sur les concepts à la fois de réacteurs thermiques et de réacteurs rapides refroidis par gaz, et aux États-Unis, le département de l'énergie poursuit ses efforts sur l'homologation du combustible avancé de réacteurs refroidis par gaz. Pour démontrer des aspects technologiques clés des réacteurs rapides refroidis par gaz, la mise en service d'un réacteur expérimental d'environ 50 MWth est prévue aux alentours de 2017 en France.

B.1.4. Réacteurs rapides refroidis par métal liquide

59. En Chine, le réacteur rapide expérimental chinois de 25 MWe de type piscine refroidi par sodium est en construction ; il devrait diverger pour la première fois au milieu de l'année 2009 et être connecté au réseau au milieu de l'année 2010. Les deux prochaines étapes de la mise au point seront le prototype d'un réacteur rapide de 600 MWe, pour lequel les travaux de conception ont commencé en 2005, et un réacteur rapide de démonstration de 1 000 à 1 500 MWe.

60. En France, le réacteur rapide Phénix sera exploité pendant quatre cycles d'irradiation supplémentaires avant d'être mis à l'arrêt en 2009. Il fera des essais d'irradiation à l'appui du programme français de R-D en transmutation et pour soutenir la recherche sur les modèles innovants. Dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF), la France prévoit de mettre en service le prototype d'un réacteur rapide refroidi au sodium de 250 à 600 MWe aux alentours de 2020 pour démontrer l'amélioration des paramètres économiques et des caractéristiques de sûreté.

61. En Inde, le réacteur surgénérateur à neutrons rapides d'essai est en service depuis 1985, et son prototype de 500 MWe est actuellement en construction à Kalpakkam et devrait être mis en service d'ici septembre 2010.

62. Au Japon, les travaux préparatoires ont commencé en 2005 sur les modifications nécessaires au prototype du surgénérateur MONJU avant son redémarrage. Pour élaborer des combustibles et des matériaux avancés, et la technologie pour l'incinération et la transmutation des actinides mineurs, le réacteur JOYO, réacteur surgénérateur expérimental à neutrons rapides, commencera l'irradiation d'acier ferritique renforcé par dispersion d'oxyde, de combustible MOX à l'uranium-plutonium contenant 5 % d'américium, et de MOX au neptunium et à l'américium.

63. En République de Corée, l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique a mené des travaux de recherche, d'étude et de développement technologique sur le modèle avancé KALIMER-600 de réacteur à neutrons rapides de 600 MWe. La conception du modèle a été finalisée en 2006. À partir de 2007, le développement de la technologie du réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (SFR) entrera dans une nouvelle phase dans le cadre du projet de collaboration SFR de Génération IV.

64. Exploité depuis 26 ans, le réacteur rapide BN-600 en Russie est le plus grand réacteur rapide en service du monde. Le BN-800 de 800 MWe est en construction et devrait être mis en service en 2012. La Russie est aussi en train d'élaborer divers concepts pour des réacteurs rapides avancés refroidis par sodium et des réacteurs refroidis par métaux lourds liquides, en particulier le concept de réacteur refroidi par plomb BREST-OD-300 et celui du réacteur SVBR-75/100 refroidi par mélange eutectique de plomb et de bismuth.

65. Au États-Unis, dans le cadre des travaux du Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), la planification des travaux initiaux de R-D est en cours pour un prototype de réacteur incinérateur avancé (ABTR) pour démontrer la transmutation des actinides dans un spectre rapide ainsi que les technologies innovantes et les caractéristiques de conception importantes pour les usines ultérieures commerciales de démonstration. Dans le cadre du GIF, les activités des États-Unis sont centrées sur les réacteurs rapides refroidis par gaz, les réacteurs rapides refroidis par plomb, et les petits réacteurs modulaires refroidis au sodium.

B.1.5. Systèmes alimentés par accélérateur

66. Les accélérateurs de particules combinés avec des réacteurs nucléaires sous-critiques ont la capacité de produire des déchets radioactifs à plus courte durée de vie par rapport aux autres réacteurs et de transmuter les actinides et d'autres produits de fission à longue durée de vie.

67. En Chine, les activités de R-D sont centrées sur la physique et la technologie des accélérateurs de protons de forte puissance, la physique des réacteurs de sources externes alimentés par des cœurs sous-critiques, ainsi que sur des données nucléaires et des études de matériaux. Au Japon, l'Agence japonaise de l'énergie atomique a proposé un cœur sous-critique rapide refroidi par mélange eutectique de plomb et de bismuth d'une puissance de 800 MWt, et les études de conception pour une installation expérimentale de transmutation ont démarré. En République de Corée, la R-D sur le système alimenté par accélérateur HYPER (réacteur hybride à extraction de puissance) de l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique, se trouve au troisième stade d'un programme de dix ans lancé en 1997. Il comprend l'achèvement de l'étude de conception du cœur de ce réacteur et la poursuite de l'étude des technologies clés.

68. En Europe, les programmes de R-D en cours dans les pays suivants : Allemagne, Belgique, Espagne, France, Italie et Suède, sont en train de converger vers la démonstration des aspects fondamentaux du concept du système alimenté par accélérateur. Ils comprennent les projets intégrés EUROTRANS et EUROPART dans les programmes cadres de l'Union européenne. EUROTRANS est en train d'élaborer un avant-projet et des technologies d'appui pour un système alimenté par accélérateur européen de démonstration. EUROPART est en train de mettre au point des technologies du cycle du combustible pour compléter celles du système d'EUROTRANS.

69. En Russie, les faits marquants récents concernant la R-D sur les systèmes alimentés par accélérateur comprennent l'élaboration et la construction d'un assemblage sous-critique à l'Institut commun de recherche nucléaire de Dubna, et la justification des modèles de réacteurs à sels fondus critiques et sous-critiques par un cycle du combustible nucléaire fermé au centre scientifique russe de l'Institut Kurchatov à Moscou.

B.1.6. INPRO et GIF

70. Avec l'adhésion en 2006 du Bélarus, du Japon, du Kazakhstan et de la Slovaquie, le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'Agence compte désormais 28 membres. Il offre une instance internationale ouverte pour l'étude des options électronucléaires et des prescriptions connexes. Il aide à mettre en place des compétences pour l'élaboration et la mise en œuvre de systèmes d'énergie nucléaire innovants, et assiste les États Membres dans la coordination des projets en collaboration connexes. L'INPRO a élaboré une méthodologie, applicable à la fois aux pays développés et aux pays en développement, pour évaluer les systèmes d'énergie nucléaire innovants dans les domaines suivants : économie, sûreté, environnement, gestion des déchets, résistance à la prolifération, protection physique et infrastructure. Onze évaluations de ces systèmes sont actuellement en cours. Les activités de la phase 2 ont démarré en 2006. Elles comprennent la poursuite de l'élaboration, à la lumière des informations en retour

obtenues dans les études d'évaluation actuelles, de la méthodologie INPRO et du manuel de l'utilisateur, et la détermination d'options novatrices concernant les établissements et l'infrastructure pour faciliter la mise en œuvre des systèmes d'énergie innovants, y compris : l'examen des approches régionales, l'harmonisation des processus d'autorisation et des prescriptions de sûreté, et de nouvelles méthodes de financement mettant l'accent sur les besoins des pays en développement. La phase 2 coordonnera aussi les projets en collaboration, et notamment la détermination des besoins en R-D. En particulier, l'INPRO établira des prescriptions communes des utilisateurs pour les systèmes d'énergie nucléaire innovants, en mettant l'accent sur les réacteurs de faible ou moyenne puissance, et déterminera, en collaboration avec les détenteurs et les utilisateurs de la technologie, les mesures nécessaires pour la mise au point et l'utilisation de ces réacteurs.

71. Avec l'adhésion en 2006 de la Chine et de la Russie, le Forum international Génération IV (GIF) compte désormais 13 membres. À travers un système de contrats et d'accords, il coordonne les activités de recherche sur les six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems* : les réacteurs rapides refroidis par gaz, les réacteurs refroidis par alliage de plomb liquide, les réacteurs à sels fondus, les réacteurs refroidis par sodium liquide, les réacteurs refroidis par eau supercritique et les réacteurs à gaz à très haute température. En 2006, les membres du GIF intéressés ont signé quatre arrangements ayant trait aux systèmes sur la collaboration concernant les systèmes de réacteurs rapides refroidis par sodium, les systèmes de réacteurs rapides refroidis par gaz, les systèmes de réacteurs à très haute température refroidis par gaz et les systèmes de réacteurs refroidis par eau supercritique. Ces accords fournissent un cadre pour la participation des pays membres du GIF à des travaux de recherche-développement sur diverses technologies menés en collaboration.

