

Conférence générale

GC(52)/INF/3

22 juillet 2008

Distribution générale

Français

Original : Anglais

Cinquante-deuxième session ordinaire

Point 16 de l'ordre du jour provisoire

(GC(52)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un *rapport d'ensemble* exhaustif *sur la technologie nucléaire*. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus essentiellement en 2007.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008* passe en revue les domaines suivants : applications énergétiques, fission et fusion avancées, données atomiques et nucléaires, utilisation des accélérateurs et des réacteurs de recherche, techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, environnement, ressources en eau et technologie des rayonnements. On trouvera sur le site web de l'Agence¹, en anglais, des informations complémentaires sur les faits marquants et les tendances concernant la sûreté des aliments, les techniques faisant appel aux isotopes stables pour l'élaboration et le suivi des programmes nutritionnels, les références pour le commerce et le développement, les techniques avancées de traitement, les changements apportés aux systèmes de contrôle-commande des réacteurs, la technologie des réacteurs rapides et les changements climatiques, ainsi que les techniques et les sciences nucléaires.
- Des informations sur les activités de l'AIEA dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires figurent également dans le *Rapport annuel 2007* (GC(52)/9), en particulier dans la partie Technologie, et dans le *Rapport sur la coopération technique pour 2007* (GC(52)/INF/5).
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations spécifiques faites par le Conseil et d'autres observations communiquées par les États Membres.

¹ www.iaea.org/About/Policy/GC/GC52/Agenda/

Table des matières

Synthèse	1
A. Applications énergétiques	3
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	3
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire	5
A.3. Internationalisation de l'industrie des réacteurs nucléaires	6
A.4. La partie initiale du cycle du combustible	7
A.5. Combustible usé et retraitement	9
A.6. Déchets et déclassément	10
A.7. Autres facteurs déterminants pour l'avenir de l'électronucléaire	11
A.7.1. Développement durable et changements climatiques	11
A.7.2. Considérations économiques	11
A.7.3. Sécurité	12
A.7.4. Mise en valeur des ressources humaines	13
B. Fission et fusion avancées	14
B.1. Fission avancée	14
B.1.1. INPRO et GIF	14
B.1.2. GNEP	15
B.1.3. Autres développements concernant la fission avancée	15
B.2. Fusion	16
C. Données atomiques et nucléaires	17
D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche	18
D.1. Accélérateurs	18
D.2. Réacteurs de recherche	19
E. Technologies nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture	20
E.1. Amélioration des cultures	20
E.2. Production accrue de biocarburants	21
E.3. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail	21
E.4. Lutte contre les insectes ravageurs	23
E.4.1. La TIS contre les mouches tsé-tsé	23
E.4.2. La TIS contre les mouches des fruits	23
E.4.3. La TIS contre les pyrales	24
E.5. Irradiation des aliments	24
F. Santé humaine	25
F.1. Approche individualisée du traitement du cancer grâce à la médecine nucléaire	25
F.2. Radio-oncologie	25
F.3. Nutrition	26
G. Environnement	27
G.1. Amélioration de la détection des radionucléides pour l'évaluation de l'environnement terrestre	27
G.2. Qualité des résultats des mesures	27
G.3. Application des technologies nucléaires aux fins de la viabilité de l'environnement marin	28
G.3.1. Développement des applications des analyses radiologiques aux fins de la sécurité sanitaire des produits de la mer	28
G.3.2. Changement climatique et acidification des océans	28
H. Ressources en eau	29
I. Technologie des rayonnements	30
I.1. Production de radio-isotopes	30
I.2. Polymères naturels	31
I.3. Biocontaminants dangereux	32
I.4. Traçage automatisé de particules radioactives	32

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. En 2007, les attentes croissantes récentes concernant l'électronucléaire ont commencé à se traduire timidement par de nouvelles constructions. Sept centrales ont été mises en chantier, les travaux de construction ont repris activement à Watts Bar 2 (États-Unis d'Amérique), et au total, 33 réacteurs étaient en construction à la fin de l'année. Watts Bar 2 est la première centrale construite activement aux États-Unis depuis 1996. La Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis a reçu quatre demandes de licence combinée, les premières soumises pour de nouveaux réacteurs nucléaires dans le pays en près de 30 ans. On a aussi commencé la construction de Flamanville 3, première tranche à être construite depuis 1991.
2. Toutefois, le développement du secteur et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrés en Asie, où se trouvaient 19 des 33 réacteurs en construction. À la fin de l'année, 28 des derniers 39 nouveaux réacteurs qui devaient être couplés au réseau étaient dans cette région.
3. L'Agence a révisé à la hausse ses projections de 2007 à moyen terme sur la croissance mondiale de l'électronucléaire, les portant à 447 GWe et 691 GWe respectivement dans les projections basse et haute pour 2030. D'autres organismes, comme l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE, ont aussi revu leurs projections à la hausse.
4. Les ressources d'uranium signalées ont augmenté significativement par rapport à celles rapportées dans la dernière édition du Livre rouge, *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*, en raison essentiellement des ressources notifiées par l'Australie, la Fédération de Russie, l'Afrique du Sud et l'Ukraine. Le prix de l'uranium sur le marché libre a atteint presque 360 \$ le kilo en juin avant de redescendre à 240 \$ en décembre.
5. La construction de la nouvelle usine d'enrichissement par centrifugation avancée d'USEC aux États-Unis a commencé, et la Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) a lancé les essais de cascade à son usine d'enrichissement par centrifugation à Rokkasho. Le Kazakhstan et la Fédération de Russie ont établi un centre international d'enrichissement de l'uranium en Sibérie orientale, première étape de la proposition du Président russe, Vladimir Poutine, de créer un système de centres internationaux pour fournir des services du cycle du combustible nucléaire, y compris l'enrichissement, sur une base non discriminatoire et sous contrôle de l'AIEA.
6. Dix neuf pays ont signé une déclaration de principes du Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), qui vise à accélérer l'élaboration et la mise en œuvre de technologies avancées du cycle du combustible pour promouvoir le développement, améliorer l'environnement, et réduire les risques de prolifération nucléaire.

