

Conférence générale

GC(50)/INF/3

Date : 6 juillet 2006

Distribution générale

Français

Original : Anglais

Cinquantième session ordinaire

Point 17 de l'ordre du jour provisoire
(GC(50)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2006

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie un *rapport exhaustif sur la technologie nucléaire* tous les deux ans et une mise à jour plus succincte les années intermédiaires. Le présent rapport met en valeur les événements notables de l'année 2005 principalement.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – 2006* 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 à l'adresse www.iaea.org, mais en anglais uniquement, des informations complémentaires sur l'électronucléaire dans les pays en développement, l'entreposage et le stockage définitif du combustible usé et des déchets de haute activité, la technique de l'insecte stérile et la recherche-développement dans ce domaine, les progrès de l'imagerie médicale pour le diagnostic et le traitement du cancer, les applications de la technologie des faisceaux de neutrons et la partie initiale du cycle du combustible à l'uranium.
- Des informations sur les activités de l'Agence dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires figurent également dans le *Rapport annuel pour 2005* (GC(50)/4), en particulier dans la partie Technologie, et dans le *Rapport sur la coopération technique pour 2005* (GC(50)/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

	Synthèse	1
A.	APPLICATIONS ÉNERGÉTIQUES	3
	A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	3
	A.2. L'avenir	6
	A.2.1. Attentes en hausse	6
	A.2.2. Développement durable et changements climatiques	8
	A.2.3. Principales questions	8
	A.2.4. Ressources	13
B.	FISSION ET FUSION AVANCÉES	15
	B.1. Fission avancée	15
	B.2. Fusion	17
C.	DONNÉES ATOMIQUES ET NUCLÉAIRES	18
D.	APPLICATION DES ACCÉLÉRATEURS ET DES RÉACTEURS DE RECHERCHE.....	18
	D.1. Accélérateurs	18
	D.2. Réacteurs de recherche	18
E.	APPLICATION DES RADIO-ISOTOPES ET TECHNOLOGIE DES RAYONNEMENTS...	19
	E.1. Application des radio-isotopes	19
	E.2. Technologie des rayonnements	20
	E.2.1. La nanotechnologie dans l'industrie et la santé	20
	E.2.2. Suivi des processus industriels	20
F.	TECHNIQUES NUCLÉAIRES DANS L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE	21
	F.1. Amélioration et protection des cultures	21
	F.2. Production et santé animales	22
	F.3. Qualité et sécurité sanitaire des aliments	23
G.	SANTÉ HUMAINE	24
	G.1. Études en matière de nutrition et d'écologie sanitaire	24
	G.2. Médecine nucléaire – imagerie et thérapie	24
	G.3. Dosimétrie et radiophysique médicale	25
	G.4. Radiopharmaceutiques	26
	G.5. Radio-oncologie	26
H.	EAU ET ENVIRONNEMENT	26
	H.1. Ressources en eau	26
	H.1.1. Techniques d'hydrologie isotopique	26
	H.1.2. Dessalement	27
	H.2. Environnement	28
	H.2.1. Déminage	28
	H.2.2. Radiotraceurs pour le couplage circulation océanique-climat	28
	H.2.3. Bioaccumulation dans la chaîne alimentaire marine	28
	H.2.4. Études du cycle du carbone à l'aide de l'analyse isotopique de composés spécifiques	29

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2006

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. Si les perspectives actuelles de l'électronucléaire sont toujours en demi-teinte, en 2005 il a suscité des attentes plus importantes. En mars, de hauts responsables de 74 gouvernements, y compris 25 représentants au niveau ministériel, se sont réunis à Paris au cours d'une conférence organisée par l'Agence pour étudier le rôle futur de l'énergie d'origine nucléaire. Dans leur grande majorité, ils ont affirmé qu'au XXI^e siècle cette source d'énergie pouvait largement contribuer à la satisfaction des besoins énergétiques et à la promotion du développement mondial, pour un grand nombre de pays développés et en développement. Ces attentes plus importantes sont dues au bilan de performance de l'électronucléaire, à l'augmentation des besoins énergétiques dans le monde, associée à celle des prix du pétrole et du gaz naturel, aux contraintes en matière d'environnement, aux inquiétudes concernant la sécurité des approvisionnements énergétiques dans certains pays et à des plans de développement ambitieux dans plusieurs pays.
2. Au 31 décembre 2005, il y avait 441 centrales nucléaires en exploitation et 27 en construction. En 2005, quatre nouvelles centrales nucléaires ont été couplées au réseau (deux au Japon, une en Inde et une en République de Corée), et une centrale arrêtée a de nouveau été couplée au réseau au Canada. Deux réacteurs ont été mis à l'arrêt, conformément à des politiques nationales d'abandon progressif du nucléaire : celui d'Obrigheim en Allemagne et celui de Barsebäck-2 en Suède. Trois centrales ont été mises en chantier, celles de Lingao-3 en Chine, d'Olkiluoto-3 en Finlande et de Chasnupp-2 au Pakistan, la centrale finlandaise étant la première à être construite en Europe occidentale depuis 1991. L'Asie reste la région où l'expansion est la plus forte avec 16 des 27 réacteurs en construction à la fin de 2005, ainsi que 24 des 34 derniers réacteurs couplés au réseau.
3. Le prix de l'uranium, qui était modique et stable pendant 15 ans, a continué de monter, passant de 25 \$/kg en 2002 à 112 \$/kg en mai 2006. La production d'uranium est nettement inférieure à la consommation depuis une quinzaine d'années et la hausse des prix actuelle montre que l'on considère de plus en plus que les sources secondaires, qui ont comblé la différence, commencent à s'épuiser.
4. À la fin de 2005, huit centrales nucléaires avaient été entièrement déclassées et leurs sites libérés sans restrictions. Dix-sept étaient partiellement démantelées et mises en attente sûre, 31 étaient en cours de démantèlement avant que leur site puisse être libéré et 30 faisaient l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mises en attente sûre de longue durée.
5. En ce qui concerne les déchets de haute activité, ce sont la Finlande, la Suède et les États-Unis d'Amérique qui ont le plus progressé vers la construction d'installations de stockage définitif. En Finlande, la construction d'un laboratoire souterrain de caractérisation du site de stockage définitif d'Olkiluoto a débuté en 2004. En 2005, la Hongrie et la République de Corée ont choisi des sites pour leur premier dépôt destiné aux déchets de faible et moyenne activité à la suite de référendums favorables dans les communes retenues ; en Belgique, deux communes ont voté pour devenir candidates à l'implantation d'un site destiné à accueillir un dépôt pour déchets de faible activité.

6. Les recherches au niveau national sur des modèles de réacteurs avancés se poursuivent dans toutes les catégories – réacteurs refroidis par eau, refroidis par gaz et refroidis par métal liquide et systèmes hybrides. Cinq membres du Forum international Génération IV (GIF) ont signé, en février 2005, un accord-cadre sur la collaboration internationale en matière de recherche-développement sur les systèmes nucléaires de la quatrième génération. Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'AIEA compte désormais 24 membres, l'Ukraine et les États-Unis d'Amérique s'y étant associés en 2005. Au nombre des activités en cours dans le cadre de l'INPRO, on compte la mise au point définitive d'un manuel de l'utilisateur sur la méthodologie INPRO, l'application de cette méthodologie à l'évaluation de systèmes nucléaires innovants (SNI) dans le cadre d'études nationales et multinationales, l'analyse du rôle et de la structure des SNI afin qu'ils répondent durablement aux besoins énergétiques et la sélection des domaines qui se prêtent le mieux à un développement en collaboration.

7. En ce qui concerne l'énergie de la fusion, un pas décisif a été franchi en juin 2005 avec la signature de la déclaration commune de toutes les parties aux négociations concernant le réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) et la décision de démarrer sa construction à Cadarache (France). Cette décision a constitué une nouvelle étape importante pour le développement de l'énergie de fusion – la démonstration sur le plan scientifique et technique de la technologie de fusion dans des conditions correspondant à l'exploitation d'un réacteur à fusion pour la production d'électricité.

8. Des recherches nucléaires fondamentales continuent d'être menées pour appuyer les progrès et les améliorations enregistrés dans le domaine de la production d'électricité et dans toutes les autres applications de l'énergie nucléaire. La transformation de la fusion en source d'énergie viable impose de mener des recherches dans de nombreux secteurs et de disposer de données atomiques et nucléaires fiables. Les réacteurs de recherche ont des applications dans la plupart des secteurs de la technologie nucléaire, et le présent rapport expose celles de nouveaux réacteurs, par exemple pour la production d'isotopes, l'utilisation des faisceaux de neutrons et les analyses par activation dans les domaines de l'environnement, l'alimentation et l'agriculture.

9. Le rapport fait aussi le point sur l'évolution des techniques basées sur les accélérateurs, la production de radio-isotopes et quelques nouvelles applications de la nanotechnologie.

10. Les technologies nucléaires continuent d'apporter une contribution essentielle et souvent unique à la production et la sécurité sanitaire des aliments, la santé humaine et animale, la gestion des ressources en eau et l'environnement. Par exemple, grâce à la sélection par mutations de cultures, de nombreux pays peuvent exploiter comme rizières des terres autrefois inutilisables. Dans le domaine de la santé humaine, les isotopes stables sont de plus en plus utilisés pour l'élaboration de programmes de nutrition. La médecine nucléaire profite des progrès technologiques de l'informatique. La gestion durable des ressources en eau et le dessalement restent des questions de première importance au plan international. De nouvelles avancées dans l'analyse isotopique d'échantillons hydrologiques laisse entrevoir un recours accru aux isotopes pour la gestion des ressources en eau. Les progrès des techniques d'échantillonnage et d'analyse contribuent à une meilleure compréhension de l'environnement. Le rapport exposera les faits nouveaux enregistrés dans tous ces domaines.

A. APPLICATIONS ÉNERGÉTIQUES

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui¹

11. A la fin de 2005, il y avait 441 centrales nucléaires en service dans le monde, représentant une capacité totale de production de 368 GW(e) et fournissant près de 16 % de l'électricité mondiale. Ce pourcentage est plus ou moins stable depuis 1986, ce qui montre que depuis 19 ans l'électronucléaire croît au même rythme que la production mondiale d'électricité.

12. En 2005, quatre nouvelles centrales nucléaires ont été couplées au réseau (deux au Japon, une en Inde et une en République de Corée), et une centrale arrêtée a été de nouveau couplée au réseau au Canada. A titre de comparaison, en 2004, il y avait eu cinq nouvelles centrales couplées au réseau (et une autre couplée à nouveau) et, en 2003, deux centrales couplées (plus deux autres couplées à nouveau). Toujours en 2005, il y a eu deux centrales mises à l'arrêt contre cinq en 2004 et six en 2003. L'augmentation nette de la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire pendant l'année a été de 3 259 MWe.

13. D'après la définition de l'Agence, selon laquelle la construction d'une centrale nucléaire commence avec le premier coulage de béton, trois centrales nucléaires ont été mises en chantier en 2005, à savoir celles de Lingao-3 en Chine (1 000 MWe), d'Olkiluoto-3 (1 600 MWe) en Finlande, et de Chasnupp-2 (300 MWe) au Pakistan. En outre, en Bulgarie, la construction de deux centrales, qui avait été suspendue, a repris activement. En 2004, il y avait eu deux centrales mises en chantier, auxquelles étaient venues s'ajouter deux autres en Fédération de Russie, dont les travaux de construction avaient repris, et en 2003 une seule.

14. L'expansion actuelle, ainsi que les perspectives de croissance à court et à long terme, sont concentrées en Asie. Comme le montre le tableau A-1, sur 27 réacteurs en construction dans le monde à la fin de 2005, 16 étaient en Asie, ainsi que 24 des 34 derniers réacteurs couplés au réseau.

15. En Asie, c'est le Japon qui a le programme électronucléaire le plus important. Après le couplage au réseau des tranches Higashi Dori-1, en mars, and Shika-2, en juillet, il a maintenant 55 réacteurs en exploitation et un en construction. En outre, en juillet, la Compagnie d'électricité de Tokyo (TEPCO) a remis en service le dernier des 17 réacteurs mis à l'arrêt en 2002. En tout, le Japon prévoit de coupler au réseau dix nouvelles tranches d'ici 2014, faisant ainsi passer à plus de 40 % la part de l'électronucléaire dans sa production d'électricité.

16. Avec le couplage au réseau de la tranche Ulchin-6 en janvier, la République de Corée a 20 tranches en service. Les travaux de préparation du site des tranches Kori-5 et -6 ont commencé en 2005. Dans ce pays, l'électronucléaire fournit actuellement 45 % de l'électricité.