B.2. Fusion

72. La recherche en fusion nucléaire contrôlée progresse régulièrement, avec comme prochain grand objectif la combustion autonome du plasma. Des progrès sensibles ont été accomplis ces dernières années vers la réalisation de cet objectif en utilisant soit la puissance et les rayonnements laser dans la méthode dite du confinement inertiel, soit les champs magnétiques pour le confinement des systèmes communément appelés systèmes tokamak, pour confiner et fusionner des noyaux légers, du deutérium et du tritium. De nouvelles installations de grande taille sont actuellement en construction, la plus importante étant le réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) qui utilisera le confinement magnétique. Les partenaires à cette entreprise scientifique internationale unique visant à construire l'installation expérimentale de fusion la plus grande du monde représentent plus de la moitié de la population mondiale. Le 21 novembre 2006, les parties à ITER ont signé deux accords officiels pour la construction de ce réacteur à Cadarache (France) : l'accord sur l'établissement de l'Organisation internationale d'énergie de fusion pour la mise en œuvre commune du projet ITER et l'accord sur les privilèges et immunités de cette organisation. Le Directeur général de l'AIEA est le dépositaire de ces deux accords dont les processus de ratification auront lieu dans les capitales nationales dans le courant de l'année prochaine. ITER, qui signifie 'la voie' en latin, est une étape importante de l'utilisation pacifique de la fusion nucléaire et sera le moteur de l'essentiel de la recherche sur la prochaine génération des systèmes de fusion à confinement magnétique, en vue de la mise au point de la science et de la technologie nécessaires pour construire un réacteur de fusion appelé 'DEMO'.

73. Le confinement inertiel est l'autre principale option et sera appuyée par plusieurs grandes installations en cours de conception ou de construction, à savoir l'installation nationale d'ignition aux États-Unis, l'installation Laser Mégajoule en France et le programme d'expériences d'ignition rapide au Japon.



FIG. B-1 : Diagnostic des plasmas de fusion (plasma incandescent dans le tokamak ASDEX Upgrade en Allemagne).

74. Il y a encore d'énormes problèmes technologiques à résoudre dans l'exploitation de l'énergie de fusion, problèmes trop ardues – des points de vue scientifique, technologique et des besoins en ressources – pour qu'un seul pays ou un petit groupe de pays puisse maintenir l'impulsion nécessaire de la recherche sur de longues périodes. L'AIEA fournit une instance pour aider à promouvoir la coopération internationale, comme démontré par la conférence sur l'énergie de fusion de 2006 organisée à Chengdu (Chine) en octobre. Plus de 700 scientifiques et ingénieurs spécialistes de la fusion de 39 pays y ont participé et échangé des données sur leurs découvertes récentes et leurs nouvelles réalisations.

75. Les études de la fusion expérimentale sont largement tributaires de la capacité de suivre et d'analyser les caractéristiques du plasma (figure B-1). Une nouvelle base de données sur le diagnostic lancée par l'AIEA représente un pas important pour asseoir ces études sur des procédures et des données acceptées au plan international. De nouvelles sections efficaces pour certains processus d'échange de charge ont été mesurées et/ou calculées pour estimer la température et la pression du plasma.

C. Données atomiques et nucléaires

76. Un nombre croissant de pays demandent de plus en plus de bases de données atomiques et nucléaires actualisées et plus précises, lesquelles sont nécessaires pour des analyses judicieuses et crédibles des applications nucléaires, y compris de l'énergie de fission. L'approbation d'ITER a entraîné une hausse similaire des activités de recherche dans le domaine de la fusion.

77. La plupart des travaux d'élaboration et de création de base de données de qualité nécessitent l'encouragement de l'Agence. Les importantes initiatives internationales et nationales de ces dernières années comprennent l'assemblage et la diffusion du Fichier conjoint de données évaluées sur la fission et la fusion (JEFF-3.1) par l'AEN/OCDE en mai 2005, et du Fichier de données nucléaires évaluées (ENDF/B-VII) par les États-Unis d'Amérique en décembre 2006. Ces deux bases contiennent des données nucléaires recommandées qui incorporent les progrès accomplis à travers les mesures directes récentes, les projets d'élaboration de données de l'Agence, et les études de modélisation qui reflètent la meilleure compréhension d'un large éventail de processus nucléaires. En conséquence, poursuivre l'amélioration de la qualité des diverses sections efficaces des réactions neutroniques importantes se dégage comme une conséquence des mesures détaillées effectuées aux États-Unis et en Europe.

78. Les faits marquants survenus en 2006 comprennent la finalisation d'une base de données de qualité sur les sections efficaces des neutrons pour utilisation directe dans les études du cycle du combustible au thorium et à l'uranium ; la réévaluation exhaustive des normes des sections efficaces des neutrons ; des données atomiques et moléculaires pour le diagnostic des plasmas de fusion ; et une base sur les sections efficaces pour la production optimale de radionucléides thérapeutiques en médecine nucléaire. D'importantes données de covariance ont été produites pour quantifier les incertitudes des sections efficaces du thorium 232 et du protactinium 231 et 232, et ces fichiers de données ont été rapidement adoptés dans les bibliothèques nationales et internationales d'applications nucléaires. De même, une base de données sur les normes de sections efficaces a été adoptée par la communauté de physique nucléaire. Ces données ont été réévaluées pour une série choisie de réactions, et servent de fondement et de référence pour toutes les mesures et les évaluations ultérieures de ces importants paramètres nucléaires.

D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

D.1. Accélérateurs

79. La science des matériaux et la recherche biomédicale jouent un rôle moteur en ce qui concerne les accélérateurs, les nouvelles techniques d'analyse, et l'amélioration des instruments nucléaires. En régime de faible énergie, des appareils compacts de faible voltage sont en train d'être mis au point et affectés à des applications de spectrométrie de masse par accélérateur à la mesure du radiocarbone. À l'autre bout de l'échelle, les sources de lumière synchrotron sont de plus en plus demandées par les grandes communautés d'utilisateurs. Les synchrotrons suivants sont actuellement en train d'être mis en service : Diamond au Royaume-Uni, Soleil en France et l'Australian Sychrotron en Australie. SESAME en Jordanie, Indus-2 en Inde et Candle en Arménie sont en phase de conception ou de construction. Les sources de faisceaux neutroniques intenses sont largement demandées pour les applications de la recherche biomédicale et de la recherche sur les matériaux, ainsi que pour les études de l'endommagement par irradiation de matériaux susceptibles d'être utilisés dans les environnements extrêmes d'exploitation de réacteurs à fission et à fusion avancées.

D.2. Réacteurs de recherche

80. Les principales applications de la plupart des réacteurs de recherche restent la production de radio-isotopes, les applications des faisceaux de neutrons, le dopage du silicone et l'irradiation des matériaux pour les systèmes d'énergie nucléaire, ainsi que l'enseignement et la formation pour la mise en valeur des ressources humaines. Les caractéristiques et les capacités des réacteurs de recherche, et leur exploitation et leur utilisations sont très variées. Les tableaux D-1 et D-2 et les figures D-1 et D-2 sont basés sur les données disponibles dans la base de données sur les réacteurs de recherche (RRDB) de l'Agence.

81. Parmi les nouveaux réacteurs de recherche mentionnés comme étant en construction dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2006*, le réacteur australien de type piscine à eau ordinaire (réacteur OPAL) a divergé pour la première fois le 12 août 2006, et a atteint son plein régime d'exploitation le 3 novembre 2006. Le réacteur de recherche avancé chinois devrait devenir opérationnel d'ici 2007 avec la production de radio-isotopes, le dopage de silicone et les applications des faisceaux de neutrons comme activités principales. Le réacteur TRIGA-II est en phase de mise en service.

82. Le réacteur OPAL est un réacteur de type piscine de 20 MW qui utilise du combustible à l'uranium faiblement enrichi (UFE) (combustible au silicide d'uranium) et est refroidi par eau. C'est un réacteur de recherche à usage multiple qui servira à la production de radio-isotopes, à des services d'irradiation et à la recherche sur les faisceaux de neutrons. Son cœur compact est conçu pour une performance élevée de production de neutrons. Huit instruments à faisceaux de neutrons sont prévus sur le site de ce réacteur. Cette installation peut encore être agrandie et accueillir un deuxième bâtiment de guide à neutrons. Une série d'équipements permettra de faire des études à des températures, des pressions et des champs magnétiques différents.

83. Les installations ci-dessus devraient être ouvertes à la communauté nationale et internationale d'utilisateurs sur la base du partage du temps, comme dans celle de Grenoble (France) et le réacteur FRM-II en Allemagne.