7. La NRC a approuvé l'ouverture au public de la plus grande partie des sites des centrales nucléaires de Big Rock Point et de Yankee Rowe pour un usage sans restriction. Dix centrales ont ainsi été entièrement déclassées dans le monde et leurs sites ouverts pour un tel usage. Dix-sept centrales ont été partiellement démantelées et mises en attente sûre. Trente-deux sont en train d'être démantelées avant l'ouverture ultérieure de leurs sites au public, et 34 réacteurs font l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mises en attente sûre de longue durée. En septembre, l'Agence a lancé un nouveau réseau de centres d'excellence pour le déclassement en vue d'améliorer l'échange de connaissances et d'expériences entre ceux qui sont engagés dans le déclassement, et d'encourager les organismes des États Membres développés à participer aux activités des États Membres qui ont besoin d'assistance en matière de déclassement.

8. Les techniques nucléaires et isotopiques continuent d'apporter d'importantes contributions dans les domaines de l'agriculture, de la santé humaine, des environnements marin et terrestre ainsi que de la gestion des ressources en eau. Dans les domaines de l'alimentation et de l'agriculture, la sélection par mutations des plantes appuie la mise au point de nouvelles variétés de cultures ayant des rendements plus élevés ainsi que des avantages considérables pour l'environnement compte tenu de leurs faibles besoins en engrais et de leur résistance accrue aux stress biotiques et abiotiques. L'amélioration génétique des cultures de production de biomasse est utile pour répondre aux demandes croissantes de ces combustibles. L'irradiation continue d'être utilisée à des fins sanitaires, mais aussi, de plus en plus, pour des applications phytosanitaires, notamment en rapport avec les mesures de quarantaine.

9. Dans le domaine de la santé, les progrès enregistrés dans l'utilisation de la tomographie à émission de positons (PET) sont en train de redéfinir de nombreux aspects du traitement du cancer et de fournir la base de traitements plus personnalisés et plus efficaces. La mise au point récente de sources à haut débit de dose (HDD) au cobalt 60 pourrait permettre, non seulement d'administrer un traitement moderne par curiethérapie HDD sans avoir à remplacer les sources aussi fréquemment, mais aussi d'accroître l'efficacité de la radiothérapie. Les techniques faisant appel aux isotopes stables sont utilisées pour élaborer et évaluer les stratégies de lutte contre les carences en micronutriments dans le cadre des efforts visant à améliorer la nutrition.

10. Les techniques d'analyse nucléaire sont actuellement utilisées pour estimer la qualité et la valeur des biens commercialisés. La qualité des résultats des mesures doit être assurée avec la mise en place de l'infrastructure requise et la disponibilité d'outils tels que les matières de référence appropriées.

11. Les études climatiques se concentrent de plus en plus sur les liens entre le climat et les environnements marin et terrestre. Les isotopes marins nous permettent de comprendre les principaux changements dus au climat, tels que l'acidification croissante des océans, ainsi que les effets potentiels sur la biodiversité marine et la pêche. Les effets naissants du changement climatique sur les caractéristiques de la pluviométrie et la disponibilité d'eau potable font des eaux souterraines une ressource encore plus essentielle. Les données isotopiques sont de plus en plus importantes car elles fournissent un ensemble d'informations intégré dans le temps et dans l'espace pour promouvoir l'évaluation et la gestion des eaux souterraines sans investissement important de temps et de ressources.

12. Le radiotraitement des polymères naturels est un domaine prometteur dans la mesure où les caractéristiques uniques de ces matières peuvent être exploitées pour des applications pratiques dans les domaines de la médecine, des cosmétiques, de l'agriculture, de la biotechnologie et de la protection de l'environnement. Autre fait marquant important, de récents résultats de recherche ont montré l'utilité de l'ionisation des rayonnements dans la lutte contre des menaces comme la dispersion délibérée de toxines biologiques.

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

13. À la fin de 2007, il y avait 439 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde qui totalisaient une capacité de production de 372 GWe (tableau A-1). En 2007, l'électronucléaire a fourni environ 15 % de l'électricité produite dans le monde.

14. En 2007, trois nouveaux réacteurs (un en Chine, un en Inde et un en Roumanie) ont été couplés au réseau, tandis qu'aux États-Unis un réacteur précédemment arrêté a été de nouveau couplé au réseau. En comparaison, deux nouveaux réacteurs avaient été couplés au réseau en 2006 contre quatre en 2005, année au cours de laquelle un réacteur précédemment arrêté a été de nouveau couplé au réseau. Aucun réacteur n'a été arrêté en 2007 contre huit et deux arrêts respectivement en 2006 et 2005. En tenant compte des augmentations de puissance, cela s'est traduit par une légère augmentation de 2 526 MWe de la capacité mondiale de production d'électricité d'origine nucléaire en 2007.