17. Ailleurs en Asie, les contributions absolue et relative de l'électronucléaire sont moindres, mais la Chine et l'Inde en particulier prévoient une forte expansion. La Chine, qui a actuellement neuf réacteurs en service, trois en construction et qui tire 2 % de son électricité du nucléaire, prévoit que leur capacité atteindra 40 GWe d'ici 2020, soit 4 % de la production d'électricité.

¹ L'AIEA tient à jour des données sur les réacteurs en service et mis à l'arrêt, ainsi que sur ceux en construction, comme indiqué dans le dernier rapport annuel : (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_power.pdf) et sur le site web de l'AIEA à l'adresse suivante : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPES/index.html>. Voir notamment le Système d'information sur les réacteurs de puissance (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>).

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2005)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en constructions		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2004		Expérience d'exploitation totale en 2004	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du Total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			12,2	5,5	42	3
ALLEMAGNE	17	20 339			154,6	31,0	683	5
ARGENTINE	2	935	1	692	6,4	6,9	54	7
ARMÉNIE	1	376			2,5	42,7	38	3
BELGIQUE	7	5 824			45,3	55,6	205	7
BRÉSIL	2	1 901			9,9	2,4	29	3
BULGARIE	4	2 722	2	1 906	17,3	44,1	137	3
CANADA	18	12 599			86,8	14,6	442	8
CHINE	9	6 572	3	3 000	50,3	2,0	56	11
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	20	16 810			139,3	44,7	259	8
ESPAGNE	9	7 588			54,7	19,6	237	2
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	103	98 145			780,5	19,3	3 087	6
FÉDÉRATION DE RUSSIE	31	21 743	4	3 775	137,3	15,8	870	4
FINLANDE	4	2 676	1	1 600	22,3	32,9	107	4
FRANCE	59	63 363			430,9	78,5	1 464	2
HONGRIE	4	1 755			13,0	37,2	82	2
INDE	15	3 040	8	3 602	15,7	2,8	252	0
IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'			1	915				
JAPON	55	47 593	1	866	280,7	29,3	1 221	3
LITUANIE	1	1 185			10,3	69,6	39	6
MEXIQUE	2	1 310			10,8	5,0	27	11
PAKISTAN	2	425	1	300	2,4	2,8	39	10
PAYS-BAS	1	449			3,8	3,9	61	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 368			23,3	30,5	86	10
ROUMANIE	1	655	1	655	5,1	8,6	9	6
ROYAUME-UNI	23	11 852			75,2	19,9	1 377	8
SLOVAQUIE	6	2 442			16,3	56,1	112	6
SLOVÉNIE	1	656			5,6	42,4	24	3
SUÈDE	10	8 910			69,5	44,9	332	6
SUISSE	5	3 220			22,1	32,1	153	10
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	83,3	48,5	308	6
Total ^b	441	368 264	27	21 811	2625,9	16 %	11 991	8

a. Données tirées du Système d'information sur les réacteurs de puissance de l'AIEA (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>)

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

— 6 réacteurs (4 904 MWe) en service ; 2 réacteurs (2 600 MWe) en construction ;

— 38,4 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 20,3 % de la production électrique totale en 2005 ;

— Expérience d'exploitation : 146 ans et un mois.

18. En juin, l'Inde a couplé au réseau un réacteur à eau lourde sous pression de 490 MWe, Tarapur-4. Elle a maintenant 15 réacteurs en service et huit autres en construction. En 2004, l'électronucléaire y a fourni 2,8 % de l'électricité produite. L'objectif de ce pays est d'accroître sa capacité nucléaire d'un facteur de dix d'ici 2022 et d'un facteur de 90 d'ici 2052.

19. Le Pakistan tire 2,8 % de son électricité de ses deux réacteurs nucléaires en service. En 2005, les travaux de construction du réacteur à eau sous pression de 300 MWe, Chasnupp-2, ont commencé. Les plans prévoient que la capacité nucléaire du pays augmentera de 8 000 MWe d'ici 2030, y faisant ainsi passer à 4,2 % la part de cette source d'énergie dans la production d'électricité.

20. En 2005, la République islamique d'Iran, qui construit une centrale nucléaire, a signé des accords de fourniture de combustible qui prévoient la réexpédition du combustible usé en Fédération de Russie.

21. L'Europe occidentale a 135 centrales nucléaires en service et une en chantier avec le démarrage, en août 2005, des travaux de construction de la tranche Olkiluoto-3, en Finlande. Conformément à la politique d'abandon progressif du nucléaire en Allemagne et en Suède, le réacteur d'Obrigheim en Allemagne et celui de Barsebäck-2 en Suède ont été mis à l'arrêt. Les gouvernements des Pays-Bas et du Royaume-Uni ont respectivement approuvé une prolongation de la durée de vie, pour l'un, de la centrale nucléaire de Borssele jusqu'en 2033, lui concédant une durée de vie de 60 ans, et pour l'autre, des tranches Dungeness-B1 et Dungeness-B2 pour dix autres années. Le gouvernement suédois a approuvé des augmentations de puissance de 15 MWe pour les tranches Ringhals-1 et -3, et une demande similaire concernant une augmentation de puissance de 250 MWe de la tranche Oskarshamn-3, appuyée par l'organisme de réglementation, attend l'approbation du gouvernement. D'autres demandes en ce sens concernaient des augmentations de puissance de 120 MWe pour les tranches Forsmark-1 et -2 et de 170 MWe pour Forsmark-3.

22. La Russie a 31 centrales nucléaires en service et quatre en construction, tandis que l'Europe orientale en a 39 en service et cinq en construction. Au début de 2005, Bilibino-2, en Russie, a bénéficié d'un renouvellement de sa licence pour cinq ans, qui vient s'ajouter à une prolongation similaire accordée à Bilibino-1 l'année précédente. Il s'agit de deux tranches de la région de Chukotka, à l'extrémité nord-est du pays, dotées de petits réacteurs de 11 MWe à vocation calogène et électrogène.

23. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé neuf renouvellements supplémentaires de licences de 20 ans chacun (pour une durée totale de vie autorisée de 60 ans pour chaque réacteur), ce qui porte à 39 le nombre total de renouvellements de licences approuvés à la fin de 2005. Une nouvelle législation a été promulguée prévoyant 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 6000 MWe. La NRC est en train d'examiner trois demandes d'autorisations préliminaires de sites, et devrait recevoir quatre demandes de licences combinées pour des travaux de construction et des activités d'exploitation d'ici 2007, et éventuellement plusieurs autres en 2008.

24. Au Canada, Pickering A-1 a été la quatrième tranche sur les huit qui avaient été mises à l'arrêt ces dernières années à être de nouveau couplée au réseau. Un accord a aussi été conclu au sujet d'un programme de quatre ans en vue du redémarrage des cinquième et sixième tranches, Bruce A-1 et Bruce A-2.

A.2. L'avenir

A.2.1. Des attentes en hausse²

25. En 2005, l'électronucléaire a suscité des attentes plus importantes. En mars, de haut responsables de 74 gouvernements, y compris 25 représentants au niveau ministériel, se sont réunis à Paris au cours d'une conférence organisée par l'Agence pour étudier le rôle futur de l'énergie d'origine nucléaire. Dans leur grande majorité, ils ont affirmé qu'au XXI^e siècle cette source d'énergie pouvait largement contribuer à la satisfaction des besoins énergétiques et à la promotion du développement mondial, pour un grand nombre de pays développés et en développement. Au nombre des pays présents figuraient plusieurs n'ayant pas actuellement de programme électronucléaire, tels que l'Égypte, l'Indonésie, le Maroc, la Pologne, la Turquie et le Vietnam. La création de l'infrastructure d'appui nécessaire, notamment de l'infrastructure juridique et réglementaire, est un des problèmes auxquels sont confrontés ceux qui en entreprennent un³.

26. Le bilan positif prolongé de l'électronucléaire, la croissance ininterrompue des besoins énergétiques mondiaux, les nouvelles contraintes en matière d'environnement, les préoccupations de certains pays quant à la sécurité de l'approvisionnement énergétique et les plans d'expansion de l'électronucléaire dans des pays tels que la Chine, l'Inde, le Japon, la République de Corée et la Fédération de Russie sont autant de facteurs qui contribuent à renforcer les attentes.

27. Le bilan positif prolongé de l'électronucléaire est attesté par les 11 991 années-réacteur d'expérience (voir tableau A-1), de meilleurs facteurs d'utilisation, une baisse des coûts de production, et d'excellents résultats en matière de sûreté. Un accident a eu des conséquences hors site majeures, celui de Tchernobyl en 1986, qui a coûté la vie à plusieurs personnes et plongé dans le malheur un grand nombre d'autres. Mais il est aussi à l'origine de grands changements, dont la mise en place d'une 'culture de sûreté' qui ne cesse de s'améliorer grâce à l'analyse de l'expérience acquise et à la mise en commun des meilleures pratiques. Cette culture de sûreté démontre son efficacité depuis une vingtaine d'années, et c'est en se basant sur ce bilan de sûreté que des pays envisagent de construire des centrales nucléaires.

28. Toutes les analyses et prévisions indépendantes font apparaître un accroissement constant des besoins énergétiques mondiaux au XXI^e siècle. Pour pouvoir satisfaire ne serait-ce qu'une fraction des aspirations économiques du monde en développement, il faut que les approvisionnements énergétiques augmentent considérablement. En 2005, les prix du pétrole et du gaz naturel ont connu une forte hausse, signe que les marchés s'attendent à ce que la demande dépasse l'offre.

29. La figure A-1 montre la croissance historique de la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire dans le monde depuis 1960, ainsi que les projections haute et basse de l'Agence actualisées en 2005. La différence entre ces deux projections en 2030 est de 222 GWe : comme le montre la figure, l'Europe occidentale, avec 66 GWe, y contribue pour 30 % et l'Extrême-orient, avec 52 GWe, pour 23 %.

² Pour plus de détails sur les projections récentes de l'Agence, voir le site <http://nesisda2/rds-1/>. Les activités récentes et actuelles de l'Agence en matière de collecte de données et d'évaluation par des experts pour les projections à moyen terme sont décrites dans son dernier rapport annuel : (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/capacity_building.pdf) et sur son site web : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/>.

³ De plus amples informations sont disponibles sur le site IAEA.org sous 'Nuclear Technology Review 2006'.

30. Bien que les attentes concernant l'électronucléaire soient en hausse, un récent sondage d'opinion mondial, commandé par l'Agence et portant sur 18 000 personnes dans 18 pays, montre que les avis à son sujet sont toujours divergents. Des différences substantielles existent entre les pays. La figure A-2 montre l'ensemble des résultats : si une majorité de 62 % se prononce pour une poursuite de l'activité des centrales actuelles, dans le même temps une majorité de 59 % s'oppose à la construction de nouvelles centrales. Le sondage comportait aussi une question complémentaire dans laquelle étaient données de brèves informations sur les très faibles émissions de gaz à effet de serre des centrales nucléaires : le pourcentage des personnes en faveur d'une expansion de l'électronucléaire est alors passé de 28 % à 38 % et celui des personnes s'y opposant est tombé de 59 % à 47 %.

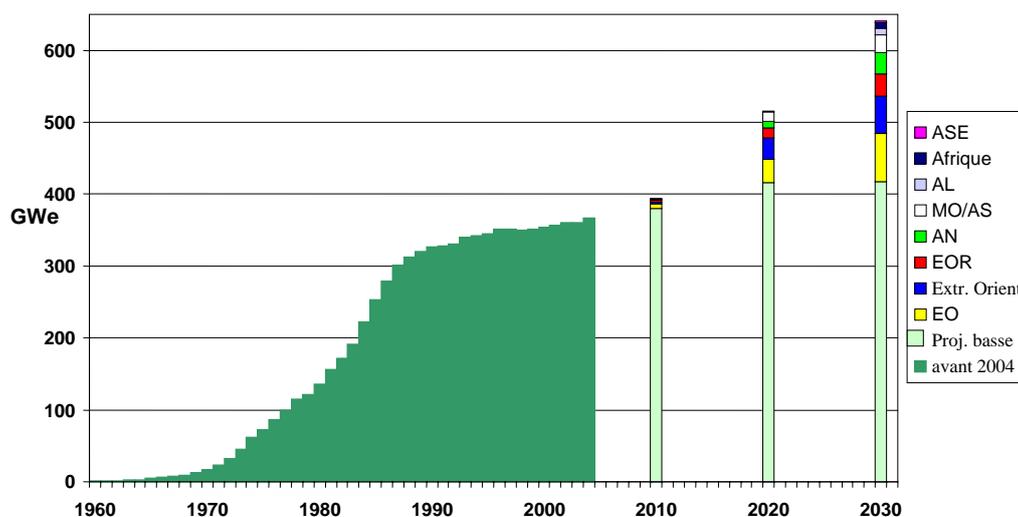


Figure A-1: Puissance nucléaire installée dans le monde. Les barres vert foncé montre sa croissance historique de 1960 à 2005. Les barres vert clair montrent la dernière projection basse de l'Agence pour 2010, 2020 et 2030. Les autres couleurs montrent comment se répartit entre les régions du monde la différence entre la projection basse et la projection haute de l'Agence. (ASE : Asie du Sud-Est ; AL : Amérique Latine ; MO/AS : Moyen-Orient/Asie du Sud ; AN : Amérique du Nord ; EOR : Europe orientale ; EO : Europe occidentale).