84. Avec le regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire, et l'évolution dans le domaine de l'énergie de fusion, l'utilisation des réacteurs de recherche pour l'étude des matériaux continue de susciter beaucoup d'intérêt, et ces réacteurs auront un rôle important à jouer dans l'élaboration de matériaux pour les réacteurs avancés. En outre, la collaboration régionale et le travail en réseau permettant d'accroître l'efficacité de la gestion, de l'utilisation et du partage des ressources et des compétences en ce qui concerne les réacteurs de recherche, en particulier pour les applications des faisceaux de neutrons et la production de radio-isotopes pour répondre aux besoins régionaux.

Tableau D-1. Répartition géographique des réacteurs de recherche en fonction de leur état fonctionnel

	En exploitation	À l'arrêt	Déclassés	En construction	Prévus	Total
Afrique	9	1	0	1	1	12
Amérique	66	127	73	2	1	269
Asie et Pacifique	55	18	10	6	1	90
Europe	115	96	87	1	1	300
Total	245	242	170	10	4	671

Tableau D-2. Répartition géographique des réacteurs de recherche en exploitation en fonction de leur niveau de puissance

	$P \leq 100$ kW	$0.1 < P \leq 1$ MW	$1 < P \leq 10$ MW	$P > 10$ MW	Total
Afrique	2	2	2	3	9
Amérique	30	19	13	4	66
Asie et Pacifique	23	6	15	11	55
Europe	65	11	18	21	115
Total	120	38	48	39	245

85. Le programme sur la réduction de l'enrichissement pour les réacteurs de recherche et d'essai (RERTR) vise à convertir les réacteurs de recherche utilisant du combustible à l'uranium hautement enrichi (UHE) à l'utilisation de combustible à l'uranium faiblement enrichi (UFE). Quarante huit réacteurs de recherche étaient convertis à l'utilisation de combustible à l'UFE à la fin de 2006, et une cinquantaine d'autres peuvent l'être avec le combustible à l'UFE disponible. Toutefois, pour plusieurs réacteurs de recherche spécifiques, il faut des combustibles à l'U-Mo à très haute densité pour la conversion de l'UHE à l'UFE, en particulier pour certaines opérations. L'élaboration de tels combustibles est aussi utile pour élargir les options de la partie terminale pour la gestion du combustible usé des réacteurs de recherche, car ils pourront être retraités avec les technologies et les installations disponibles actuellement. L'appui continu pour la coordination internationale de

l'élaboration et de l'homologation des combustibles à l'UFE à haute densité est essentiel à cet égard. Les essais initiaux d'irradiation de combustibles à l'U-Mo à très haute densité en dispersion ont, depuis la fin des années 90, établi le comportement prometteur de ces combustibles en matière d'irradiation. Les expériences ultérieures effectuées dans différents pays ont montré les points faibles du comportement de ces combustibles à des puissances et des températures élevées. Des examens post-irradiation détaillés indiquent que les problèmes de performance du combustible sont imputables non pas à la performance des particules du combustible à l'U-Mo, mais au gonflement de la couche de réaction qui se forme entre le combustible et la matrice d'aluminium pendant l'irradiation. Compte tenu de la demande en combustibles faiblement enrichis à très haute densité, il faut un programme détaillé sur le développement de la fabrication de ces combustibles, la caractérisation hors réacteur, des essais d'irradiation, des examens post-irradiation et l'évaluation et la modélisation de la performance. Plusieurs solutions possibles sont disponibles pour remédier aux problèmes de performance de combustible connus : elles vont de modifications relativement mineures du combustible et des propriétés chimiques de la matrice, au remplacement de la matrice d'aluminium par un autre matériau, ou à l'élimination complète de la matrice (combustible monolithique). Toutes ces variantes sont en train d'être étudiées en collaboration par l'Allemagne, l'Argentine, le Canada, les États-Unis, la France, la République de Corée et la Russie. Il ressort des résultats d'essais post-irradiation rapportés récemment pour différentes expériences que l'addition de quelque 2 à 5 % de silicone à la phase d'aluminium des combustibles à l'U-Mo en dispersion permet de résoudre le problème du gonflement aux puissances et aux températures élevées. Des travaux de recherche intensifs sont en cours en vue de la mise au point d'un combustible monolithique à l'U-Mo de très haute densité.

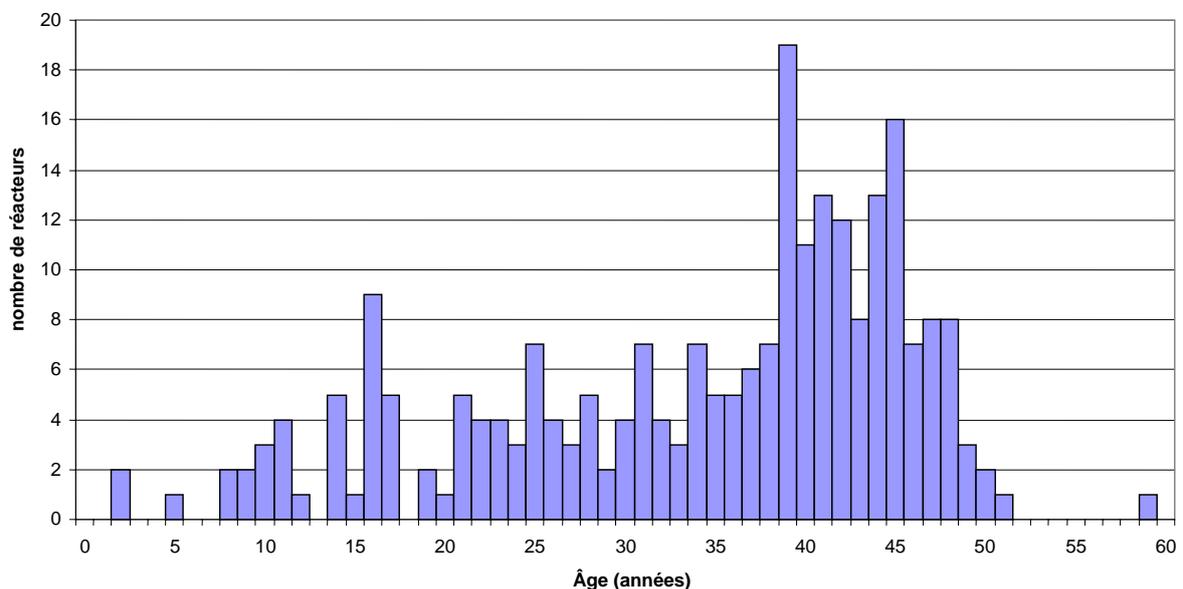


FIG. D-1 : Répartition par âge des réacteurs de recherche en service.

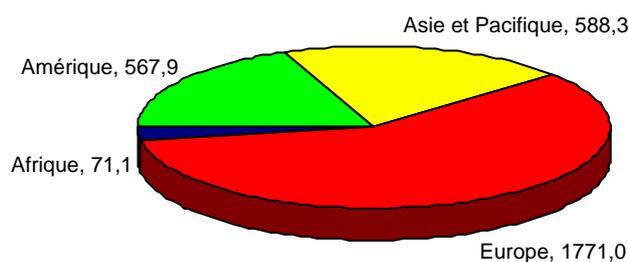


FIG. D-2 : Puissance installée des réacteurs de recherche en service en MW (Total = 2 938,2 MW)

E. Applications des radio-isotopes et technologie des rayonnements

E.1. Applications des radio-isotopes dans le domaine de la santé¹⁴

86. Les radio-isotopes contribuent de manière sensible à l'amélioration des soins de santé dans la plupart des pays. Le nombre de procédures médicales mettant en jeu l'utilisation des isotopes dans le monde est en hausse, avec une augmentation comparable du nombre de procédures nécessitant différents isotopes, par exemple en médecine nucléaire diagnostique et en radiothérapie. Plus de 60 réacteurs de recherche à travers le monde jouent un rôle central dans la production d'isotopes médicaux, et au moins 11 réacteurs sont en construction ou prévus dans un certain nombre de pays. Il ressort d'une récente enquête de l'Agence¹⁵, qu'il y a en outre environ 350 cyclotrons dans le monde, dont un grand nombre servent à produire des isotopes pour la tomographie à émission de positons (PET).