15. Sept centrales ont été mises en chantier en 2007 : Qinshan II-4 (610 MWe) et Hongyanhe 1 (1 000 MWe) en Chine, Flamanville 3 (1 600 MWe) en France, Severodvinsk – Akademik Lomonosov 1 et 2 (2×30 MWe) en Fédération de Russie et Shin Kori12 (960 MWe) et Shin-Wolsong 1 (960 MWe) en République de Corée. En outre, la construction du réacteur Watts Bar 2 aux États-Unis a repris activement. À titre de comparaison, trois constructions avaient démarré et une autre avait été reprise en 2006 contre respectivement trois constructions lancées et deux reprises en 2005.

16. Le développement du secteur et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrés en Asie. Comme le montre le tableau A-1, 19 des 33 réacteurs en construction se trouvaient dans cette région. À la fin de l'année, 28 des 39 nouveaux réacteurs qui devaient être couplés au réseau étaient en Asie.

17. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé un renouvellement supplémentaire de licence de 20 ans (pour une durée totale de vie autorisée de 60 ans), ce qui porte à 48 le nombre total de renouvellements de licences approuvés. La licence d'exploitation de Gentilly 2 au Canada a été renouvelée pour quatre années supplémentaires jusqu'en 2010. Celles de Loviisa 1 et 2 en Finlande ont été renouvelées jusqu'en 2027 et 2030 respectivement.

18. En Bulgarie, le site de Belene a été approuvé pour la construction d'une nouvelle centrale nucléaire. Les trois États baltes et la Pologne ont convenu en principe de construire une centrale nucléaire en Lituanie d'ici 2015, et celle-ci a voté la loi nécessaire pour autoriser cette construction. La Turquie aussi a voté une nouvelle loi pour permettre la construction d'une centrale nucléaire.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2007)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2007		Expérience d'exploitation totale en 2007	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			12,6	5,5	46	3
ALLEMAGNE	17	20 430			133,21	25,9	717	5
ARGENTINE	2	935	1	692	6,7	6,2	58	7
ARMÉNIE	1	376			2,4	43,5	33	8
BELGIQUE	7	5 824			45,9	54,1	219	7
BRÉSIL	2	1 795			11,7	2,8	33	3
BULGARIE	2	1 906	2	1 906	13,7	32,1	143	3
CANADA	18	12 610			88,2	14,7	546	1
CHINE	11	8 572	5	4 220	59,3	1,9	77	3
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	20	17 451	3	2 880	136,6	35,3	299	8
ESPAGNE	8	7 450			52,7	17,4	253	6
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	100 582	1	1 165	806,6	19,4	3 291	9
FÉDÉRATION DE RUSSIE	31	21 743	6	3 639	148,0	16,0	932	4
FINLANDE	4	2 696	1	1 600	22,5	28,9	115	4
FRANCE	59	63 260	1	1 600	420,1	76,9	1 582	2
HONGRIE	4	1 829			13,9	36,8	90	2
INDE	17	3 782	6	2 910	15,9	2,5	284	4
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE			1	915				
JAPON	55	47 587	1	866	267,3	27,5	1 331	8
LITUANIE	1	1 185			9,1	64,4	41	6
MEXIQUE	2	1 360			10,0	4,6	31	11
PAKISTAN	2	425	1	300	2,3	2,3	43	10
PAYS-BAS	1	482			4,0	4,1	63	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 619			24,6	30,3	98	10
ROUMANIE	2	1 305			7,1	13,0	11	11
ROYAUME-UNI	19	10 222			57,5	15,1	1 419	8
SLOVAQUIE	5	2 034			14,2	54,3	123	7
SLOVÉNIE	1	666			5,4	41,6	26	3
SUÈDE	10	9 034			64,3	46,1	352	6
SUISSE	5	3 220			26,5	40,0	163	10
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	87,2	48,1	338	6
Total ^{b, c}	439	372 208	33	27 193	2 608,1	15%	13 036	5

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

— 39 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 19,3 % de l'électricité totale produite en 2007 ;

— 158 ans et un mois d'expérience d'exploitation à la fin de 2007.

c. L'expérience d'exploitation totale tient compte des usines mises à l'arrêt en Italie (81 ans) et au Kazakhstan (25 ans et 10 mois).

19. En Finlande, Fortum a soumis un programme d'évaluation de l'impact environnemental pour la construction éventuelle d'un nouveau réacteur sur le site de la centrale nucléaire de Loviisa, et Teollisuuden Voima Oy (TVO) a fait de même pour un nouveau réacteur à la centrale nucléaire d'Olkiluoto. Au Canada, Energy Alberta a demandé une licence pour une centrale nucléaire dans le nord-ouest de l'Alberta. La production d'électricité de cette centrale servira essentiellement à extraire du pétrole des sables asphaltiques de la région.

20. Aux États-Unis, la NRC a délivré ses trois premières autorisations préliminaires de site, en certifiant que les sites de Clinton dans l'Illinois, de Grand Gulf dans le Mississippi et de North Anna en Virginie sont appropriés pour une nouvelle construction. Elle est actuellement en train de traiter deux autres demandes d'autorisations préliminaires de site. Toujours en 2007, la NRC reçu quatre demandes de licence combinée, les premières soumises pour de nouveaux réacteurs nucléaires dans le pays en près de 30 ans. Elle attend au total 21 demandes de ce genre pour un total de 32 réacteurs d'ici la fin 2009.