Figure A-2 : Ensemble des résultats d'un sondage d'opinion mondial. Source : *Global Public Opinion on Nuclear Issues and the IAEA: Final Report from 18 Countries, 2005*

A.2.2. Développement durable et changements climatiques⁴

31. La Commission du développement durable (CDD) des Nations Unies a abordé la question de l'énergie pour la première fois à sa neuvième session, en 2001, et a étudié en détail le lien entre énergie nucléaire et développement durable. Elle est parvenue à deux conclusions : premièrement, les pays ont reconnu être divisés, faisant observer dans le texte final que certains d'entre eux estimaient que l'énergie nucléaire contribuait de manière décisive au développement durable et d'autres non. Deuxièmement, ils ont convenu que « le choix de l'énergie nucléaire relève de la compétence des pays ». C'est en 2006 et 2007 que l'énergie d'origine nucléaire sera de nouveau inscrite à l'ordre du jour de la CDD lorsque celle-ci réexaminera les questions d'énergie.

32. 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 très faibles émissions de GES, mais à long terme, celui-ci devrait constituer une option plus intéressante en raison des limites imposées en la matière. Dans le passé, ses avantages en termes d'émissions de GES très faibles n'étaient pas perçus par les investisseurs, qui n'avaient aucun intérêt économique à s'en préoccuper en l'absence de restrictions ou de taxes sur ces émissions.

33. La 11^{ème} Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CoP-11), en décembre 2005, à Montréal, a été la première manifestation à avoir lieu après l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto et a donc aussi servi de première réunion des parties audit protocole (MoP-1). En tant que telle, elle a officiellement adopté les règles pour la mise en œuvre de ce dernier qui avaient été provisoirement approuvées à la CoP-7 sous le nom d'« Accords de Marrakech ». S'agissant des réductions des émissions après la première période d'engagement (2008-2012), elle a décidé d'entamer les discussions « dans le cadre d'un groupe de travail spécial à composition non limitée ... qui ... s'attachera à achever ses travaux ... dans les meilleurs délais et suffisamment tôt pour éviter tout hiatus entre la première et la deuxième période d'engagement ». Durant ces débats, une question déterminante pour l'électronucléaire sera le sort fait aux projets électronucléaires qui sont actuellement exclus, pendant la première période d'engagement, de deux des trois mécanismes souples du Protocole de Kyoto, à savoir le mécanisme pour un développement propre et la mise en œuvre conjointe.

A.2.3. Principales questions

Considérations économiques

34. 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, mais pour les nouvelles centrales, leur compétitivité économique dépend de plusieurs facteurs. Premièrement, elle dépend des autres options disponibles. Certains pays ont beaucoup d'autres ressources énergétiques, d'autres moins. Deuxièmement, elle dépend de la demande globale d'électricité dans un pays et de la rapidité de sa croissance. Troisièmement, elle dépend de la structure du marché et du contexte des investissements. Toutes choses étant égales par ailleurs, la structure des coûts des centrales est moins intéressante pour des investisseurs privés dans un marché libéralisé qui

⁴ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant les aspects énergétiques du développement durable et les changements climatiques figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/capacity_building.pdf) et sur le site web de l'Agence : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

encourage des bénéfices rapides que pour un gouvernement qui voit les choses à plus long terme, particulièrement dans un marché régulé qui garantit des bénéfices intéressants. Les investissements privés dans un marché libéralisé dépendront aussi de la mesure dans laquelle ont été pris en compte les coûts et les avantages externes liés à l'énergie (pollution, émissions de GES, déchets et sécurité de l'approvisionnement énergétique). Par contre, les investisseurs publics peuvent prendre leurs décisions en y incorporant directement ces coûts externes. Un autre facteur important est celui des risques au niveau de la réglementation. Le soutien politique au nucléaire est différent d'un pays à l'autre et peut évoluer avec le temps. Un investisseur doit peser le risque de revirements politiques susceptibles d'entraîner l'annulation d'un projet à mi-parcours ou d'occasionner des retards et des hausses des coûts qui compromettraient un investissement initialement intéressant. En outre, les processus d'approbation varient d'un pays à l'autre. Certains sont moins prévisibles que d'autres et, du point de vue d'un investisseur, engendrent davantage de risques d'interventions ou de retards coûteux.

35. La figure A-3 récapitule les estimations des coûts de construction de nouvelles centrales tirées de sept études récentes⁵. A l'exception de la production d'électricité par les centrales au mazout (évaluée dans une seule étude), la tranche supérieure de chaque fourchette de coûts est au moins 100 % plus élevée que la tranche inférieure. Ceci est dû en partie aux différentes hypothèses technologiques retenues dans les études, mais aussi aux facteurs susmentionnés. En outre, les fourchettes dans la figure A-3 n'incorporent que les coûts internalisés. Si, par exemple, l'amélioration de l'auto-suffisance énergétique bénéficie dans un pays d'une priorité suffisamment élevée, la préférence dans une situation donnée n'ira pas forcément à l'option la moins onéreuse.

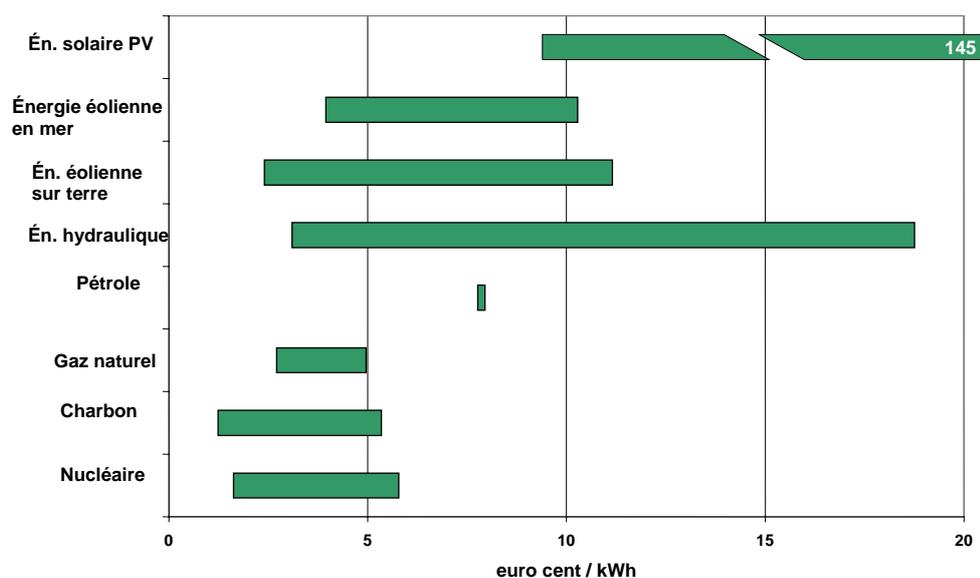


Figure A-3 : Fourchettes des estimations des coûts moyens actualisés associés à la construction de nouvelles centrales tirées de sept études récentes portant sur les technologies de production d'électricité dans divers pays. (PV = photovoltaïque)

⁵ Institut de technologie du Massachusetts, *The Future of Nuclear Power*, Cambridge, Massachusetts, États-Unis d'Amérique (2003) ; Université de Chicago, *The Economic Future of Nuclear Power*, Chicago, Illinois, États-Unis d'Amérique (2004) ; The Royal Academy of Engineering, *The Cost of Generating Electricity*, London, Royaume-Uni (2004) ; Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP), Ministère français de l'économie, des finances et de l'industrie (2003) ; Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie, Tokyo, Japon (2004) ; Matt Ayres, Morgan MacRae and Melanie Stogran, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, Canadian Energy Research Institute (CERI), Calgary, Alberta, Canada, 2004 ; Agence pour l'énergie nucléaire et Agence internationale de l'énergie, *Coûts prévisionnels de production de l'électricité : Mise à jour 2005*, Organisation de coopération et de développement économiques, Paris (2005).

Sûreté⁶

36. L'échange, au niveau international, de données sur l'expérience d'exploitation des centrales nucléaires et, plus particulièrement, la large diffusion des 'enseignements tirés' sont des éléments fondamentaux pour maintenir et renforcer la sûreté d'exploitation de ces dernières. Leur collecte, leur mise en commun et leur analyse sont toutes essentielles à la gestion de la sûreté, et il est empiriquement démontré que l'assimilation de l'expérience d'exploitation des centrales a permis, et continue de permettre, d'améliorer leur sûreté. L'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO) et l'AIEA figurent au nombre des instances internationales dont l'objectif est de faciliter cet échange. Les réunions périodiques organisées dans le cadre du Système de notification des incidents (IRS) de l'AIEA/AEN font aussi partie de ce processus d'échange mondial, dans le cadre duquel des incidents récents peuvent être examinés et analysés en détail.

37. Les indicateurs de sûreté, tels que ceux publiés par l'Association mondiale des exploitants nucléaires et reproduits dans les figures A-4 et A-5, se sont nettement améliorés dans les années 90. Toutefois, dans ce domaine, les progrès stagnent depuis quelques années, notamment en ce qui concerne les arrêts d'urgence non planifiés comme le montre la figure A-4. En outre, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant de vastes possibilités d'amélioration. Depuis l'accident de Tchernobyl en 1986, des efforts considérables ont été faits pour renforcer les caractéristiques de sûreté des réacteurs, mais il existe toujours des installations dans lesquelles l'assistance en matière de sûreté nucléaire devrait avoir la priorité.

38. 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(50)/INF/2) que l'AIEA publie chaque année.

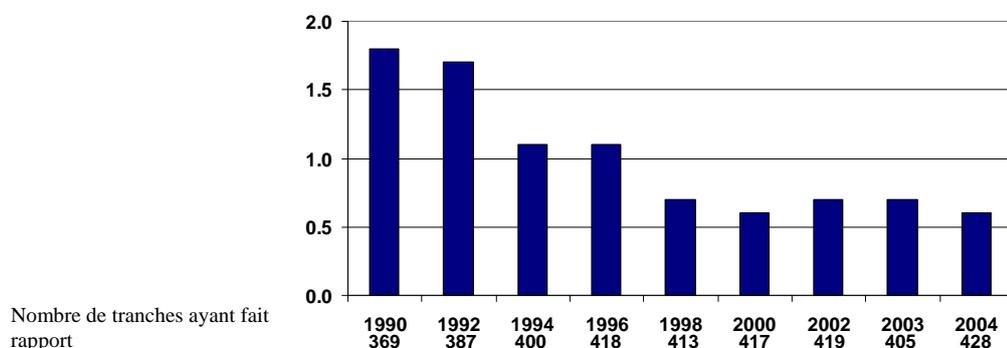


Figure A-4 : Arrêts d'urgence non planifiés pour 7 000 heures de criticité. Source : WANO *indicateurs de performance en 2004*

⁶ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/safety_nuclear.pdf) et sur le site web de l'AIEA : <http://www-ns.iaea.org/>.