87. Les hausses les plus importantes des besoins récents en isotopes sont d'une part celle du fluor 18 produit par les cyclotrons comme fluoro18deoxyglucose (FDG/¹⁸FDG), utilisé pour les applications de PET dans la détection, la détermination du stade et le suivi du traitement de divers types de cancers, et d'autre part celle du lutétium 177 produit par les réacteurs pour la radiothérapie et servant par exemple à marquer les peptides pour le traitement des tumeurs neuroendocrines ou les phosphonates dans le traitement palliatif de la douleur osseuse. En outre, il y a une forte demande d'yttrium 90 pour la radiothérapie, avec comme conséquence un intérêt accru pour l'isolement et la purification du strontium 90, le radionucléide parent, à partir du combustible utilisé. L'accroissement du nombre d'unités de PET dans les centres médicaux se traduit aussi par un intérêt accru pour les radionucléides émetteurs de positons produits par les générateurs de radio-isotopes, en particulier le germanium 68/gallium 68. Ces générateurs servent non seulement à conduire des études de PET dans les centres

¹⁴ De plus amples informations sont disponibles sur le site IAEA.org dans d'autres documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007*.

¹⁵ Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States, 2006, IAEA-DCRP/CD.

qui ne disposent pas de cyclotron, mais aussi à améliorer la qualité de l'information provenant de l'imagerie par PET des tumeurs avec des produits du gallium 68. Les isotopes du cuivre suscitent un intérêt accru en raison des avantages de l'utilisation du cuivre 64/cuivre 62 pour l'imagerie par PET et la dosimétrie.

E.2. Technologie des rayonnements

88. En 2006, trois grandes réunions internationales, à savoir la réunion internationale sur le radiotraitement, le 11^e colloque de Tihany sur la radiochimie et le 7^e colloque international sur les rayonnements ionisants et les polymères, ont été tenues sur les aspects fondamentaux et appliqués de la technologie des rayonnements, parmi lesquels le greffage par irradiation des polymères a été largement débattu. Les rayonnements fournissent d'excellents moyens de greffage, lequel est défini comme le fait d'attacher un matériau différent à un autre ou de le faire pousser sur l'ossature de ce matériau.

E.2.1. Greffage par irradiation des polymères

89. Il ressort des tendances actuelles de la R-D que le greffage par irradiation des polymères évolue aujourd'hui dans trois grandes directions, à savoir les adsorbants, les membranes et l'utilisation en médecine et en biotechnologie. Avec les polymères, le matériau 'différent' est le plus souvent un monomère et l'ossature' un polymère ou un autre solide. Une liaison chimique se forme alors entre le greffon et le matériau. La figure E-1 ci-dessous présente un exemple de l'évolution des applications industrielles du radiotraitement, y compris le greffage des polymères, au Japon.

Adsorbants polymériques

90. La polymérisation par greffage est appliquée en industrie dans la technologie de production des adsorbants d'ions métalliques et de gaz malodorants. La R-D sur la synthèse des adsorbants d'ions métalliques par des techniques de greffage avant irradiation a débouché sur des adsorbants qui peuvent être utilisés pour éliminer des ions de métaux toxiques comme l'arsenic, le plomb et le cadmium, et pour récupérer des métaux tels que l'uranium et le scandium.

Applications industrielles des polymères modifiés par radiotraitement

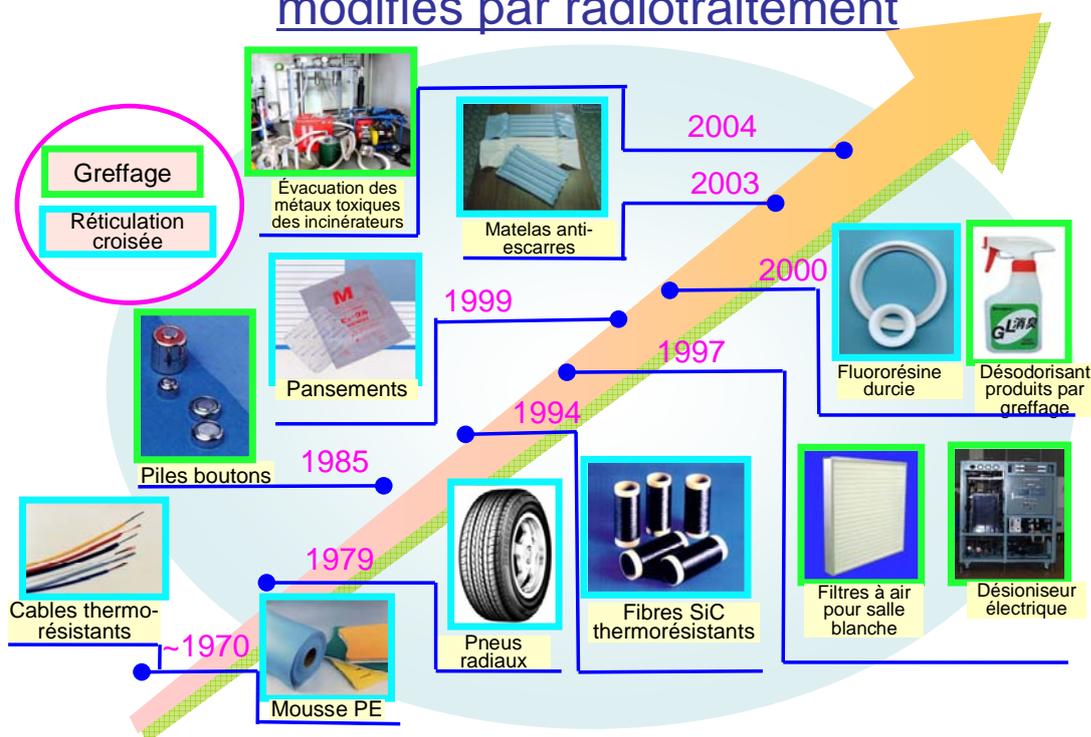


FIG. E-1 : Évolution des applications industrielles du radiotraitement.

Membranes polymériques

91. Les piles à combustible sont une source prometteuse d'énergie pour les applications fixes et portables. Leur performance dépend largement de la membrane au cœur de la pile, qui doit être stable dans l'environnement hostile d'hydrogène et d'oxygène à des températures élevées. Cette membrane se comporte comme séparateur pour prévenir le mélange de gaz réactants, et comme électrolyte pour transporter des protons de l'anode à la cathode. L'un des moyens actuels les plus prometteurs d'obtenir à faible coût des membranes polymériques capables de transporter des protons est le greffage par irradiation. Cette méthode permet d'utiliser une grande variété de films de base et de monomères qui peuvent être adaptés pour des applications spécifiques. Des membranes produites grâce au greffage par irradiation constituent une option compétitive du point de vue coût, car on utilise des matériaux bon marché disponibles dans le commerce.

Utilisation des polymères en médecine et en biotechnologie

92. La possibilité de recréer divers tissus et organes avec des technologies avancées suscite beaucoup d'intérêt en médecine régénérative. Une méthode appelée 'technologie du tapis cellulaire' utilise des surfaces de culture thermosensibles créées par greffage radio-induit de polymères thermosensibles par irradiation par faisceaux d'électrons. L'épaisseur et la densité du polymère greffé sont précisément régulés dans un régime nanométrique. Ces surfaces permettent des récoltes non invasives de cellules grâce à une simple régulation de la température. Les tapis cellulaires récoltés sont utilisés pour reconstruire divers tissus, y compris les surfaces oculaires, les ligaments périodontiques, ainsi que les tissus cardiaques, œsophagiques, et divers autres tissus.

F. Techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture

F.1. Isotopes du sol et surveillance des polluants

93. Les techniques nucléaires et isotopiques jouent un rôle important dans l'identification de l'origine des polluants provenant des pratiques d'utilisation des sols et des activités agricoles¹⁶. S'ils ne connaissent pas précisément l'origine des polluants, les planificateurs de l'environnement, les agriculteurs ou les décideurs ont des difficultés à choisir la stratégie de gestion la plus appropriée pour réduire l'impact des polluants. Par exemple, les engrais et le fumier qui sont utilisés pour favoriser la croissance des plantes et les pesticides qui servent à lutter contre les maladies végétales et animales peuvent devenir des polluants lorsqu'ils aboutissent dans les cours d'eau et les lacs. Dans ces environnements aquatiques, ils deviennent toxiques pour les poissons, favorisent une croissance excessive des algues dans les cours d'eau et affectent potentiellement les activités de loisirs, avec pour conséquence des pertes économiques pour l'industrie du tourisme. Les isotopes stables et les radionucléides provenant des retombées que l'on trouve dans le sol, l'eau ou les sédiments permettent de déterminer précisément l'origine de ces polluants agricoles dans un bassin hydrographique. Les radionucléides provenant des retombées, tels que le césium 137, le plomb 210 et le béryllium 7, sont des débris radioactifs en suspension dans l'air, qui ont leur origine dans des activités telles que les essais d'armes nucléaires et d'autres événements, principalement l'accident de Tchernobyl, ainsi que dans les collisions naturelles provoquées par les rayons cosmiques. Ces radionucléides sont associés à des particules du sol et peuvent donc servir d'empreintes pour retracer le mouvement des particules du sol depuis leur origine dans un bassin agricole jusqu'aux cours d'eau. En outre, les engrais, le fumier, les pesticides et les excréments d'animaux de pâturage d'un bassin agricole portent des signatures distinctes liées à des isotopes stables (par exemple, carbone 13 et azote 15). Ainsi, les différentes régions d'un bassin peuvent avoir des signatures isotopiques nettement différentes (biomarqueurs naturels) du fait des variations des pratiques agricoles et de pâturage. Ces différentes signatures sont un outil d'investigation en sciences du sol pour vérifier l'origine de divers polluants tels que les nitrates, les phosphates et les pesticides dans les cours d'eau.