21. Au Royaume-Uni, le gouvernement a achevé en 2007 une consultation du public sur l'énergie nucléaire et les nouvelles constructions potentielles. En janvier 2008, il a publié un livre blanc intitulé *Meeting the Energy Challenge*, lequel souligne qu'il est de l'intérêt du public que l'énergie nucléaire continue de faire partie des sources d'énergie à indice carbone faible utilisées par ce pays afin de contribuer à la réduction des émissions de carbone et d'assurer la sécurité des approvisionnements énergétiques. Au cours de la phase d'ouverture de l'évaluation de la conception générique de nouveaux réacteurs nucléaires, les organismes de réglementation du Royaume-Uni ont déterminé que les quatre concepts soumis par Énergie atomique du Canada Limitée, AREVA, GE-Hitachi et Toshiba-Westinghouse remplissaient les conditions requises pour le premier stade du processus de préautorisation.

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

22. Chaque année, l'Agence actualise ses projections haute et basse de la croissance mondiale de l'électronucléaire. En 2007, ces deux projections ont été revues à la hausse. Dans la projection basse actualisée, la capacité et la production nucléaires mondiales atteignent respectivement 447 GWe et 3 325 TWh en 2030, contre 370 GWe et 2 660 TWh à la fin de 2006. Dans la projection haute actualisée, elles atteignent 691 GWe et 5 141 TWh.

23. Dans la projection basse, 145 des réacteurs actuels seront arrêtés d'ici 2030, et 178 nouveaux réacteurs seront construits. Quatre-vingt-cinq pour cent des réacteurs qui seront arrêtés seront en Europe orientale et occidentale. De nouveaux réacteurs seront construits dans toutes les régions, mais la plupart d'entre eux le seront en Extrême-Orient et en Europe orientale, et un grand nombre, mais moins élevé, au Moyen-Orient et en Asie du Sud.

24. Dans la projection haute, seuls 82 réacteurs seront arrêtés, et les nouvelles constructions seront multipliées par plus de deux, soit 357 nouveaux réacteurs d'ici 2030. La plupart des réacteurs arrêtés seront en Europe. Les nouvelles constructions seront plus largement disséminées même si elles seront plus nombreuses en Extrême-Orient, en Europe orientale, et dans la région Moyen-Orient et Asie du Sud.

25. Les projections nucléaires de l'Agence ne sont pas les seules à avoir été revues à la hausse en 2007. Des projections actualisées ont aussi été publiées en 2007 par le Service d'information sur l'énergie des États-Unis, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE et l'Association nucléaire mondiale. Ces organismes ont tous augmenté leurs projections nucléaires à l'exception de l'Association nucléaire mondiale qui a réduit légèrement la borne supérieure de sa fourchette. La figure A-1 compare les fourchettes des projections nucléaires de 2007 du Service d'information sur l'énergie, de l'AIE, de l'AIEA et de l'Association nucléaire mondiale.

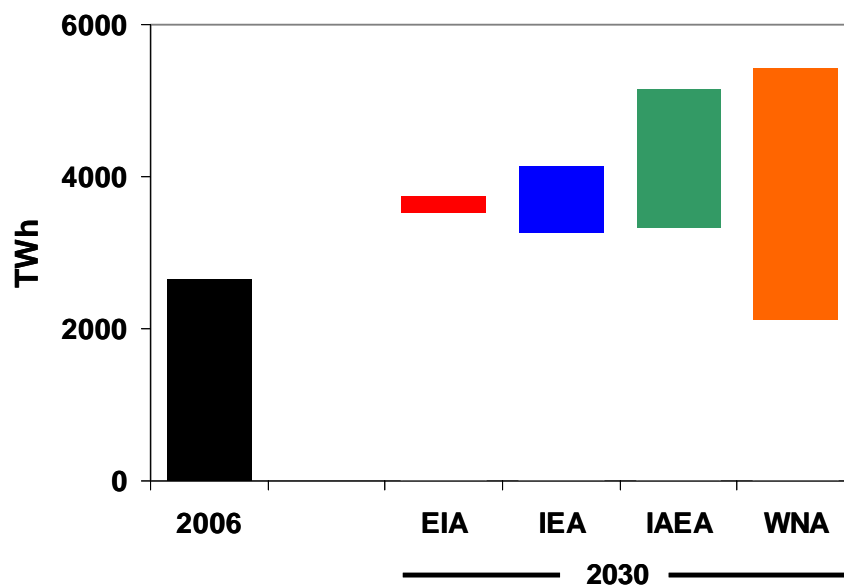


FIG. A-1. Comparaison des projections électronucléaires du Service d'information sur l'énergie, de l'AIE, de l'AIEA et de l'Association nucléaire mondiale.

A.3. Internationalisation de l'industrie des réacteurs nucléaires

26. L'industrie des réacteurs nucléaires a été continuellement restructurée ces dernières décennies comme le montre la figure A-2. Toutefois, les attentes croissantes concernant l'expansion future de l'électronucléaire ont contribué à plusieurs faits marquants majeurs au cours des 18 derniers mois. Vers fin 2006, Toshiba a acquis une participation majoritaire dans Westinghouse. En 2007, elle a alors vendu 10 % de cette participation à Kazatomprom, le producteur d'uranium de l'État kazakh. En outre, vers la fin 2006, AREVA et Mitsubishi Heavy Industries (MHI) ont annoncé la formation d'une nouvelle alliance pour lancer l'élaboration d'une nouvelle centrale nucléaire de 1 000 MWe. General Electric (GE) et Hitachi ont aussi formé une alliance en 2007 pour fournir des services d'exploitation des REB et se lancer dans la concurrence pour des projets de nouveaux réacteurs dans le monde.