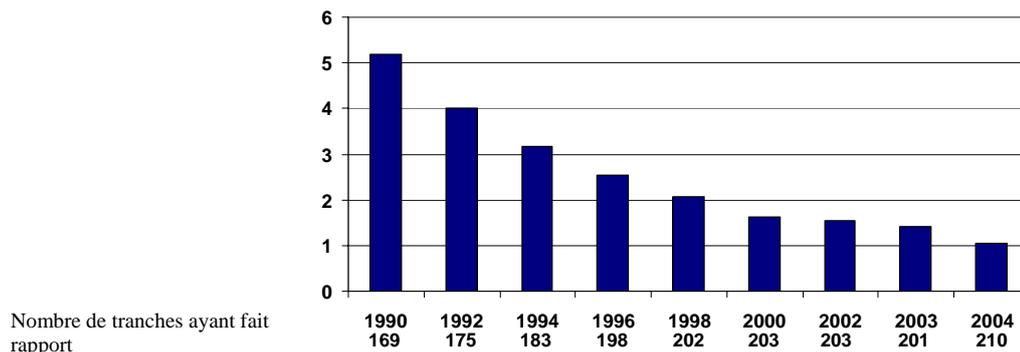


Figure A-5 : Taux d'accidents industriels dans les centrales nucléaires par million d'heures ouvrées. Source : WANO *indicateurs de performance en 2004*

Combustible utilisé, retraitement, déchets et déclassé⁷

39. Les 441 centrales nucléaires en service dans le monde produisent plus de 10 000 tonnes de métaux lourds (tML) de combustible utilisé chaque année, dont moins d'un tiers est retraité pour recyclage en tant que combustible à mélange d'oxydes (MOX), le reste étant placé dans des installations d'entreposage provisoire. Quelque 190 000 tML sont actuellement entreposées, la plupart dans l'eau, mais de plus en plus souvent dans des installations d'entreposage à sec, qui ont maintenant la préférence en cas d'entreposage provisoire hors du site de réacteurs. Les installations d'entreposage à sec ont l'avantage d'être modulaires, ce qui permet d'étaler dans le temps les dépenses d'équipement, et, à plus long terme, les systèmes de refroidissement passifs simplifiés dont elles sont dotées favorisent une réduction des besoins et des coûts aux stades de l'exploitation et de la maintenance.

40. La capacité mondiale actuellement disponible pour le retraitement du combustible utilisé civil est d'environ 5 000 tonnes de métal lourd par an (tML/a). Une nouvelle installation, d'une capacité de 800 tML/a, est en construction à Rokkashomura (Japon). Des essais de mise en service avec de l'uranium y ont commencé en 2004, la mise en service avec du véritable combustible utilisé devrait avoir lieu en 2006 et l'exploitation commerciale est prévue pour 2007. La capacité mondiale de fabrication de combustible MOX, actuellement d'environ 200 tML/a, devrait tourner autour de 350 tML/a d'ici 2010.

41. Les recherches actuellement en cours pour améliorer le processus PUREX employé dans toutes les usines de retraitement commerciales en service, (y compris Rokkashomura) portent sur des processus PUREX avancés, d'autres processus aqueux et plusieurs processus non aqueux.

42. Le moyen le plus efficace d'utiliser du combustible retraité est dans des réacteurs à neutrons rapides. De tels réacteurs sont exploités dans les pays suivants : Allemagne, France, Fédération de Russie, Inde, Japon, États-Unis d'Amérique et Royaume-Uni. Toutefois, les incitations économiques initiales en faveur du retraitement et du recyclage ont diminué après les années 70 pour diverses raisons : croissance ralentie de la capacité nucléaire, estimations des ressources d'uranium continuellement à la hausse et existence de sources secondaires d'approvisionnement. Le seul réacteur à neutrons rapides actuellement exploité en tant que réacteur de puissance, le BN-600 en Fédération de

⁷ De plus amples informations sont disponibles sur le site IAEA.org sous 'Nuclear Technology Review 2006'. Des informations plus détaillées sur les activités de l'Agence concernant le déclassé, le combustible utilisé et les déchets figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel : (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_fuel_cycle.pdf) et (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/radioactive_waste.pdf), ainsi que sur le site web de l'Agence aux adresses : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NEFW/index.html> et <http://www-ns.iaea.org/home/rtws.asp>.

Russie, utilise du combustible neuf à l'uranium hautement enrichi (UHE) et non pas du combustible retraité. Toutefois, l'Inde a commencé en 2004 la construction d'un prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe à Kalpakkam, et des recherches sont en cours dans plusieurs pays (voir la section B.1).

43. Ce sont la Finlande, la Suède et les États-Unis qui ont le plus progressé vers la construction de dépôts de stockage définitif pour déchets de haute activité, mais aucun d'entre eux ne devrait entrer en service avant 2020. La Finlande et les États-Unis ont chacun choisi un site unique, sur lequel ils mènent les recherches nécessaires. La demande de licence pour le dépôt de Yucca Mountain (États-Unis), qui devait être soumise à la NRC en 2004, a pris du retard. La Suède mène des recherches sur deux sites possibles.

44. En novembre 2005, après trois ans de consultations à l'échelle nationale, la Société canadienne de gestion des déchets nucléaires (SGDN) a recommandé une approche 'd'adaptation progressive' pour la gestion du combustible usé canadien. Durant les 30 prochaines années, le combustible usé continuerait d'être entreposé sur les sites des réacteurs, un site approprié pouvant accueillir un dépôt en formations géologiques profondes serait choisi et une décision serait prise quant à la construction à faible profondeur d'une installation centralisée d'entreposage provisoire destinée à recevoir le combustible usé dans une trentaine d'années. Que cette dernière soit ou non construite, le dépôt commencerait, lui, à accueillir du combustible usé dans une soixantaine d'années.

45. En France, les recherches menées sur le stockage définitif en formations argileuses dans un laboratoire de recherche souterrain à Bure progressent bien. La loi de 1991 sur les recherches sur les déchets nucléaires prévoit en particulier que le Parlement statue à ce sujet après 15 ans, soit en 2006, et un débat public officiel a commencé en 2005 dans cette perspective. Cette concertation porte sur les recherches menées depuis 1991 selon trois axes – séparation et transmutation, stockage définitif dans les formations géologiques et procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée – et la nouvelle législation devrait clarifier les mesures à prendre à court et à moyen terme pour progresser dans ces trois domaines.

46. Pour ce qui est du stockage définitif des déchets de faible ou moyenne activité, il convient de noter trois faits intéressants survenus en 2005 en Belgique, en Hongrie et en République de Corée. En Belgique, au moins deux communes ont voté pour devenir candidates à l'implantation de sites destinés à accueillir un dépôt pour déchets de faible activité (DFA). En Hongrie, les habitants de Bataapati ont accepté à une majorité écrasante d'accueillir le dépôt pour le stockage définitif de DFA et de déchets de moyenne activité (DMA). Enfin, en République de Corée, Gyeongju a été désigné pour être le site du premier dépôt de DFA et DMA, sous réserve d'une évaluation positive du site géologique, après que près de 90 % de ses habitants se furent prononcés pour, contre 67 à 84 % dans trois autres communes candidates.

47. En 2005, le déclassement des centrales Trojan et Maine Yankee aux États-Unis s'est achevé. Hormis leurs installations distinctes d'entreposage du combustible usé, les deux sites ont été libérés sans restriction. Ainsi, à la fin de 2005, huit centrales avaient été entièrement déclassées dans le monde et leurs sites libérés sans restrictions. Dix-sept sont partiellement démantelées et mises en attente sûre, 31 sont en cours de démantèlement avant que leur site puisse être libéré et 30 font l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mises en attente sûre de longue durée.

Résistance à la prolifération⁸

48. Ces dernières années, la non-prolifération est au cœur des préoccupations. Les caractéristiques anti-proliférantes d'un système nucléaire de production d'énergie sont celles qui empêchent le détournement ou la production non déclarée de matières nucléaires, ou encore l'utilisation abusive de technologie. Dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF) et du Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO), une attention accrue est portée aux caractéristiques anti-proliférantes intrinsèques, c'est-à-dire qui découlent de la conception technique des systèmes nucléaires de production d'énergie (voir à ce sujet le résumé sur la fission avancée dans la section B.1).

49. En janvier 2006, le Président russe, Vladimir Poutine a présenté une proposition visant à créer un système de centres internationaux fournissant des services pour le cycle du combustible nucléaire, y compris l'enrichissement, sur une base non discriminatoire et sous contrôle de l'Agence. En février 2006, les États-Unis ont annoncé la création d'un partenariat mondial pour l'énergie nucléaire visant à mettre au point des technologies avancées de recyclage n'entraînant pas la séparation du plutonium, 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 de petits réacteurs sûrs et sécurisés bien adaptés aux besoins des pays en développement.

A.2.4. Ressources⁹

50. Les *ressources traditionnelles répertoriées d'uranium* sont estimées actuellement à 3,8 millions de tonnes (MtU) pour celles dont le coût de récupération est inférieur à 80 \$/kg et à 4,7 MtU lorsqu'il est inférieur à 130\$/kg. A titre de référence, le prix de l'uranium sur le marché à la fin de mai 2006 était de 112 \$/kg. Au cours des deux dernières années, pour ces deux catégories, les estimations ont augmenté en raison de nouvelles découvertes et de la baisse des coûts de récupération pour certaines ressources.

51. Les *ressources traditionnelles non répertoriées* représentent, selon les estimations, 7,1 MtU supplémentaires récupérables pour un coût inférieur à 130 \$/kg. Il s'agit notamment des ressources que l'on compte découvrir dans des gisements connus ou dans leurs alentours et de ressources plus hypothétiques dont on pense qu'elles existent dans des zones géologiquement favorables, quoique encore inexplorées. On estime qu'il y a en outre trois autres MtU de ressources hypothétiques dont les coûts de production ne sont pas encore fixés.

52. Les *ressources non traditionnelles d'uranium et le thorium* viennent s'ajouter aux autres ressources. Les premières comprennent quelque 22 Mt d'uranium présent dans des gisements de phosphate et jusqu'à 4000 MtU dans l'eau de mer. La technologie permettant de récupérer l'uranium dans des phosphates est parvenue à maturité et son coût est estimé entre 60 et 100 \$/kgU. Celle qui permet d'extraire l'uranium de l'eau de mer n'a été démontrée qu'à l'échelle expérimentale, et les coûts d'extraction sont actuellement estimés à 300 \$/kgU. Le thorium est trois fois plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre. Bien que les réserves estimées actuelles de thorium plus d'autres

⁸ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant la résistance à la prolifération et les garanties figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel : (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/safeguards.pdf>) et sur le site web de l'Agence : <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>.

⁹ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant les ressources nucléaires figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel : (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_fuel_cycle.pdf), sur le site web de l'Agence : http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfems_home.html et à l'adresse [IAEA.org](http://www.iaea.org) sous 'Nuclear Technology Review 2006'.

ressources atteignent au total plus de 4,5 MtU, ces estimations sont jugées encore prudentes. Elles ne couvrent pas l'ensemble de la planète, et la demande historiquement faible a limité la prospection de thorium.

53. La figure A-6 compare la répartition géographique des ressources d'uranium traditionnelles répertoriées avec celle de la production d'uranium en 2004. Trois pays – l'Australie, le Canada et le Kazakhstan – possèdent 50% des ressources traditionnelles répertoriées et représentent 60 % de la production.

54. En 2004, la production d'uranium a été au total de 40 263 tU, couvrant seulement environ 60 % des besoins des réacteurs dans le monde (67 320 tU), le reste l'ayant été grâce à cinq sources secondaires : les stocks d'uranium naturel et enrichi, le retraitement de l'uranium dans le combustible usé, le combustible MOX dont ^{235}U a été partiellement remplacé par ^{239}Pu issu du combustible usé retraité et le réenrichissement de résidus à l'uranium appauvri (qui contient moins de 0,7 % de ^{235}U).

55. De ces cinq sources, c'est la première qui fournit les contributions les plus importantes, à savoir les stocks constitués de la fin des années 50, qui marquent le début de l'exploitation commerciale de l'énergie d'origine nucléaire, jusqu'en 1990 environ. Durant cette période, la production d'uranium a constamment dépassé les besoins commerciaux, essentiellement en raison d'une croissance de la production d'électricité d'origine nucléaire moins rapide que prévu et d'une production élevée à des fins militaires. Depuis 1990, la situation s'est inversée, et les stocks diminuent. Toutefois, on ne dispose pas facilement d'informations précises à ce sujet, et les futures décisions politiques possibles quant à la conversion des matières militaires à des fins commerciales ajoutent aux incertitudes.