94. L'étude du sol permet aussi de comprendre l'évolution du climat. Des isotopes tels que le carbone 13 et l'azote 15 peuvent servir d'empreintes pour analyser comment le sol absorbe les gaz à effet de serre. Les changements des isotopes du carbone et de l'azote dans le sol sont censés refléter l'évolution de la matière organique du sol telle qu'elle est influencée par les variations des niveaux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les pratiques agricoles.

F.2. Amélioration des cultures

95. L'induction de mutations joue un rôle majeur dans la mise au point de variétés nouvelles et améliorées de plantes. Au cours de la dernière décennie, les recherches sur l'amélioration des cultures par mutations induites se sont intensifiées, et se sont élargies à l'explication du rôle de gènes spécifiques.

96. La technologie sert à mettre au point des variétés ayant des qualités nutritionnelles améliorées, notamment par la réduction des agents antinutritionnels. Les changements génétiques résultant des mutations induites altèrent l'expression des gènes affectant les diverses voies biochimiques. L'oxalate de calcium (composé qui forme des cristaux en forme d'aiguilles et se trouve dans diverses plantes

¹⁶ Des informations supplémentaires sont disponibles sur le site IAEA.org dans d'autres documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007*.

véneuses), par exemple, n'est pas un nutriment ni une source bénéfique de calcium et peut être toxique à forte dose. On le trouve dans de nombreux légumes feuillus, dont l'épinard, la bette et d'autres légumes comestibles. Diminuer le plus possible l'oxalate par l'induction de mutations peut rendre les légumes plus nutritifs et digestes.

97. L'effet mutagène des rayons cosmiques et leur rôle dans les mutations naturelles et l'évolution sont à l'étude. Depuis les premières expériences internationales, dans les années 70, au cours de la mission Apollo 16, qui a étudié les effets des rayons cosmiques sur divers organismes, un programme de 'sélection dans l'espace' a été lancé par l'Académie chinoise d'agronomie ; il a abouti à la mise au point de toute une gamme de nouveaux mutants, y compris des variétés de riz à très haut rendement, des variétés résistant à la pyriculariose du riz et des variétés géantes de tomate et de poivron.

98. La cartographie par hybrides d'irradiation est une technique consistant à exposer des cellules somatiques à des doses mortelles de rayons gamma ou X afin de fragmenter les chromosomes. Ceux-ci sont ensuite sauvés par introduction dans des microcellules qui sont ensuite fusionnées avec des cellules hôtes appropriées. La technique a été mise au point pour faciliter le séquençage du génome humain et cette méthode, qui permet de cartographier des génomes entiers, a désormais été adaptée aux végétaux. Des cartes d'hybrides d'irradiation ont été établies pour plusieurs plantes telles que l'orge, le maïs, le blé et le coton en vue de l'analyse détaillée et du séquençage de leur génome, ce qui facilitera l'identification et le transfert de gènes affectant des caractéristiques agronomiques, qualitatives et de tolérance au stress utiles afin d'améliorer les plantes.

F.3. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail

99. Dans la recherche d'une augmentation et d'une amélioration des produits de l'élevage, les techniques nucléaires et moléculaires ont joué et continueront de jouer un rôle important. Elles servent par exemple à identifier, manipuler, caractériser et tracer les protéines, l'ADN et l'ARN. L'évolution des techniques de détection, telles que l'imagerie au phosphore, la microfluidique, qui permet d'obtenir les résultats d'analyse d'échantillons en une seule étape, et les nanotechnologies, ouvre des possibilités d'utilisation de dispositifs plus sensibles, plus rapides et plus robustes tant en laboratoire que sur le terrain.

100. Les isotopes stables sont de plus en plus utilisés dans des applications relatives à la production et à la santé animales. Le marquage des aliments au carbone 13 ou à l'azote 15, ou l'ajout de composés marqués au carbone 13 ou à l'azote 15 directement dans le rumen (premier estomac des ruminants), permet de bien comprendre le métabolisme et l'absorption des glucides, des protéines et des nutriments. Le fumier produit par les ruminants peut aussi servir à déterminer le devenir du carbone et de l'azote dans le sol et les plantes. Ces informations permettent d'élaborer des stratégies d'utilisation optimale des aliments et de rendre l'ensemble du système de production plus efficient et durable. Les comparaisons des signatures d'isotopes stables dans les fluides corporels ou les produits animaux avec celles des aliments potentiels permettent d'enregistrer les choix et changements de régime alimentaire et peuvent servir à différencier l'absorption d'herbes tropicales et celle d'autres aliments. Ces mêmes informations servent aussi à trouver l'origine des produits animaux de manière non invasive. Cette approche pourrait servir à déterminer le rôle que jouent les animaux sauvages en tant que vecteurs de maladies animales, par exemple la contribution des oiseaux migrateurs à la diffusion de la grippe aviaire des zones d'endémie vers les zones non infestées. Une technique de dilution d'eau marquée par un isotope stable (oxyde de deutérium) est de plus en plus utilisée pour déterminer la masse corporelle maigre, la teneur en graisses, la composition corporelle et l'absorption totale d'eau et de lait chez le veau. Habituellement, on mesure la teneur des fluides corporels en oxyde de deutérium par spectrométrie de masse isotopique, mais des études récentes ont montré qu'une technique relativement bon marché, la spectroscopie infrarouge, peut donner des résultats aussi précis.

F.4. Lutte contre les insectes ravageurs par la technique de l'insecte stérile

101. Tous les programmes de lutte contre les insectes ravageurs à l'échelle d'une zone par lâcher d'insectes stériles font appel à des irradiateurs à radio-isotopes pour la stérilisation, technique éprouvée et fiable. Cependant, le renouvellement des sources d'irradiation actuelles et l'acquisition et le transport international de nouvelles sources posent des problèmes, l'un au moins des grands producteurs se retirant complètement du marché. Une technique de remplacement reposant sur l'irradiation par rayons X est en cours de mise au point, et une nouvelle installation consacrée à la lucilie bouchère, située au Panama, utilisera exclusivement les rayons X pour la stérilisation. Il est probable qu'à l'avenir la mise au point et l'utilisation de machines à rayons X dans les programmes d'application de la technique de l'insecte stérile (TIS) et les programmes connexes se développeront largement.

F.4.1. La TIS contre les mouches des fruits

102. L'utilisation de la TIS dans les programmes de lutte intégrée à l'échelle d'une zone contre les principaux insectes ravageurs des cultures a continué de se développer et plusieurs installations nouvelles sont entrées en service en 2006. À Juazeiro, dans l'État de Bahia (Brésil), une installation d'élevage en masse de mouches méditerranéennes des fruits a été inaugurée en septembre 2006 ; elle doit produire initialement une centaine de millions de mouches mâles stériles par semaine. Cette installation, dont la création a été soutenue, notamment, par le programme de coopération technique de l'Agence, desservira les zones de production commerciale de fruits (mangue, raisin, etc.) en expansion rapide des divers districts pratiquant une agriculture irriguée situés le long du fleuve San Francisco, dans la région aride du nord-est du Brésil. Dans le cadre d'une extension future, l'installation produira aussi certaines espèces d'*Anastrepha* (mouche des fruits) ainsi que des parasitoïdes de mouches des fruits. Le projet a un fort potentiel pour ce qui est de réduire l'utilisation d'insecticides grâce à l'élimination écologiquement rationnelle des mouches des fruits. L'objectif ultime est de supprimer les traitements après récolte, qui sont coûteux, en établissant des zones, officiellement reconnues par les partenaires commerciaux, à faible prévalence ou exemptes de mouches des fruits.

103. En Espagne, dans la grande région de production d'agrumes de Valence, une autre installation d'élevage en masse et de stérilisation de mouches des fruits, qui produira 400 millions de mâles stériles par semaine, a été construite. L'appui technique a été fourni au titre d'un mémorandum d'accord entre le Programme mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture et le Département d'agriculture, pêche et alimentation de la Généralité valencienne.