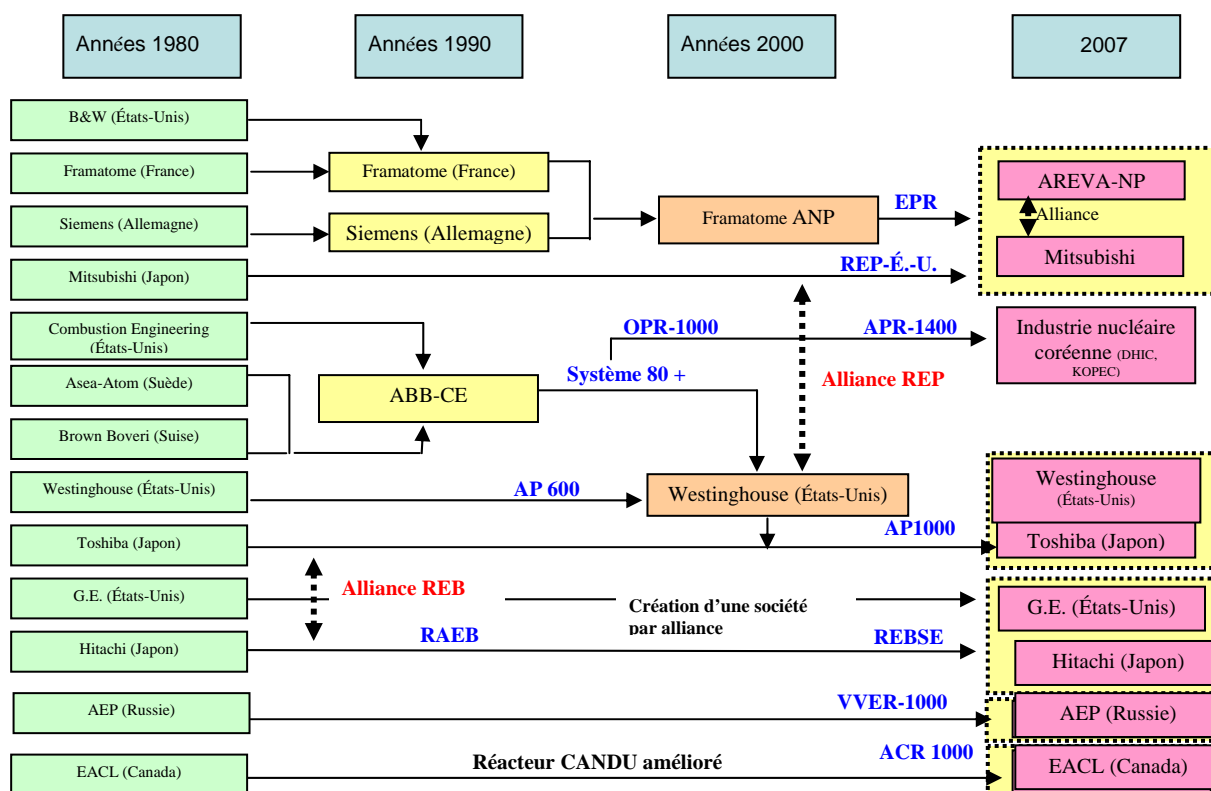


FIG. A-2. Évolution de l'industrie des réacteurs nucléaires (AP600/AP1000 : REP passif avancé (600/1 000MWe) ; EPR : Réacteur européen à eau sous pression ; RAEB : Réacteur avancé à eau bouillante ; REBSE : Réacteur à eau bouillante simplifié européen ; APR 1400 : Réacteur de puissance avancé 1400 ; OPR 1000 : Réacteur de puissance optimisé 1000 ; ACR : Réacteur CANDU avancé ; WWER : Réacteur Vodo-Vodyanoi Energetichesky ; RAEP-É.-U. : Réacteur avancé à eau sous pression des États-Unis ; DHIC : Doosan Heavy Industry Company ; AEP : Atomernergoproject).

A.4. La partie initiale du cycle du combustible²

27. Les ressources traditionnelles répertoriées d'uranium dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU sont estimées actuellement à 5,5 millions de tonnes (MtU). Il s'agit d'une augmentation importante d'environ 800 000 tU par rapport à 2005, qui est essentiellement due aux augmentations notifiées par l'Afrique du Sud, l'Australie, la Fédération de Russie et l'Ukraine. À titre de référence, le prix de l'uranium au comptant a atteint presque 360 \$/kg en juin avant de tomber à 240 \$/kg en décembre.

28. Les ressources traditionnelles non découvertes sont estimées à 7,3 MtU pour un coût inférieur à 130 \$/kgU. 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

² La présente section est inspirée du « Livre rouge » de l'AEN-AIEA (AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE de L'OCDE-AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE. Uranium 2007 : Ressources, production et demande, OCDE, Paris (2008)). De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la partie initiale du cycle du combustible figurent dans les sections correspondantes du Rapport annuel 2006 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) et à l'adresse suivante : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.

zones géologiquement favorables, mais encore inexploitées. On estime qu'il y a en outre 3 MtU de ressources hypothétiques dont les coûts de production ne sont pas encore calculés.

29. Les *ressources non traditionnelles d'uranium et le thorium* viennent s'ajouter aux autres ressources. Les ressources non traditionnelles sont celles pour lesquelles l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit mineur. Actuellement, très peu de pays déclarent les ressources non traditionnelles. Les dernières estimations d'uranium potentiellement récupérable associé à des phosphates, des minerais non ferreux, de la carbonatite, du schiste noir et de la lignite sont de l'ordre de 10 MtU. Le thorium, qui peut aussi être utilisé comme combustible nucléaire, se trouve en abondance dans la nature et est facile à exploiter dans de nombreux pays. Les ressources mondiales sont estimées à environ 6 MtTh. Bien que le thorium ait été utilisé comme combustible dans le cadre de démonstrations, des travaux importants sont encore nécessaires avant qu'il ne puisse égaler l'uranium.