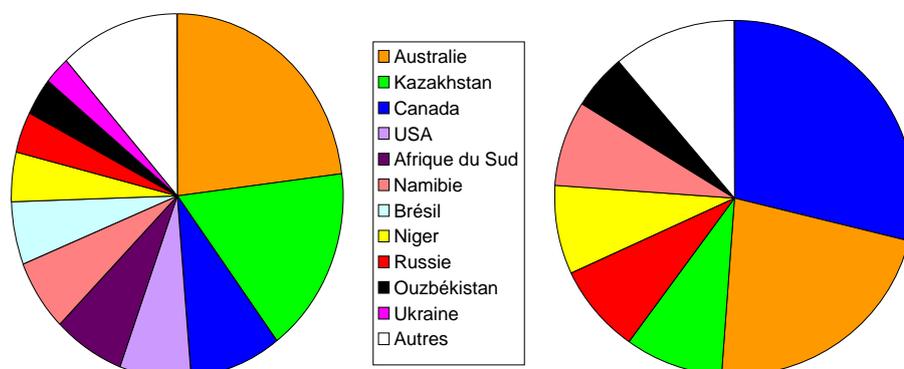


Figure A-6 : Répartition géographique des ressources d'uranium traditionnelles répertoriées (à gauche) et de la production d'uranium en 2004 (à droite).

56. Le recyclage du combustible usé en tant que combustible MOX ne modifie pas sensiblement les besoins en uranium, compte tenu du nombre relativement faible de réacteurs utilisant du combustible MOX et du nombre limité de recyclages possibles au moyen de la technologie actuelle de retraitement et des réacteurs. L'uranium issu du retraitement du combustible usé (uranium retraité) n'est actuellement recyclé qu'en France et en Fédération de Russie. D'après les données disponibles, il représente moins de 1 % des besoins mondiaux.

57. Estimés à quelque 1,5 MtU au début de 2005, les stocks d'uranium appauvri sont importants. Toutefois, le réenrichissement n'est actuellement économique que dans les usines d'enrichissement par centrifugation qui ont des capacités inutilisées et des coûts d'exploitation faibles. Il n'existe pas de données complètes, mais, selon les statistiques de l'Union européenne (UE), en 2004 les livraisons de résidus réenrichis en provenance de la Fédération de Russie représentaient 6 % du total de l'uranium fourni aux réacteurs de l'UE.

58. D'une manière générale, le prix de l'uranium a baissé du début des années 80 jusqu'en 1994 en raison d'une surproduction et de l'existence de sources secondaires, et entre 1990 et 1994, sa modicité a entraîné d'importantes réductions dans de nombreux secteurs de l'industrie mondiale de l'uranium. Dès 2001, toutefois, il a atteint des niveaux inconnus depuis les années 80, son prix au comptant ayant augmenté plus de six fois entre 2001 et 2006.

59. Le tableau A-2 résume la disponibilité potentielle des ressources mondiales traditionnelles d'uranium. Il montre des estimations concernant la durée des ressources d'uranium traditionnelles, pour le présent cycle ouvert du combustible des REO et pour un cycle du combustible dans réacteurs à neutrons rapides, basées sur l'hypothèse que la production d'électricité d'origine nucléaire reste à son niveau de 2004.

Tableau A-2 : Disponibilité des ressources (en années) pour diverses technologies nucléaires

Réacteurs/Cycle du combustible	Nbre d'années de prod. d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2004 (ressources traditionnelles répertoriées)	Nbre d'années de prod. d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2004 (total des ressources traditionnelles)
Cycle du combustible actuel (REO, cycle ouvert)	90	275
Cycle du combustible dans réacteurs à neutrons rapides avec recyclage	2 680	8 140

B. FISSION ET FUSION AVANCÉES¹⁰

B.1. Fission avancée

60. À court terme, la plupart des nouvelles centrales nucléaires connaîtront probablement des améliorations de type évolutif par rapport aux modèles existants. A plus long terme, des modèles plus innovants incorporant des changements radicaux et permettant une diminution sensible du temps de construction et une réduction de l'investissement initial pourraient contribuer à l'avènement d'une nouvelle ère pour l'électronucléaire. Il existe plusieurs modèles innovants dans la gamme des centrales nucléaires de petite taille (< 300 MWe) ou de taille moyenne (300–700 MWe). Ces modèles pourraient être intéressants pour l'introduction de l'électronucléaire dans les pays en développement et les zones reculées.

61. Les conceptions avancées cherchent à introduire des améliorations dans trois domaines principaux : la réduction des coûts, le renforcement de la sûreté et la résistance à la prolifération.

¹⁰ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant la fission avancée figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_power.pdf) et sur le site web de l'Agence : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS.html>. Des informations sur les activités de l'Agence concernant la fusion figurent également dans le rapport annuel : (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_science.pdf). Un rapport de situation élaboré par le Conseil international de la recherche sur la fusion et qui résume la recherche sur la fusion au cours de la dernière décennie passée a été publié dans la revue *Nuclear Fusion* en 2005 (*Nuclear Fusion* 45 (2005) A1–A28).

62. En ce qui concerne la réduction des coûts, alors que certains modèles mettent l'accent sur l'amélioration des stratégies éprouvées comme les économies d'échelle à travers des centrales plus grandes, la réduction du temps de construction grâce à des systèmes modulaires et à la résolution rapide du problème de l'autorisation, la normalisation et la construction en série, la construction de tranches multiples, et le renforcement de la participation locale, d'autres privilégient les nouvelles stratégies de réduction des coûts, y compris les économies de la production en série, l'affinement des codes et des bases de données pour éliminer le surdimensionnement, l'élaboration de concepts 'intelligents' pour détecter les défaillances émergentes et réduire la dépendance envers une redondance et une diversité coûteuses, les systèmes de sûreté passifs, le développement soutenu des études probabilistes de sûreté pour appuyer la planification et la prise de décisions en fonction des risques, la réduction du nombre de composants nécessitant des normes de pureté nucléaire, et l'accroissement de l'efficacité thermique.

63. S'agissant de la sûreté, les travaux d'amélioration technique portent notamment sur l'augmentation de la masse d'eau (dans le cas des réacteurs refroidis par eau), la réduction de la puissance volumique, l'augmentation des coefficients de réactivité négative, les systèmes redondants et de sûreté avec une fiabilité éprouvée élevée, et les systèmes passifs de refroidissement et de condensation.

64. En ce qui concerne la résistance à la prolifération, les mesures intrinsèques incorporées à divers modèles avancés ont trait à la forme chimique des matières nucléaires, leur masse et leur volume, le champ de rayonnement, la production de chaleur et le taux de production spontanée de neutrons ; la complexité des modifications nécessaires pour utiliser une installation et des matières à usage civil en vue de la production d'armements, et les caractéristiques des modèles qui limitent l'accès aux matières nucléaires.

65. D'importants travaux de conception sont en cours sur de grands réacteurs à eau ordinaire (REO) avancés dans les pays suivants : Allemagne, Argentine, Chine, France, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Japon et République de Corée, et dans l'Union européenne. Le Canada et l'Inde travaillent sur des modèles de réacteurs avancés à eau lourde, tandis que l'Afrique du Sud, la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, le Japon et la République de Corée s'emploient à concevoir des modèles avancés de réacteurs refroidis par gaz. L'examen de la conception et de la sûreté d'une unité de démonstration du réacteur modulaire à haute température à lit de boulets en Afrique du Sud a été achevé et une étude est en cours en vue de l'autorisation. La Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon et la République de Corée sont en train de mettre au point de nouveaux réacteurs rapides refroidis par métal liquide.

66. Deux projets internationaux importants visant à promouvoir l'innovation sont venus compléter les initiatives ci-dessus : le Forum international Génération IV (GIF) et le projet international de l'Agence sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO). Le GIF a examiné une gamme élargie de concepts innovants et, en 2002, a choisi six types de systèmes de réacteur pour la coopération bilatérale et multilatérale future : 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. Un accord-cadre sur la collaboration internationale en matière de recherche-développement sur les systèmes nucléaires de la quatrième génération a été signé en février 2005 par le Canada, les États-Unis d'Amérique, la France, le Japon et le Royaume-Uni. Cet accord clarifie les règles fondamentales formulées pour la recherche commune et d'autres activités en coopération et définit les bases de négociation des projets spécifiques du GIF.

67. En 2004, l'INPRO a publié des principes directeurs révisés et une méthodologie pour l'évaluation des systèmes nucléaires innovants (SNI). Les activités en cours comprennent l'achèvement d'un manuel de l'utilisateur sur la méthodologie INPRO pour aider celui-ci dans

l'évaluation des SNI, l'application de cette méthodologie à l'évaluation de ces systèmes dans le cadre d'études nationales et multinationales, l'analyse du rôle et de la structure des SNI pour permettre à ces systèmes de répondre durablement aux besoins énergétiques nationaux, régionaux et mondiaux, et la sélection des domaines les plus appropriés à développer en collaboration. En 2005, le nombre des membres de l'INPRO est passé à 24 avec l'adhésion des États-Unis d'Amérique et de l'Ukraine.

B.2. Fusion

68. En juin 2005, une déclaration commune de toutes les parties aux négociations concernant le réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) a été signée, et il a été décidé de construire ce réacteur sur le site de Cadarache (France). Cette décision a constitué une nouvelle étape importante pour le développement de l'énergie de fusion – la démonstration sur le plan scientifique et technique de la technologie de fusion dans des conditions correspondant à l'exploitation d'un réacteur à fusion pour la production d'énergie. L'Inde est devenue le septième membre de l'ITER en décembre 2005.

69. L'utilisation de l'énergie de fusion nucléaire se heurte à de nombreux obstacles, y compris la nécessité croissante d'avoir accès à des données atomiques et moléculaires fiables et détaillées. À mesure qu'approche la construction d'ITER, de nombreuses questions ayant trait aux paramètres atomiques et moléculaires ou aux interactions plasma-surface revêtent une importance croissante. Plusieurs aspects importants ont été déterminés par le Conseil international de la recherche sur la fusion (CIRF)¹¹ tels que la rétention et l'élimination du tritium, la physique des plasmas avancée, et les impuretés d'éléments lourds. Une initiative sera lancée en 2006 pour étudier et quantifier les propriétés de l'érosion des matériaux des enceintes de confinement des réacteurs de fusion qui auront une incidence directe sur la compréhension de l'absorption du tritium par les composants des enceintes.

70. Une meilleure compréhension de la physique des plasmas à confinement contribue à améliorer les paramètres pour l'opération optimisée des réacteurs de fusion. Des progrès considérables ont été accomplis dans les dispositifs non conventionnels de confinement magnétique tels que les tokamaks sphériques et les stellarators (dispositifs utilisés pour confiner le plasma chaud avec des champs magnétiques en vue de maintenir une réaction de fusion nucléaire contrôlée) en ce qui concerne les paramètres de fonctionnement obtenus. Wendelstein-7X, le stellarator le plus grand du monde en construction en Allemagne, et qui devrait entrer en service d'ici 2010, contribuera à promouvoir la recherche sur le fonctionnement en régime stable pour les réacteurs de fusion.

71. Les progrès enregistrés dans la compréhension de la physique de la fusion à confinement inertiel ont conduit à la conception et à la fabrication de deux installations Laser Mégajoule pour des expériences de déclenchement de la fusion, à savoir l'installation nationale d'ignition des États-Unis d'Amérique en construction à Livermore, et l'installation Laser Mégajoule près de Bordeaux (France). Elles devraient être prêtes pour les expériences en 2008-2010. Une nouvelle méthode de fusion par confinement inertiel, appelée méthode d'ignition rapide, est aussi en cours d'élaboration et nécessite l'utilisation de lasers ultra-intenses. La mise au point de lasers sub-pico seconde ultra-intenses est déjà à un stade avancé dans le cadre du programme d'ignition rapide (FIREX) à Osaka (Japon).

¹¹ Le CIRF a publié en 2005 dans la revue *Nuclear Fusion* (*Nuclear Fusion* 45 (2005) A1–A28) un article intitulé 'Status Report on Fusion Research' qui résume les progrès de la recherche sur la fusion nucléaire au cours de la dernière décennie.

C. DONNÉES ATOMIQUES ET NUCLÉAIRES

72. Une série détaillée et complète de données atomiques et nucléaires est essentielle pour la recherche fondamentale en physique nucléaire et pour la planification, la conception et l'exploitation efficaces des centrales nucléaires, les activités de traitement connexes et les installations de manipulation des déchets, ainsi que pour les applications telles que la médecine nucléaire et les méthodes spécifiques d'analyse basées sur les techniques nucléaires. L'intérêt croissant que suscite l'utilisation des systèmes alimentés par accélérateur (SAA) entraînera une hausse de la demande de données nucléaires fiables de qualité pour la physique/l'ingénierie des réacteurs et les calculs relatifs au transfert de radiation.