104. En Argentine, la Patagonie dans son ensemble est désormais reconnue comme la première région exempte de mouches des fruits du pays par le Service d'inspection zoosanitaire et phytosanitaire



Zones de production de pommes et de poires en Patagonie, Argentine.

(APHIS) des États-Unis. Ce succès est le résultat de dix années d'efforts communs des gouvernements fédéral et provincial et des fruiticulteurs. L'appui technique apporté par des organisations nationales et internationales, dont l'Institut national de technologie agricole (INTA), la FAO et l'Agence, a contribué à ce succès. Il permettra à la Patagonie d'exporter des fruits et des légumes frais à destination des États-Unis sans mesures de quarantaine, ce qui représente, selon le Service national de santé et de qualité agroalimentaire (SENASA), des économies annuelles de l'ordre de 2 millions de dollars. Après ces réussites, le Ministère de l'agriculture, de l'élevage, des pêches et de la nutrition a

annoncé qu'il avait approuvé le financement d'un nouveau programme de lutte contre les mouches des fruits comportant aussi l'utilisation de la TIS sur une superficie de 56 000 hectares dans les provinces productrices d'agrumes du nord-est de l'Argentine (Entre Rios et Corrientes).

F.4.2. La TIS contre la lucilie bouchère

105. Au Panama, une nouvelle installation d'élevage d'une capacité d'une centaine de millions de lucilies bouchères du Nouveau Monde a été inaugurée en juillet 2006. Pendant les trois dernières décennies, la réussite du programme d'éradication de la lucilie bouchère dépendait de l'installation d'élevage de la Commission mexico-américaine d'éradication de la lucilie bouchère située à Tuxtla Gutiérrez, dans l'État du Chiapas (Mexique), qui a approvisionné toutes les campagnes d'éradication au Mexique, en Amérique centrale et dans les Caraïbes. Ces dernières années, sa production, nettement réduite, a permis de maintenir la barrière de mouches stériles dans l'est du Panama et de poursuivre le programme d'éradication en Jamaïque.

F.4.3. La TIS contre les moustiques

106. On s'intéresse à l'application de la TIS non seulement contre le moustique *Anopheles*, vecteur du paludisme, mais aussi contre des moustiques vecteurs d'importantes maladies virales comme la dengue et le chikungunya. À Rimini (Italie), a été lancé un projet TIS pilote sur la lutte contre le moustique *Aedes albopictus*, vecteur de la dengue. Des méthodes de production en nombre de pupes mâles pour stérilisation et lâcher ont été mises au point. D'importants lâchers de mâles stériles ont été effectués dans une zone à Rimini, avec un effet mesurable sur la densité de la population du vecteur. Les mêmes espèces de moustiques sont à l'origine de la récente épidémie majeure de chikungunya sur les îles de l'océan Indien, notamment à la Réunion.

F.5. Qualité et sécurité sanitaire des aliments

F.5.1. Suivi de la sécurité sanitaire des aliments : mesure des résidus de pesticides

107. Des méthodes d'analyse validées sont essentielles pour l'exécution des programmes de suivi de la sécurité sanitaire des aliments. Il faut optimiser la performance et l'applicabilité de ces méthodes dans les laboratoires de pays en développement. En outre, les protocoles d'assurance de la qualité des travaux de laboratoire exigent que les résultats soient assortis d'une estimation de l'incertitude associée. L'Unité des produits agrochimiques des laboratoires de l'Agence à Seibersdorf a contribué à l'élaboration de tels protocoles en ce qui concerne l'utilisation de composés radiomarqués pour optimiser la préparation des échantillons, l'extraction, le nettoyage et l'analyse pendant la mise au point de méthodes d'analyse chromatographique à employer dans le cadre de programmes réglementaires d'analyse des résidus de pesticides et d'autres contaminants dans des échantillons d'aliments et de l'environnement. Les protocoles aident aussi à estimer l'incertitude des mesures associée aux méthodes.

G. Santé humaine

G.1. Progrès en cardiologie nucléaire

108. Des stratégies innovantes en technologie nucléaire ont propulsé la cardiologie nucléaire de l'évaluation du flux de sang coronarien vers le muscle cardiaque, et de sa capacité à pomper le sang dans les artères principales, au domaine de l'imagerie moléculaire. En combinant les informations

données par la tomographie à émission de positons (PET) et par des tomodensitomètres (TDM) modernes dans des systèmes hybrides PET-TDM, on peut désormais étudier les maladies coronariennes à un stade très précoce. La valeur ajoutée par cette technologie est particulièrement importante pour les patients souffrant de diabète, d'hypertension et d'excès de lipides sanguins. Cette information structurale et moléculaire complexe au niveau cellulaire permet d'évaluer le risque individuel d'événements futurs graves et éventuellement mortels affectant le myocarde. Grâce à l'évaluation du risque individuel, on peut conseiller des changements du mode de vie, ou décider d'une intervention médicale précoce, afin de retarder la survenue de la maladie cardiovasculaire et de diminuer les facteurs de risque associés.

109. Du point de vue clinique, le choix de la méthode diagnostique la plus appropriée aux différents stades de la maladie cardiovasculaire dépend de la situation clinique et de la question précise qui est posée. Comme on met de plus en plus l'accent sur la prévention et que la population vieillit dans les États Membres développés et en développement, l'imagerie cardiaque non invasive continuera de gagner en importance et d'influer sur la prise en charge des patients souffrant de maladies cardiovasculaires dans le monde.

G.2. Progrès récents en radiothérapie

110. En radiothérapie, l'identification et la délimitation des tumeurs que permettent la PET/TDM et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) font que l'on peut tenir compte, pour la planification des traitements, aussi bien des caractéristiques anatomiques révélées par la TDM que de l'imagerie moléculaire produite par la PET et l'IRM.

111. Les nouvelles techniques de radiothérapie sont de plus en plus utilisées. La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RTC-3D) comprend des techniques de simulation virtuelle ou par la TDM et une planification du traitement en 3D. Elle vise à mieux conformer la distribution de la dose produite par les faisceaux au volume de la tumeur en focalisant les faisceaux en trois dimensions. La radiothérapie à intensité modulée (IMRT) dérive de la RTC-3D. Le médecin précise d'abord le plan de distribution de la dose, comme en radiothérapie classique, puis des algorithmes très complexes optimisent la configuration de l'orientation et de l'intensité de chacun des faisceaux afin d'obtenir la distribution dose-volume prescrite. L'appareil utilisé est un accélérateur linéaire équipé d'un collimateur multilames. Une machine appelée 'Cyber-Knife' utilise des mouvements commandés par ordinateur ce qui accroît la précision des faisceaux hautement focalisés. L'IMRT permet des distributions de dose beaucoup mieux conformées qu'avec la RTC-3D standard. Cela signifie que le volume de tissu sain exposé à des doses élevées peut être considérablement réduit. Toutefois, bien que l'adaptation très précise de la distribution de la dose ait considérablement diminué les effets néfastes de la radiothérapie (morbidity), il reste à voir si davantage de cancéreux sont guéris ou si leur vie est davantage prolongée qu'avec des technologies plus simples.

112. Les méthodes de résolution du problème des déplacements de la tumeur et des organes progressent elles aussi rapidement. Les différentes parties du corps bougent, tant pendant les séances de traitement que d'une séance à l'autre, du fait de la respiration, de la digestion et de petites variations dans la façon dont le patient est positionné pour chaque traitement. Ces déplacements peuvent faire que les tissus sains entourant la tumeur reçoivent une dose excessive et que la tumeur elle-même ne soit pas correctement traitée. La radiothérapie assistée par l'image (IGRT) consiste à prendre des clichés du patient en position de traitement immédiatement avant et pendant la séance. Ces clichés servent à repérer les déplacements de la tumeur et des organes et à modifier la radiothérapie en fonction de la position du moment. En ajoutant un système 'd'obturateur respiratoire' qui ouvre et ferme le faisceau de traitement en synchronisation avec les mouvements respiratoires, on peut restreindre le traitement à la portion du cycle respiratoire pendant laquelle la tumeur est alignée avec le faisceau, ce qui augmente la dose à la tumeur et réduit la dose aux tissus environnants. Dans une

machine combinant tomographie et thérapie (figure G-1), un accélérateur linéaire remplace le tube à rayons X ; le traitement est administré pendant que l'accélérateur tourne autour du patient et la dose de rayonnement est modulée grâce à un collimateur multilames. Un détecteur enregistre le rayonnement provenant de l'accélérateur linéaire à travers le patient et des images de très haute qualité sont obtenues en même temps que le traitement est administré. Du fait du degré de complexité atteint, ce procédé et l'IGRT en général sont appelés radiothérapie adaptative.