30. On estime que l'eau de mer contient environ 4 000 MtU, mais à un très faible niveau de concentration (3-4 parties par milliard). Il faudrait donc traiter 350 000 tonnes d'eau pour obtenir 1 kg d'uranium. Cette production revient actuellement trop chère. Des recherches ont été menées en Allemagne, aux États-Unis, en Italie, au Japon et au Royaume-Uni dans les années 1970 et 1980. Elles se poursuivent au Japon, avec des coûts de production dans un cadre expérimental estimés à 750 \$/kgU.

31. L'augmentation du prix de l'uranium au comptant a entraîné une nette reprise des activités de prospection et de mise en valeur d'uranium en 2005 et 2006 et cette tendance devrait encore se renforcer en 2007 (fig. A-3). Ce phénomène concerne à la fois les pays qui ont déjà fait de la prospection et mis en valeur des gisements d'uranium par le passé et de nombreux pays qui mènent depuis peu des activités de prospection.

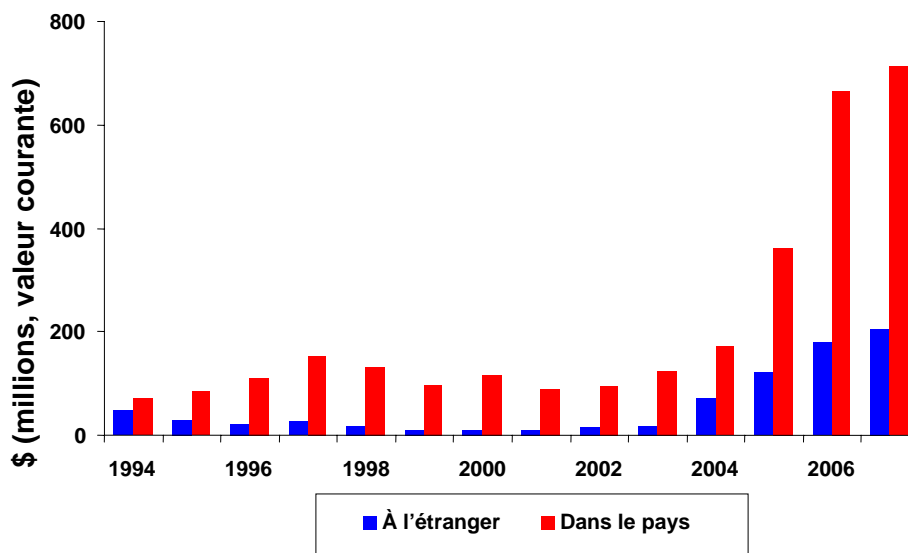


FIG. A-3. Évolution des dépenses déclarées de prospection et de mise en valeur d'uranium. Les valeurs pour 2007 sont des estimations.

32. En 2006, la production mondiale d'uranium s'est élevée à 39 695 tU, soit une baisse de près de 6 % par rapport à 2005 (42 114 tU). On estime que la production va passer à 43 600 tU en 2007. L'Australie et le Canada ont représenté à eux seuls 44 % de la production mondiale en 2006 et, avec

six autres pays (États-Unis, Fédération de Russie, Kazakhstan, Namibie, Niger et Ouzbékistan), ils assurent 92 % de la production.

33. En 2006, la production d'uranium n'a couvert qu'environ 60 % des besoins des réacteurs dans le monde (66 500 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 l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium 239 provenant du combustible usé retraité, et le réenrichissement de résidus d'uranium appauvri (contenant moins de 0,7 % de ²³⁵U).

34. L'étape suivante du cycle du combustible est la conversion. L'offre et la demande sont actuellement équilibrées sur le marché de la conversion, et la capacité d'approvisionnement augmente de manière adéquate pour satisfaire la demande croissante attendue. La Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis a renouvelé la licence de l'usine de conversion d'hexafluorure d'uranium (UF₆) de Metropolis pour 10 ans, soit jusqu'en mai 2017. Parallèlement, la capacité de l'usine a augmenté de 20 %. AREVA a annoncé le lancement du projet Comurhex II, nouvelle installation de conversion d'uranium située dans le sud de la France, dont la production industrielle devrait démarrer en 2012.

35. L'enrichissement est caractérisé par une certaine surcapacité. Toutefois, les usines d'enrichissement par diffusion plus anciennes devraient fermer dans un avenir proche et être remplacées par des installations d'enrichissement par centrifugation qui consomment moins d'énergie. En 2007, la NRC a délivré un permis de construire pour la nouvelle usine d'enrichissement par centrifugation de l'USEC. Les travaux de construction ont commencé en avril et les essais de la cascade principale en septembre. La Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) a lancé les essais de cascade à son usine d'enrichissement d'uranium de Rokkasho avec un nouveau type de centrifugeuse plus efficace. Plusieurs sociétés ont signé des lettres d'intention non contraignantes pour sous-traiter des services d'enrichissement d'uranium auprès de GE-Hitachi Nuclear Energy, qui compte commercialiser la prochaine génération de la technologie SILEX d'enrichissement par laser, désormais appelée technologie GLE (Global Laser Enrichment).