73. Des données plus fiables ont été produites pour accroître la confiance dans les évaluations de la fission et de la fusion, y compris des paramètres importants comme la section efficace des neutrons thermiques de l'uranium 238, les données relatives à la loi de diffusion des neutrons thermiques, les sections efficaces actualisées pour les calculs des phénomènes neutroniques pour des dispositifs de fusion et des SAA, et d'autres paramètres atomiques et nucléaires importants. D'autres avancées se poursuivent dans la compilation et l'évaluation des données atomiques et nucléaires, par exemple en vue de produire des données atomiques et moléculaires pour la modélisation du plasma et les impuretés d'éléments lourds dans les réacteurs à fusion.

D. APPLICATIONS DES ACCÉLÉRATEURS ET DES RÉACTEURS DE RECHERCHE

D.1. Accélérateurs

74. L'utilisation des accélérateurs de particules chargées, en particulier des accélérateurs de protons et des accélérateurs d'électrons, continue à promouvoir des progrès importants dans les domaines des matériaux avancés, des soins de santé, des sciences physiques et des sciences de la vie. Les tendances notables sont l'émergence de nouvelles applications telles que l'utilisation des faisceaux d'ions focalisés, par exemple pour le micro-usinage, en nanotechnologie et dans les techniques d'irradiation cellulaire.

75. Le comportement des matériaux non conventionnels dans le domaine des applications des faisceaux d'ions suscite un intérêt croissant. Par exemple, la recherche est en train d'améliorer la connaissance de la relation entre la structure et les propriétés de la prochaine génération d'isolants.

76. Deux nouvelles sources de spallation de faisceaux de neutrons pulsés (l'un des processus permettant de produire un faisceau de neutrons avec un accélérateur de particules) sont en construction au Japon et aux États-Unis. Les sources de spallation existantes comme ISIS au Royaume-Uni et SINO en Suisse sont en train d'être modernisées et de nouvelles applications apparaissent en physique, en physique des semi-conducteurs, en magnétisme et en biologie.

D.2. Réacteurs de recherche

77. La production de radio-isotopes, les applications des faisceaux de neutrons, le dopage de silicium et l'irradiation des matériaux demeurent les principales applications de nombreux réacteurs de recherche. De nouveaux réacteurs de recherche sont en construction comme OPAL en Australie, CARR en Chine, qui est un réacteur avancé, et TRIGA-II au Maroc, ou ont été mis en service récemment comme FRM-II en Allemagne et le réacteur source de neutrons miniature au Nigeria. En

Belgique, la mise au point d'une installation d'irradiation alimentée par accélérateur, MYRRHA, qui devrait servir d'installation de recherche polyvalente à l'échelle européenne, en est à un stade avancé.

78. Le réacteur FRM-II est conçu pour utiliser des faisceaux de neutrons et ses caractéristiques comprennent une source de neutrons secondaire et des accessoires tels que des guides de neutrons pour des expériences spéciales. Ces caractéristiques sont utiles dans l'étude des matériaux polymères souples, des espèces biologiques, des liquides et des matériaux désordonnés. Le réacteur source de neutrons miniature au Nigeria, en revanche, sera largement utilisé pour l'analyse par activation pour des applications dans des domaines comme l'environnement, l'alimentation et l'agriculture.

79. On s'attend à ce que des réacteurs de recherche polyvalents, comme le réacteur OPAL en Australie et le réacteur de recherche avancé en Chine, entrent en service en 2006 avec comme principales activités la production de radio-isotopes, le dopage de silicium et les applications des faisceaux d'ions¹².

80. 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). La poursuite de l'appui pour l'élaboration et la qualification de combustibles à l'UFE à haute densité et pour l'amélioration de la production de molybdène 99 de fission avec des cibles UFE constituent les autres activités de ce programme.

81. On craint pour la fiabilité de l'offre future de radio-isotopes si l'attention due n'est pas accordée maintenant à la satisfaction des besoins futurs concernant les activités d'irradiation des réacteurs de recherche. Il n'y a que quatre grands producteurs industriels de molybdène 99 mais un nombre beaucoup plus élevé de réacteurs de recherche est utilisé pour l'irradiation des cibles UHE/UFE. Aucune tendance claire ne se dégage en ce qui concerne les sociétés industrielles qui envisageraient de passer à l'utilisation des cibles UHE, et les participants au programme RERTR ont accordé une attention accrue à cette question. Le succès de la démonstration, par la Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA) de l'Argentine, de la production de molybdène 99 avec des cibles UFE produites sur place est une avancée notable à cet égard.

E. APPLICATIONS DES RADIO-ISOTOPES ET TECHNOLOGIE DES RAYONNEMENTS

E.1. Applications des radio-isotopes

82. Plus de 150 radio-isotopes différents sous diverses formes sont aujourd'hui utilisés pour différentes applications d'importance économique, y compris dans les domaines de la médecine, de la transformation des aliments, de l'industrie, de l'agriculture, de la sûreté des structures et de la recherche. Les possibilités de développer leurs applications et d'étendre leurs avantages aux pays en développement restent élevées. Les radio-isotopes sont produits dans au moins 25 pays, et plus de 30 autres en sont des producteurs probables comme le rapporte l'enquête AIEA/OCDE¹³. La médecine est le principal domaine d'application des isotopes, suivie de l'industrie et de la recherche.

¹² De plus amples informations sont disponibles sur le site IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review 2006*'.

¹³ Beneficial Uses and Production of Isotopes, Agence de l'énergie nucléaire, Publication OCDE et AIEA, n° 5293, 2005.

83. Les systèmes générateurs de radionucléides continuent à jouer un rôle clé en fournissant des radio-isotopes aussi bien diagnostiques que thérapeutiques pour diverses applications en médecine nucléaire, en oncologie et en cardiologie interventionnelle. On utilise volontiers de l'yttrium 90 pour la radiothérapie parce que son radionucléide précurseur, le strontium 90, peut être produit en grandes quantités par retraitement du combustible usé. La récupération du strontium 90 suivie de la séparation centralisée à grande échelle de l'yttrium 90 ou de la production de générateurs de radionucléides pourrait devenir un processus radiochimique extrêmement important dans les pays qui possèdent des installations de retraitement du combustible.

84. L'établissement de cyclotrons médicaux pour la production de radio-isotopes suscite un intérêt croissant dans de nombreux pays en développement. La production de radio-isotopes d'iode à l'aide de cibles de tellure enrichi est à l'étude comme mode de production économique.

E.2. Technologie des rayonnements

E.2.1. La nanotechnologie dans l'industrie et la santé

85. Des nanocomposés polymérisés réparables par irradiation dotés de propriétés mécaniques de surface améliorées ont été élaborés en Allemagne. Des revêtements transparents résistants aux rayures et à l'abrasion ont été produits par traitement aux rayonnements d'acrylates contenant des niveaux élevés de silice et alumine modifiées nanoscopiques de remplissage.

86. Les gels de polymères macroscopiques sont aujourd'hui des biomatériaux bien établis utilisés ordinairement comme lentilles de contact molles, pansements hydrogel et dispositifs pour médicaments à libération contrôlée. La synthèse, les propriétés et les applications des gels de polymères microscopiques comme les microgels et les nanogels suscitent un intérêt croissant. Les nanogels sont des structures de polymère réticulé submicrométrique de la taille d'une molécule de polymère en solution. Ces gels ont des applications potentielles comme transporteurs de médicaments et de gènes, médicaments polymériques, biomarqueurs, et comme substrats pour la séparation et l'adsorption des biomolécules. Les nanogels sont le plus souvent obtenus par polymérisation d'émulsion. La réticulation intramoléculaire de bobines de polymère unique par irradiation électronique pulsée de courte durée de solutions diluées a été proposée par un groupe en Pologne et a comme avantages l'absence de monomères, d'agents de réticulation et d'autres composés potentiellement toxiques, nécessaires dans les processus traditionnels.

87. La lithographie par faisceaux d'électrons pour la technique d'écriture directe est largement utilisée pour la fabrication de dispositifs de nanocircuits intégrés. Un outil lithographique à faisceaux d'électrons a été utilisé à l'université de Glasgow (Royaume-Uni) pour obtenir des éléments de diamètres si petits qu'ils ne dépassent pas 20 nm sur des pas de 100 nm fournissant des réseaux de nano-dots pour utilisation en génie cellulaire.

E.2.2. Suivi des processus industriels

88. Les radiotraceurs et les sources scellées sont toujours largement utilisés dans diverses industries pour mieux contrôler les processus de production, améliorer l'efficacité des procédures, renforcer la qualité et accroître la quantité des produits, et vérifier les informations obtenues par d'autres méthodes.

89. La tomographie des processus industriels peut fournir des informations détaillée sur la densité de distribution de sections efficaces désignées d'un réacteur chimique. La tomographie à transmission gamma est actuellement utilisée par les concepteurs et les fabricants des systèmes des processus chimiques pour mesurer la densité de la distribution spatiale à l'intérieur des cuves de traitement et des tuyauteries. Toutefois, la mise au point d'un modèle de scanner de tomographie industrielle pour les applications in situ est complexe compte tenu de la diversité des sites, des environnements et des

différences de conception des colonnes des processus industriels. Les systèmes portatifs/transportables d'imagerie par tomographie utilisant des sources de radio-isotopes se développeront sensiblement dans l'avenir comme outil diagnostique indispensable pour les processus et les systèmes industriels.

90. On s'attend à ce que la tomographie à émission monophotonique (SPECT), qui est largement utilisée en médecine nucléaire, soit bientôt utilisée pour le diagnostic des réacteurs industriels. Les informations obtenues par cette technique seront plus fiables et plus spécifiques que celles fournies par d'autres méthodes. La tomographie à émission gamma est une nouvelle méthode d'étude de la dynamique des flux dans les réacteurs industriels. Par exemple, la répartition du flux des liquides dans les réacteurs gaz-liquide catalytiques à lit fixe a été étudiée par cette technique. La figure E-1 montre un exemple d'étude de la répartition radiale du flux de liquide dans une colonne industrielle du genre de celles utilisées en raffinerie.

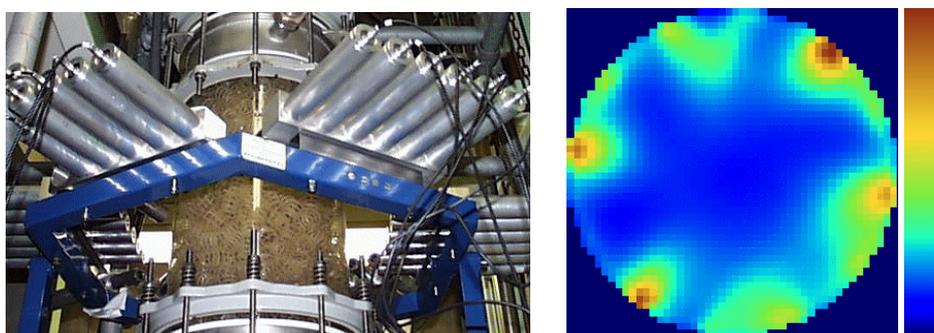


Figure E-1 : Système de tomographie avec 36 détecteurs collimatés installés autour de la colonne. La phase liquide, marquée avec 1,9 GBq de technétium 99m, est injectée, et le résultat montre des effets de canalisation le long des parois de la colonne.

F. TECHNIQUES NUCLÉAIRES DANS L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE

F.1. Amélioration et protection des cultures

91. Les techniques nucléaires sont des outils utiles pour les phytogénéticiens et contribuent de façon décisive à l'amélioration des cultures. Parmi les applications des techniques nucléaires dans ce domaine, on peut notamment citer l'induction de mutations pour accroître la variabilité du matériel génétique à l'aide des rayons gamma, des rayons X et des neutrons rapides ; le marquage des acides nucléiques utilisés comme sondes pour les empreintes génétiques, la cartographie et la sélection au moyen de marqueurs ; et la mutagenèse pour l'analyse de la fonction des gènes.

92. Les mutations induites par rayons gamma, rayons X, neutrons rapides ou substances chimiques ont permis d'obtenir quelques grands succès dans le domaine de l'amélioration des plantes. Des mutants bénéfiques sont sélectionnés et utilisés par les phytogénéticiens depuis plus de 50 ans. À ce jour, la base de données FAO/AIEA sur les variétés de mutants comprend près de 2 500 variétés officiellement enregistrées de mutants de plus de 160 espèces végétales du monde entier. Par exemple, le cultivar de riz VND95-20, de bonne qualité et halotolérant, a été diffusé au Vietnam et est devenu l'une des cinq principales variétés de riz exportées, occupant 28 % du million d'hectares de superficie consacrée à la riziculture pour l'exportation dans le delta du Mékong. La zone cible consacrée au cultivar de riz halotolérant au Bangladesh, en Inde, aux Philippines et au Vietnam couvre une superficie estimée à 4,3 millions d'hectares.