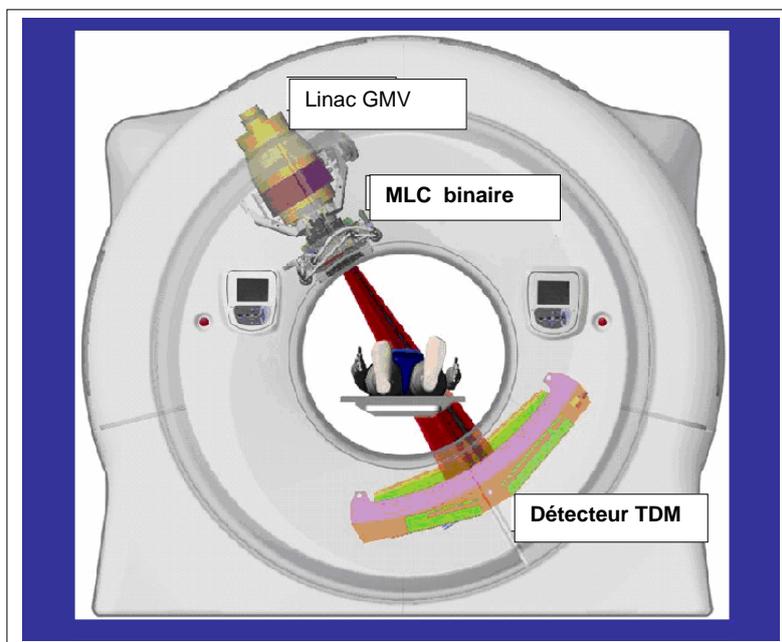


FIG. G-1 : Combinaison tomographie/thérapie (linac : accélérateur linéaire ; MLC : collimateur multilames).

G.3. Nutrition

113. La nécessité urgente d'interventions nutritionnelles efficaces ressort clairement de la situation mondiale actuelle, dans laquelle, d'une part, 170 millions d'enfants sont trop maigres et la sous-nutrition joue un rôle important dans plus de la moitié des décès d'enfants dans le monde et, d'autre part, plus d'un milliard d'adultes ont un excédent de poids. Ce phénomène est appelé le 'double fardeau de la malnutrition'. Il en résulte une lourde charge pour les systèmes de santé dans les pays où il sera de plus en plus nécessaire de traiter les maladies liées au régime alimentaire, telles que les maladies cardiaques et le diabète, en même temps que prévaudront encore la sous-nutrition et les maladies transmissibles.

114. Les techniques nucléaires, en particulier celles faisant appel aux isotopes stables, peuvent aider à mettre au point et évaluer des interventions nutritionnelles. En particulier, les activités de l'Agence en nutrition humaine sont axées sur l'importance de la prévention et du traitement de la malnutrition pendant la grossesse et les deux premières années de la vie, quand les chances de réussite sont les plus grandes.

115. Le recours accru à ces techniques dans les programmes sur la nutrition menés dans les pays en développement est un exemple des évolutions récentes en nutrition appliquée. L'utilisation de plus en plus fréquente d'outils d'analyse tels que les spectromètres de masse à rapport isotopique (SMRI) dans les projets sur la nutrition contribuera largement à développer l'application des techniques faisant appel aux isotopes stables dans un proche avenir. L'apparition récente d'équipements moins onéreux, tel que le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) pour l'analyse du deutérium

(isotope stable de l'hydrogène) afin d'évaluer la composition corporelle et de mesurer l'absorption de lait chez les enfants nourris au sein, est particulièrement intéressante.

H. L'eau et l'environnement

H.1. Données isotopiques pour la gestion des ressources en eau

116. La présence et la répartition des ressources en eau, tant en surface que dans les aquifères, dépendent dans une large mesure du régime climatique prévalant. Il est admis que mieux comprendre le cycle de l'eau et l'impact potentiel des changements climatiques est un élément clé de la gestion durable des ressources en eau. La teneur isotopique des précipitations, des cours d'eau et des eaux souterraines – en particulier en isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène et en tritium – aide à comprendre la relation entre le cycle de l'eau et le climat. Les données isotopiques sont donc extrêmement utiles en ceci qu'elles expliquent l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau. La recherche mondiale actuelle sur les taux d'accumulation et de disparition des glaces dépendent largement de l'analyse isotopique des carottes de glace et de leur relation avec les isotopes dans les précipitations actuelles. D'autres aspects des applications des isotopes à la gestion des ressources en eau dépendent aussi de la composition isotopique des précipitations actuelles.

117. Conscients de l'importance de cette application des données isotopiques, plusieurs pays prennent des mesures pour rendre ces données plus accessibles au niveau national. En 2006, l'Inde a lancé un projet axé sur la collecte et l'interprétation des données sur la composition isotopique des précipitations, des cours d'eau et des eaux souterraines. La Thaïlande a entrepris des efforts similaires pour créer une base de données nationale.

118. Ces efforts nationaux renforceront encore le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations (GNIP) que l'AIEA gère depuis 1961. La répartition des isotopes de l'oxygène dans les précipitations, mesurée pendant un mois de janvier froid typique dans l'hémisphère nord, est présentée à la figure H-1, qui montre la forte influence de la température sur les isotopes (les régions les plus froides ont des rapports isotopiques plus faibles). Les données isotopiques fournies par le GNIP constituent pour les pays un outil qui permet une interprétation et une utilisation valables des données isotopiques nationales ou locales. Outre qu'elles permettent de comprendre l'impact du climat sur le cycle de l'eau, les données du GNIP sont essentielles pour des applications variées comme l'évaluation et la gestion des ressources en eaux souterraines, la détermination des sources de pollution et l'authentification de l'origine des fruits et des légumes.

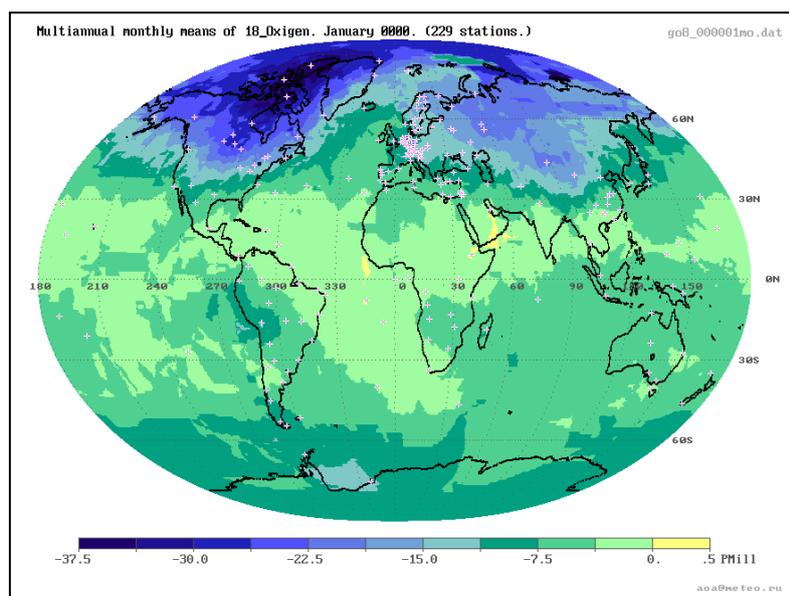


FIG. H-1 : Influence de la température : isotopes de l'oxygène en janvier.

H.2. Environnements marin et terrestre

H.2.1. Microanalyse des particules radioactives dans les sédiments marins

119. Une fraction importante des radionucléides naturels et artificiels qui pénètrent dans l'environnement marin est associée à des particules d'origine biologique, minérale ou nucléaire. On sait, par exemple, que les radio-isotopes naturels du polonium, du thorium et du plomb dans les océans sont entraînés par des particules marines vers le fond des océans¹⁷. Certains radionucléides artificiels présents dans les sédiments marins le sont sous forme de 'particules chaudes' microscopiques. Ces particules représentent des sources ponctuelles pouvant avoir une importance radiologique si elles sont ingérées par des organismes marins ou des personnes, et il faut procéder à l'évaluation à long terme des particules chaudes dans les océans, de leurs propriétés et de leur comportement biogéochimique. On dispose désormais de tout un ensemble de techniques de micro-imagerie et de microanalyse, y compris la microscopie électronique à balayage, la microradiographie avec synchrotron et les techniques de microspectrométrie de masse telles que la spectrométrie de masse à émission d'ions secondaires (SIMS) et la spectrométrie de masse à source plasma (ICP-MS).