36. En mai, la Fédération de Russie et le Kazakhstan ont créé le Centre international d'enrichissement d'uranium (CIEU) en Sibérie orientale. En décembre, le gouvernement arménien a annoncé qu'il s'associerait à cette initiative, ce qu'il a fait en février 2008. Le CIEU s'inscrit dans le cadre de la proposition faite en 2006 par le président Vladimir Poutine de créer un système de centres internationaux fournissant des services du cycle du combustible nucléaire, y compris l'enrichissement, sur une base non discriminatoire et sous le contrôle de l'AIEA. Des discussions sont également en cours entre la Fédération de Russie et le Kazakhstan pour construire en commun une autre usine d'enrichissement à Angarsk.

A.5. Combustible usé et retraitement³

37. Le combustible usé retiré de l'ensemble des réacteurs dans le monde représente un total de 10 500 tonnes de métaux lourds (tML) par an. Deux stratégies différentes sont mises en œuvre pour la gestion du combustible nucléaire usé. Dans le cadre de la première, le combustible usé est retraité (ou entreposé en vue d'un futur retraitement) pour en extraire les matières utilisables (uranium et plutonium) et fabriquer du combustible à mélange d'oxydes (MOX). Environ un tiers du combustible usé retiré dans le monde a été retraité. La deuxième stratégie consiste à considérer le combustible usé comme un déchet et à l'entreposer en attendant son stockage définitif. Grâce à plus de 50 années

³ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le combustible usé et le retraitement figurent dans les sections correspondantes du Rapport annuel 2006 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

d'expérience de l'entreposage sûr et efficace du combustible usé, il existe un haut niveau de confiance technique dans les technologies d'entreposage en piscine et à sec, ainsi que dans la capacité de faire face à des volumes de plus en plus importants avant la mise en place de sites de stockage définitif pour tous les déchets de haute activité.

38. À ce jour, la Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde et le Japon retraitent la plupart de leur combustible usé ou l'entreposent en vue d'un futur retraitement. Des usines de retraitement sont en service en Fédération de Russie, en France, en Inde et au Royaume-Uni, dont l'usine de Sellafield était cependant hors service en 2007 en raison d'une fuite interne. Au Japon, des essais actifs ont commencé à la nouvelle usine de vitrification de Rokkasho, où des déchets de haute activité séparés sont combinés avec du verre borosilicaté. Toutefois, en raison de la fabrication limitée de combustible MOX, moins de 50 % de la capacité mondiale de retraitement est actuellement exploitée. Le Canada, les États-Unis, la Finlande et la Suède ont pour l'instant opté pour le stockage définitif direct, mais les États-Unis ont annoncé, en 2006, un Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), qui prévoit notamment la mise au point de technologies avancées de recyclage qui seront utilisées dans ce pays. La majorité des pays n'ont pas encore choisi une stratégie. Ils entreposent leur combustible usé et se tiennent au courant des nouveautés associées aux deux solutions.

A.6. Déchets et déclassement

39. Les programmes de dépôts de déchets des États-Unis, de la Finlande, de la France et de la Suède restent les plus avancés, mais il est peu probable que ces pays aient un dépôt en service bien avant 2020. La construction du laboratoire souterrain de caractérisation d'ONKALO, qui pourrait faire partie du dépôt d'Olkiluoto (Finlande), progresse comme prévu. À la fin de 2007, le tunnel avait atteint 2,5 km de longueur et 240 m de profondeur. Suite à la nouvelle législation adoptée en 2006, le programme français de construction d'un dépôt est passé à la phase de choix d'un site, l'objectif étant de demander une licence en 2015. En Suède, deux études de site approfondies ont été finalisées, et une demande de licence pour le site retenu est prévue pour 2009. Aux États-Unis, la préparation de la demande de licence pour un dépôt à Yucca Mountain est en bonne voie et la demande devrait être faite mi-2008. En 2007, le gouvernement canadien a accepté la proposition de la Société canadienne de gestion des déchets nucléaires (SGDN) d'une approche de « gestion adaptative progressive » à long terme du combustible nucléaire usé afin de trouver et de préparer un site avec un contrôle radiologique continu pour une récupération éventuelle.

40. S'agissant de déclassement, la NRC a approuvé l'ouverture au public de la plus grande partie des sites des centrales nucléaires de Big Rock Point (qui a été déclassée en 2006) et de Yankee Rowe pour un usage sans restriction. Les licences de Big Rock Point et de Yankee Rowe continueront de s'appliquer aux installations d'entreposage à sec des sites. Ainsi, à la fin de 2007, dix centrales avaient été entièrement déclassées dans le monde et leurs sites libérés sans restriction. Dix-sept centrales ont été partiellement démantelées et mises en attente sûre. Trente-deux sont en cours de démantèlement avant que leur site puisse être libéré, et 34 réacteurs font l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mis en attente sûre de longue durée, dont quatre réacteurs Magnox au Royaume-Uni (Sizewell A-1 et 2 et Dungeness A-1 et 2), arrêtés le 31 décembre 2006.

41. Suite à une série de consultations avec des experts d'États Membres représentant à la fois des donateurs et des bénéficiaires potentiels, l'Agence a lancé un nouveau réseau de centres d'excellence pour le déclassement lors de sa Conférence générale en septembre 2007. L'objectif de ce réseau est d'améliorer l'échange de connaissances et de données d'expérience entre ceux qui mènent des activités de déclassement et d'encourager les organismes des États Membres développés à participer aux activités des États Membres qui ont besoin d'assistance en matière de déclassement.