93. Déchiffrer la fonction des gènes est actuellement un objectif majeur en génétique. Les nombreuses informations disponibles sur les séquences d'ADN et les mutants induits deviennent des éléments clés pour les études génétiques en fournissant les ressources nécessaires à la découverte systématique et à l'analyse fonctionnelle des gènes. Le TILLING (Targeting induced local lesions in genomes) est, par exemple, une technique qui permet d'identifier rapidement les mutants des gènes ciblés. Maintenant appliquée au riz, au blé et à l'orge, elle a un bon potentiel en tant que méthode de dissection des gènes qui contrôlent ou influencent les caractéristiques utiles de diverses plantes.

94. L'utilisation et les expéditions transfrontières d'insectes stériles ont jusque-là été exclues de la Norme internationale pour les mesures phytosanitaires n° 3 (NIMP n° 3), le '*Code de conduite pour l'importation et le lâcher des agents exotiques de lutte biologique*', de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) car les agents de lutte biologique ont été définis comme des organismes autoreproducteurs. En avril 2005, une version révisée de la publication NIMP n° 3 intitulée '*Directives pour l'exportation, l'expédition, l'importation et le lâcher d'agents de lutte biologique et autres organismes utiles*', qui inclut expressément les insectes stériles parmi les organismes utiles, a été approuvée. Par ailleurs, les termes 'insecte stérile' et 'technique de l'insecte stérile' (TIS)¹⁴ ont été ajoutés dans le glossaire des termes phytosanitaires de la CIPV. Ces dispositions qui favoriseront l'application de la TIS dans les États Membres, montrent que l'utilisation des insectes stériles comme mesure de gestion intégrée des insectes ravageurs est à présent internationalement reconnue dans le cadre de l'Accord sur l'application des mesures sanitaires et phytosanitaires de l'Organisation mondiale du commerce.

F.2. Production et santé animales

95. Les techniques de diagnostic moléculaires et nucléaires sont particulièrement intéressantes pour la santé animale car elles peuvent augmenter la sensibilité et la spécificité des méthodes de détection des maladies animales à un niveau encore inégalé. Malgré l'utilisation croissante de méthodes non radioactives, le recours aux radio-isotopes reste nécessaire pour l'identification et la caractérisation de protéines, de l'ADN et de l'acide ribonucléique (ARN) en raison du très haut niveau de sensibilité qu'il permet d'atteindre. Les progrès de la micro-fabrication, de la micro-fluidique et des nanotechnologies permettent de produire des instruments plus sensibles, rapides et robustes pouvant fonctionner dans diverses conditions. Grâce aux 'puces-laboratoires', il est possible d'intégrer des diagnostics de laboratoire complexes (traitement des échantillons, détection et amplification de cibles, détection et différenciation) dans un seul dispositif miniaturisé. L'un des objectifs importants de développement actuel des outils de diagnostic est de faire en sorte qu'ils soient utilisables sur le terrain, afin de réduire le temps de réaction pour la mise en œuvre des mesures de prévention ou de lutte. Outre les techniques nucléaires plus classiques, les méthodes nucléaires d'expression génique permettent de mieux comprendre les éléments nutritionnels, reproductifs et pathologiques importants pour réaliser des manipulations simples destinées à améliorer la productivité du bétail.

96. Le radio-immunos dosage (RIA), qui permet de mesurer la concentration d'une molécule donnée dans un échantillon biologique à l'aide de radio-isotopes est traditionnellement la technologie dominante dans le domaine de la reproduction et de la sélection animales. Les radio-isotopes sont également à la base d'un certain nombre de technologies utilisées pour le marquage de nucléotides. L'incorporation de certains d'entre eux (comme le phosphore 32, le phosphore 33 ou le soufre 35) dans des sondes de synthèse d'ADN court permet aux chercheurs d'étudier le polymorphisme de l'ADN (en vue d'identifier les gènes qui influencent les caractéristiques intéressantes) et de confirmer l'ascendance et/ou de mesurer la quantité d'ADN ou d'ARN dans un échantillon biologique donné. Des tests ultérieurs peuvent déterminer les animaux porteurs des formes de gènes supérieures

¹⁴ De plus amples informations sont disponibles sur le site IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review 2006*'.

recherchées, et cette information peut servir à améliorer la précision de la sélection et, par là même, la productivité. En outre, la recherche et l'étude des polymorphismes de l'ADN peuvent contribuer à la caractérisation génétique des races que l'on souhaite obtenir et favoriser la conservation génétique. De nouvelles techniques telles que l'absorptiométrie à rayons X en double énergie, la spectroscopie par résonance magnétique et la tomодensitométrie peuvent offrir des méthodes pour déterminer la composition corporelle, la qualité de la carcasse et la muscularité sans qu'il soit nécessaire d'abattre les animaux.

97. Les progrès récemment réalisés au niveau de la spécificité des radio-immunodosages pour la leptine (une hormone protéique qui joue un rôle clé dans le métabolisme et la régulation du tissu adipeux) et les facteurs de croissance semblables à l'insuline et la meilleure compréhension de leurs mécanismes d'action laissent entrevoir des possibilités pour leur utilisation (seuls ou en combinaison avec de l'eau marquée à l'oxygène 18 et à l'hydrogène 2), ainsi que pour l'utilisation des techniques de mesure de la vitesse d'absorption du dioxyde de carbone faisant appel au carbone 13 ou au carbone 14, pour évaluer l'état nutritionnel, reproductif et énergétique des animaux. Des techniques nucléaires non invasives, telles que l'émission X induite par des protons, l'émission gamma induite par des protons, la spectrométrie de masse à thermo-ionisation, la spectrométrie de masse à source plasma à couplage inductif et la spectroscopie de fluorescence X pour l'analyse élémentaire, ont de plus en plus d'applications nutritionnelles et toxicologiques dans le cadre des études sur le bétail.

F.3. Qualité et sécurité sanitaire des aliments

98. Les systèmes de contrôle des aliments doivent prendre en compte l'ensemble de la chaîne de production alimentaire pour garantir la qualité, la sécurité sanitaire et la salubrité des produits végétaux et animaux destinés à la consommation humaine, aspects qui sont également importants pour les échanges transfrontières. Les services gouvernementaux sont de plus en plus nombreux à appliquer ce concept, la sécurité sanitaire des aliments devenant un sujet de préoccupation croissante pour les consommateurs. Ils s'appuient sur les techniques nucléaires et apparentées pour mettre en œuvre une approche englobant toute la chaîne alimentaire en élaborant des méthodologies, des indicateurs et des principes directeurs destinés à assurer la protection à la source des chaînes alimentaires contre les risques sanitaires grâce à de bonnes pratiques agricoles, et notamment à l'application coordonnée des meilleures pratiques en matière de gestion de l'eau. Ces activités comprennent l'amélioration des techniques d'analyse et de la gestion de la qualité dans les laboratoires de façon à satisfaire aux normes internationales pour les pesticides, les mycotoxines et les résidus de médicaments vétérinaires. Elles comprennent également l'adoption des Lignes directrices pour l'utilisation de la spectrométrie de masse pour l'identification, la confirmation et la quantification des résidus, élaborées de façon concertée, et approuvées par la Commission du Codex Alimentarius FAO/OMS à sa 28^e session.

99. Le succès de l'application des normes internationales relatives à l'utilisation des rayonnements ionisants précédemment adoptées, actuellement en vigueur dans plus de 50 pays, pour la lutte contre les agents pathogènes transmis par des aliments et les insectes ravageurs est notamment illustré par l'adoption récente d'une réglementation harmonisée pour différents types d'aliments dans cinq nouveaux pays.

100. Parmi les activités relatives à l'application des normes internationales pour la protection des consommateurs et la promotion du commerce des produits agricoles, on peut citer la création d'une base de données en ligne¹⁵ sur les premières mesures à prendre par les gouvernements en cas de situation d'urgence nucléaire affectant l'agriculture. Le commerce international des denrées en provenance de régions affectées bénéficiera également des efforts de collaboration visant à réviser et

¹⁵ Cette base de donnée peut être consultée à l'adresse : <http://www.iaea.org/programmes/nafa/dx/emergency/index.html>.

élargir les Limites indicatives pour les radionucléides dans les aliments, applicables dans le commerce international à la suite d'une contamination nucléaire accidentelle du Codex Alimentarius de manière à couvrir d'autres isotopes et à les appliquer pendant une période supérieure à un an après un accident nucléaire ou un événement radiologique.

G. SANTÉ HUMAINE

G.1. Études en matière de nutrition et d'écologie sanitaire

101. Les techniques faisant appel aux isotopes stables, qui ont jusque-là été utilisées comme outils de recherches sur la nutrition, sont à présent aussi utilisées pour élaborer et évaluer des programmes nutritionnels. Elles peuvent être appliquées aux groupes de la population les plus vulnérables, c'est-à-dire les nourrissons et les enfants, précisément parce qu'elles ne font appel qu'à des isotopes stables (non radioactifs). L'utilisation de ces isotopes permet d'améliorer la sensibilité et la spécificité des mesures par rapport aux techniques classiques. On peut, par exemple, mieux comprendre l'efficacité des interventions nutritionnelles en mesurant les modifications de la composition corporelle (masse musculaire) à l'aide de ces techniques. Elles peuvent en outre servir à évaluer l'impact de stratégies alimentaires durables, adaptées aux conditions locales, sur l'état nutritionnel des personnes vivant avec le VIH/sida et mettent en relief l'importance d'une intégration de la nutrition dans un traitement global du VIH/sida, comme l'a récemment souligné l'Organisation mondiale de la santé.

G.2. Médecine nucléaire – imagerie¹⁶ et thérapie

102. L'imagerie PET (tomographie à émission de positons) est actuellement un sujet qui domine la plupart des réunions sur l'imagerie médicale et le nombre de publications sur la PET a considérablement augmenté (voir figure G-1). Cette technique, qui fait appel à des radio-isotopes de période ultracourte attachés à des marqueurs biologiques, permet aux spécialistes de médecine nucléaire d'étudier les fonctions organiques au niveau moléculaire. Elle permet en particulier d'étudier le métabolisme du glucose et des acides aminés dans les organes en utilisant du glucose radiomarqué, ou FDG (fluoro18deoxyglucose), ou de la choline C11. Les images PET fusionnées avec des images réalisées par tomographie informatisée aux rayons X montrent les détails dans toute leur complexité et font apparaître les changements réels et quantitatifs survenus chez le patient, ce qui peut amener à modifier le traitement de la maladie.

¹⁶ De plus amples informations sont disponibles sur le site IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review 2006*'.

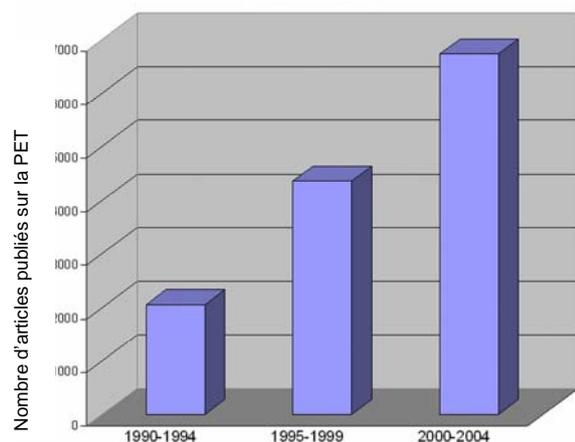


Figure G-1 : Évolution de la parution d'articles sur la PET dans des revues scientifiques biomédicales (source : Medline) au cours des 15 dernières années montrant l'impact de cette technique sur l'imagerie du cancer et d'autres maladies.

103. Les progrès réalisés au niveau de la rapidité des ordinateurs au cours des dernières décennies ont engendré une révolution dans la technologie de l'imagerie médicale. On s'attend à ce qu'au cours des dix prochaines années, la plupart des services de radiologie modernes se dotent d'imageurs à écran plat, passant ainsi à un système 'sans film' et achevant la transition vers la technologie numérique. L'abandon du traitement chimique des films permet de réaliser des économies, d'améliorer sensiblement la qualité et la fiabilité de l'image et est susceptible de réduire globalement l'exposition des patients aux rayons X à des fins de diagnostic. Ces progrès, associés à la nature intrinsèquement numérique des systèmes de tomodensitométrie, jettent les bases d'un système électronique d'enregistrement médical qui pourrait contenir l'intégralité du dossier médical des patients, y compris les études basées sur l'imagerie réalisées tout au long de leur vie.