H.2.2. Radiotraceurs et sécurité sanitaire des poissons et fruits de mer

120. L'aquaculture marine de mollusques bivalves (moules, huîtres, coquilles Saint-Jacques, etc.) est une activité en pleine croissance économique et géographique qui, cependant, court des risques permanents du fait de la propension de ces mollusques à accumuler des métaux toxiques jusqu'à des niveaux dépassant les valeurs autorisées pour la sécurité sanitaire et les exportations.

121. Les radiotraceurs permettent de faire des diagnostics à moindre coût pour les stratégies de gestion visant à atténuer ces risques. Ils permettent un traçage précis de l'incorporation, de la localisation et de l'élimination des métaux toxiques dans les organismes cibles (bivalves, poissons, crevettes) et tout au long des chaînes alimentaires marines. Ainsi, on sait que les coquilles Saint-Jacques concentrent dans leurs tissus du cadmium, qui est un métal toxique, en quantités souvent

¹⁷ Des informations supplémentaires sont disponibles sur le site IAEA.org dans d'autres documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007*.

supérieures aux niveaux maximums recommandés au plan international. Des études par autoradiographie au cadmium 109 ont montré que le cadmium se concentre presque exclusivement dans le rein et la glande digestive (figure H-2), que l'on ne consomme généralement pas et qui peuvent donc être éliminés avant d'entrer dans la chaîne alimentaire. Ces études donnent donc aux producteurs de fruits de mer un moyen pratique d'améliorer la qualité de leurs produits destinés au marché international.

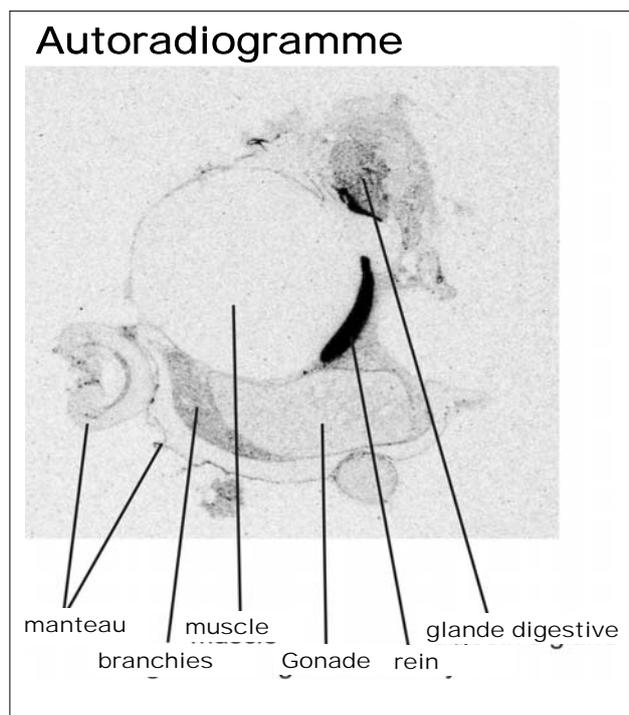


FIG. H-2 : Les zones noires indiquent la présence de cadmium 109 dans une coquille Saint-Jacques
(Cliché : C Rouleau IML Canada).

H.3. Suivi de la pollution atmosphérique

122. La pollution atmosphérique due aux particules en suspension est une menace pour la santé humaine, notamment dans les grandes villes. Les particules fines peuvent pénétrer profondément dans les poumons et y rester assez longtemps. Une gestion efficace de la qualité de l'air signifie que l'origine des particules polluantes est connue. Les techniques nucléaires d'analyse (fluorescence X, analyse par activation neutronique et techniques faisant appel à des faisceaux d'ions) peuvent servir à déterminer la composition élémentaire de ces particules. Lorsque celle-ci est connue, on peut identifier la source de la pollution, ou évaluer les contributions relatives de diverses sources, par exemple déterminer si la pollution est due aux véhicules, à l'industrie ou à des sources transfrontières. À partir de ces informations, on peut décider des mesures à appliquer pour réduire les émissions, par exemple diminuer ou interdire l'essence plombée ou améliorer l'infrastructure des transports urbains. De telles mesures ont été particulièrement efficaces en Asie du Sud-Est. De même, les techniques nucléaires d'analyse peuvent servir à déterminer l'efficacité des mesures anti-pollution.



FIG. H-3 : Échantillonneur d'air de grand volume utilisé pour le suivi de la pollution atmosphérique ou du radon.

H.4. Le radon dans l'atmosphère

123. Le radon est un gaz radioactif naturel qui s'échappe continuellement dans l'atmosphère depuis la surface de la terre. La période du radon 222 (3,82 jours) est comparable à celle de nombreux polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote et l'ozone. En conséquence, on a de plus en plus recours aux mesures du radon dans les études des processus atmosphériques, en particulier pour tester les modèles de circulation et transport atmosphériques.

124. La concentration de radon varie avec la direction du vent, notamment près des côtes car le flux de radon pénétrant dans l'atmosphère est bien plus faible à partir de l'océan qu'à partir du sol. Le radon peut donc servir d'indicateur du degré de contact entre une masse d'air et le sol. Un exemple de cette application est l'incorporation des mesures de radon dans le programme Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). La VAG vise à faire des observations fiables de la composition chimique et de certaines caractéristiques physiques de l'atmosphère à l'échelle mondiale et régionale, à donner à la communauté scientifique les moyens de prédire les états futurs de l'atmosphère et à organiser des évaluations en vue de l'élaboration de politiques de l'environnement. Ces besoins des études atmosphériques conduisent actuellement à améliorer les systèmes de détection du radon dans plusieurs domaines.

H.5. Matières de référence et qualité des analyses

125. Le contrôle radiologique de l'environnement requiert de plus en plus des mesures précises et des résultats reproductibles pour, notamment, maintenir la confiance en matière de sécurité sanitaire des aliments et de commerce international. Les laboratoires du monde entier s'efforcent d'assurer la comparabilité et la qualité des résultats des mesures dans deux directions. La première est la mise en place d'une infrastructure métrologique appropriée impliquant essentiellement les instituts nationaux de métrologie et l'élaboration des normes requises en matière d'étalonnage. La deuxième est la mise à disposition d'outils d'assurance et de contrôle de la qualité, qui comprennent les matières de référence. Ces dernières sont similaires aux types d'échantillons courants et contiennent des quantités connues des substances communément analysées. Les types de matières et de substances analysées en contrôle radiologique de l'environnement sont nombreux et la demande de matières de référence appropriées émanant des laboratoires est très forte.

126. La technologie nucléaire et les matières de référence sont fortement liées de deux points de vue. D'abord, les techniques d'analyse nucléaires et connexes (telles que l'activation neutronique) sont considérées comme des techniques de référence pour la caractérisation de nouvelles matières de

référence. Ensuite, les matières de référence sont couramment utilisées pour vérifier la qualité des résultats obtenus grâce aux techniques nucléaires d'analyse. La demande de matières de référence de grande qualité et métrologiquement validées, caractérisées pour ce qui est des radionucléides, des isotopes stables, des éléments traces, des polluants organiques, etc., augmente constamment (figure H-4). Pour que le degré de confiance dans les résultats des mesures soit correct, des organismes internationaux tels que l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et la Coopération sur la traçabilité internationale en chimie analytique (CITAC) accordent davantage d'attention à la production des matières de référence.

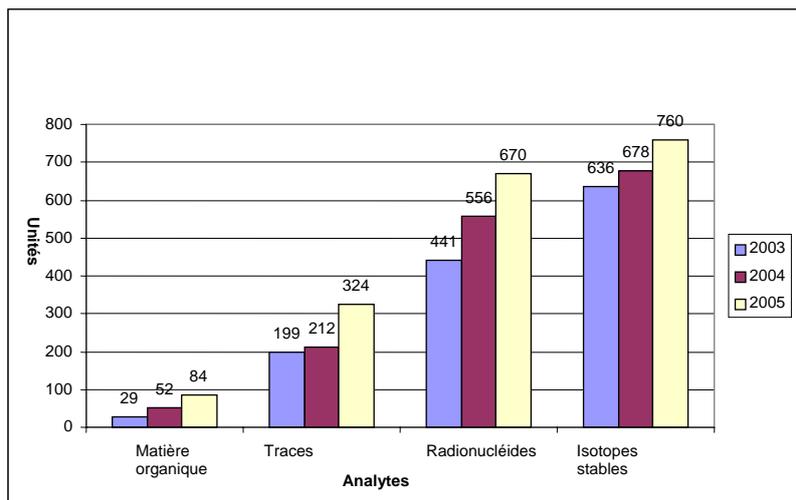


FIG. H-4 : Unités de matières de référence de l'AIEA distribuées en 2003, 2004 et 2005.