104. La principale évolution caractérisant le domaine des applications thérapeutiques de la médecine nucléaire est l'utilisation en routine d'anticorps monoclonaux anti-CD20 radiomarqués pour traiter le lymphome et de peptides radiomarqués principalement pour les tumeurs neuro-endocriniennes. On entre enfin dans une nouvelle ère de solutions thérapeutiques ciblées, qui ont nettement moins d'effets secondaires que la chimiothérapie classique. Les spécialistes de médecine nucléaire ont également à leur disposition un grand nombre de radiopharmaceutiques pour des traitements palliatifs efficaces, qui sont particulièrement utiles dans les cas de métastases où la radiothérapie n'est pas possible et où ils apportent une amélioration de la qualité de vie pour un coût avantageux. Les anticorps thérapeutiques radiomarqués permettent actuellement d'améliorer sensiblement le traitement des patients et, lorsqu'ils sont combinés avec des agents chimiothérapeutiques, d'augmenter d'une manière générale, le taux de survie.

G.3. Dosimétrie et radiophysique médicale

105. Le concept de 'dose painting', qui est basé sur les progrès de l'imagerie fonctionnelle, est actuellement la technologie de pointe en matière de traitement du cancer. Avec l'avènement de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), il a été possible de réaliser des études spectroscopiques ou d'obtenir des images fonctionnelles qui montrent des zones de la tumeur avec différents niveaux d'activité. Toutefois, depuis quelques années, la PET est devenue la principale source d'images fonctionnelles. On peut désormais repérer des parties de la tumeur qui pourraient nécessiter des doses de rayonnements plus élevées, par exemple parce que les cellules paraissent déficientes en oxygène, et sont donc radorésistantes, ou parce que l'irrigation sanguine augmente rapidement à un certain endroit, révélant peut-être une pathologie agressive. Il sera donc très certainement possible d'appliquer une dose modifiée à différentes parties fonctionnelles de la tumeur. Il est possible de changer les paramètres du 'dose painting' d'une séance à l'autre en utilisant des images fonctionnelles pour surveiller régulièrement la réaction de la tumeur.

G.4. Radiopharmaceutiques

106. Le technétium 99m reste le radio-isotope le plus utilisé en médecine nucléaire diagnostique dans le monde, avec plus de 40 000 examens par jour. L'utilisation de radiopharmaceutiques dans ce domaine continue à progresser à un taux de 10 à 15 % par an.

107. L'utilisation de radiopharmaceutiques à des fins thérapeutiques est de plus en plus courante et l'on est en train d'en mettre au point un grand nombre qui font appel à des radionucléides émetteurs de particules. Plusieurs radiopharmaceutiques à l'yttrium 90 destinés au traitement du cancer et de l'arthrite, qui en sont au stade des essais cliniques, pourraient être largement utilisés à l'avenir. Le lutécium 177, un radionucléide thérapeutique idéal dont la période est assez longue pour permettre une préparation facile et l'envoi du produit fini, fait l'objet d'une attention accrue.

G.5. Radio-oncologie

108. Le principal progrès dans le domaine de la radiothérapie ces dernières années a été la découverte, grâce à la réalisation de plusieurs essais cliniques de grande qualité, que le fait de compléter la radiothérapie par des agents thérapeutiques pouvait améliorer la survie des patients atteints de cancers courants, tels que celui du poumon, du col de l'utérus, du sein, de la tête et du cou, de l'estomac, du rectum, du cerveau et de la prostate. Toutefois, l'inconvénient de cette thérapie est parfois une plus grande toxicité. Des recherches se poursuivent en vue de modifier les agents thérapeutiques et leurs molécules cibles de façon à préserver leur effet radiosensibilisant sur les tissus cancéreux, tout en réduisant leur toxicité pour les tissus sains. D'autres portent sur le suivi de la toxicité retardée liée à l'utilisation de substances chimiques associée à des rayonnements, ainsi que sur l'identification des molécules cibles qui contribuent à empêcher la mort des cellules cancéreuses après irradiation et des cibles responsables des radiolésions des tissus sains.

109. La curiethérapie, qui consiste à placer des sources radioactives scellées tout près du tissu cible ou en contact avec lui, s'est constamment développée au cours des 20 dernières années. Elle permet d'appliquer en toute sûreté des doses de rayonnements élevées à un volume cible déterminé pendant une courte durée. Les sources à haut débit de dose (HDD) récentes, la technologie de la commande à distance, les techniques chirurgicales et les logiciels de planification des traitements ont contribué au développement rapide de ce moyen de traitement efficace. La mise au point récente de sources HDD au cobalt 60 pourrait notamment permettre d'administrer un traitement moderne par curiethérapie HDD sans avoir à remplacer les sources aussi fréquemment.

H. EAU ET ENVIRONNEMENT

H.1. Ressources en eau

H.1.1. Techniques d'hydrologie isotopique

110. La gestion des eaux souterraines est une question cruciale pour le développement humain durable, en particulier dans les zones arides et semi-arides. La demande croissante en eau ainsi que la disponibilité (de même que souvent la qualité) limitée des ressources en eaux de surface ont entraîné un développement rapide de l'exploitation des eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau, l'irrigation et l'industrie. Pour une planification et des stratégies de développement rationnelles, il est nécessaire au préalable de bien comprendre les propriétés des aquifères (telles que l'origine des

sources d'eaux souterraines, les taux de recharge et de renouvellement, la vulnérabilité à la pollution et les échanges entre les masses d'eau).

111. L'Agence a entrepris de rassembler et de diffuser des données isotopiques concernant des aquifères et des rivières du monde entier. Ces données sont également utilisées pour établir des cartes thématiques des eaux fossiles destinées à aider les responsables à adopter de meilleures pratiques pour la gestion des eaux souterraines.

112. La mise au point d'un spectromètre de masse à source gazeuse à double entrée dans les années 50 a préfiguré le développement exponentiel de l'utilisation des isotopes en hydrologie et en géologie. De nouvelles avancées techniques dans l'analyse isotopique d'échantillons hydrologiques pourraient révolutionner l'application des isotopes dans la gestion des ressources en eau. Un instrument portatif basé sur une technique laser pouvant être utilisé dans un bureau aussi bien que sur le terrain a été mis au point. Relativement peu coûteux et nécessitant peu de qualifications par rapport au spectromètre de masse à double entrée, cet instrument peut être utilisé à un coût minimal par les chercheurs tout comme par les praticiens et devrait permettre de surmonter l'obstacle actuel à une plus large utilisation des isotopes en hydrologie qu'est le problème de la disponibilité des analyses isotopiques. L'emploi de cet appareil pourrait permettre d'effectuer un plus grand nombre de mesures isotopiques à l'échelle mondiale, et d'obtenir ainsi les informations nécessaires pour résoudre certains problèmes hydrogéologiques cruciaux, comme, par exemple, comprendre et gérer la réalimentation des aquifères, mettre en évidence les modes d'écoulement des eaux souterraines ou déterminer les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

H.1.2. Dessalement

113. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour dessaler l'eau de mer ne cesse de progresser, ce qui s'explique par l'augmentation de la demande mondiale d'eau douce et par la percée des réacteurs de faible ou moyenne puissance, qui pourraient se révéler mieux adaptés au dessalement que les réacteurs de forte puissance. Le Japon a accumulé plus de 143 années-réacteur d'expérience dans le domaine du dessalement nucléaire, tandis que le Kazakhstan en avait accumulé 26 avant de mettre à l'arrêt le réacteur à neutrons rapides d'Aktau en 1999.

114. L'Inde procède actuellement à la mise en service industrielle de l'installation de dessalement nucléaire de démonstration de Kalpakkam, qui utilise le procédé de l'osmose inverse depuis quelques années et qui devrait utiliser la technologie du dessalement par étages multiples à partir de 2006. En 2004, elle a mis en service une installation d'évaporation à basse température au réacteur de recherche à eau lourde CIRUS de Trombay en utilisant la chaleur résiduelle de son modérateur pour produire une eau de grande qualité à partir d'eau de mer. En 2005, l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique (KAERI) a demandé un permis de construire pour un prototype de 65 MWth à l'échelle 1/5e d'un réacteur avancé modulaire intégré (SMART) doté d'une unité de dessalement. Le Pakistan a entamé les travaux de construction pour le couplage, à des fins de démonstration, d'une installation de distillation par détentes successives avec le réacteur à eau lourde sous pression de la centrale nucléaire de Karachi. En Chine, un dispositif d'essai est en cours d'installation à l'Institut de technologie de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles pour la validation des paramètres thermo-hydrauliques d'un procédé de distillation à multiples effets. En Égypte, la construction de l'installation d'essai pour le traitement par osmose inverse d'eau préchauffée devrait être terminée en 2006.

H.2. Environnement

H.2.1. Déminage

115. Les recherches sur la possibilité de détecter des engins explosifs, y compris des mines terrestres, à l'aide de techniques nucléaires ont montré que ces dernières n'étaient pas suffisamment fiables pour la détection de cibles pesant moins de 100 g, particulièrement en milieu humide, et que celle qui fait appel à la rétrodiffusion neutronique ne pouvait être employée qu'en zone aride, du fait que c'est le composant à l'hydrogène dans l'explosif qu'elle peut détecter. Il est difficile de trouver une seule technique nucléaire qui soit supérieure ou qui soit la technique de choix pour l'inspection. Les techniques nucléaires sont plutôt censées être utilisées à des fins de confirmation après identification d'un objet/emplacement suspect. Dans ce dernier cas, il faut aussi recourir à des techniques non nucléaires. C'est pourquoi plusieurs groupes de pays développés et en développement poursuivent les recherches, que coordonne l'Agence, en vue de l'application d'une ensemble de techniques dont certaines font appel à des neutrons de différentes énergies (qui servent aussi de sources de neutrons pour des applications sur le terrain).

H.2.2. Radiotraceurs pour le couplage circulation océanique-climat

116. La circulation océanique est l'un des principaux processus qui influencent notre climat. La possibilité d'utiliser des radionucléides comme traceurs pour étudier les processus océaniques est, dans une large mesure, due aux récents progrès des techniques d'analyse et d'échantillonnage propre ainsi qu'aux mesures de haute précision faites par spectrométrie de masse. Ces techniques sont l'un des éléments moteurs du programme international de recherche GEOTRACES, récemment mis en œuvre, qui vise à coordonner les recherches sur le cycle océanique des éléments traces et de leurs isotopes. On compte qu'il contribuera beaucoup à améliorer la compréhension du comportement des radionucléides en milieu océanique.

H.2.3. Bioaccumulation dans la chaîne alimentaire marine

117. Les radionucléides et les métaux peuvent s'accumuler dans les organismes aquatiques où ils peuvent atteindre une forte concentration si l'excrétion est inférieure à l'absorption. Ce processus, appelé bioaccumulation, peut rendre un contaminant potentiellement plus toxique dans la chaîne alimentaire. Des études ont montré qu'il pouvait y avoir un phénomène de bioaccumulation pour des radionucléides et des métaux toxiques, tels que le polonium, le sélénium, le zinc et le cadmium. Il semble que les métaux qui sont liés à des protéines dans la biote ont plus de chances d'être 'bioaccumulés', mais il n'existe pas encore d'évaluation systématique de la bioaccumulation de certains d'entre eux dans les chaînes alimentaires marines. Le Laboratoire de l'environnement marin de l'Agence a entamé des recherches sur une série de métaux en vue de mesurer, à l'aide de radiotraceurs, leur potentiel de bioaccumulation dans différentes chaînes alimentaires marines.

H.2.4. Étude du cycle du carbone à l'aide de l'analyse isotopique de composés spécifiques

118. Les océans contiennent 50 fois la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) présente dans l'atmosphère et absorbent, chaque année, 30 à 40 % du CO₂ produit par l'utilisation humaine de combustibles fossiles. Ils jouent ainsi un rôle central dans l'équilibre de la masse totale de carbone. En utilisant les isotopes du carbone (le carbone 13 et le carbone 14), les géochimistes ont pu suivre les cycles du CO₂ à l'échelle mondiale et ces techniques s'avéreront utiles pour évaluer les futures options pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Les chimistes spécialisés ont réussi à miniaturiser et à fusionner ces techniques isotopiques faisant appel au carbone de manière à mettre au point la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse isotopique, qui permet d'analyser les rapports isotopiques du carbone dans moins d'un millionième de gramme de composé organique et de déterminer, en plus grand nombre, les sources, les cycles et le devenir de composés organiques et de polluants présents dans l'environnement.