A.7. Autres facteurs déterminants pour l'avenir de l'électronucléaire

A.7.1. Développement durable et changements climatiques⁴

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

43. 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 », qui va du 1^{er} janvier 2008 jusqu'en 2012, et ils ont adopté des politiques différentes face à ces exigences. Toutes ces politiques ne profitent pas à l'électronucléaire, en dépit de ses faibles émissions de GES, mais à long terme, celui-ci devrait constituer une option plus intéressante en raison des limites imposées en la matière.

44. En novembre 2007, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)⁵ a publié son quatrième rapport d'évaluation, qui confirme que les effets des changements climatiques ont déjà été observés et que selon les scientifiques des mesures à court terme sont nécessaires pour réduire les émissions de GES. En décembre, la treizième Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP-13) et la troisième réunion des parties au Protocole de Kyoto (COP/MOP-3) se sont tenues à Bali. Ces réunions ont abouti au plan d'action de Bali⁶, qui comprend la décision de « lancer un vaste processus pour permettre l'application intégrale, effective et continue de la Convention par une action concertée à long terme ... » en vue d'adopter une décision à la COP-15 concernant un objectif global à long terme de réduction des émissions. Il s'agit notamment d'engagements ou d'initiatives d'atténuation vérifiables de la part de tous les pays parties développés, de mesures d'atténuation vérifiables de la part des pays en développement parties dans le cadre d'un développement durable, et d'une réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts dans les pays en développement. Le plan d'action ne comprend pas d'objectifs quantifiés précis de réduction des émissions. L'électronucléaire ne figurait pas parmi les principaux sujets de discussion.

A.7.2. Considérations économiques

45. 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

⁴ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les aspects énergétiques du développement durable et les changements climatiques figurent dans les sections correspondantes du Rapport annuel 2006 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) et sur le site : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

⁵ En octobre, le GIEC et l'ancien Vice-Président des États-Unis Al Gore ont obtenu le prix Nobel de la paix pour leurs efforts visant à créer et à diffuser une plus grande connaissance des changements climatiques dus à l'activité humaine, et à jeter les bases des mesures nécessaires pour faire face à ces changements.

⁶ http://unfccc.int/files/meetings/cop_13/application/pdf/cp_bali_action.pdf.

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

46. Parmi les tendances notables en 2007, on a constaté une augmentation des prix de tous les intrants utilisés pour les nouvelles constructions, du béton à la main d'œuvre, en raison de la croissance économique rapide et de la forte demande. Cette tendance pourrait se maintenir et annuler toute baisse escomptée des coûts de construction liée à l'effet d'apprentissage. Elle concerne toutes les sources d'énergie, du charbon à l'éolien, mais plus les coûts sont groupés en début de période, plus l'impact est important. La plus grande incertitude pour les investisseurs potentiels dans l'électronucléaire aujourd'hui est peut-être le futur prix des émissions de carbone dans différents pays.

A.7.3. Sûreté⁷

47. 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 1990. Ces dernières années, la situation s'est stabilisée dans certains domaines. Toutefois, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant de vastes possibilités d'amélioration.

48. 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(52)/INF/2) que l'AIEA publie chaque année.

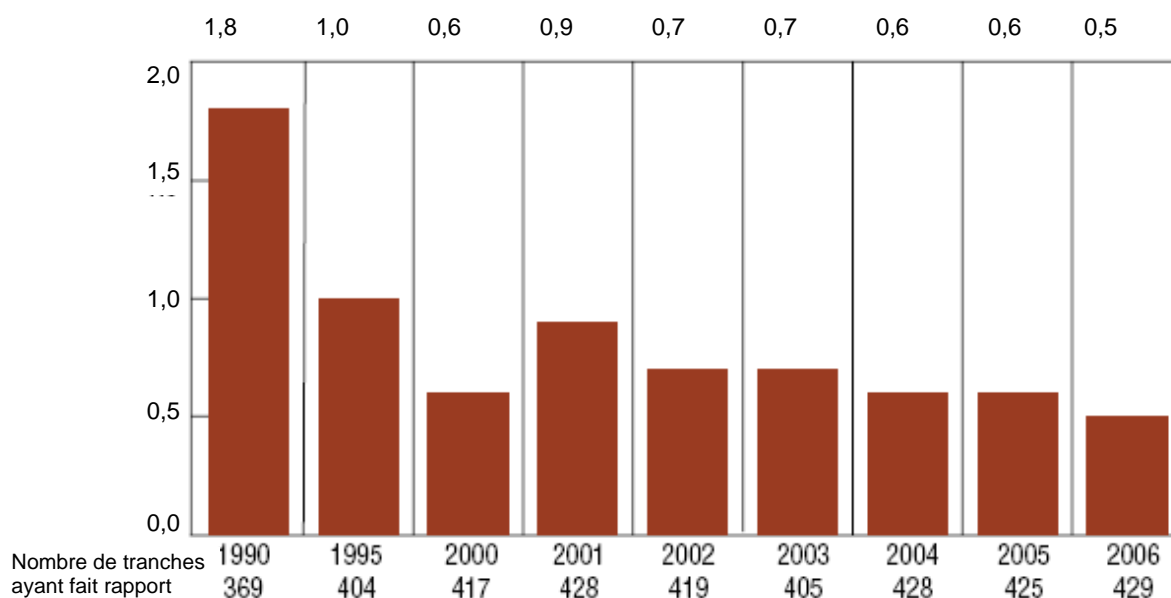


FIG. A-4. Arrêts d'urgence non planifiés pour 7 000 heures de criticité.

Source : indicateurs de performance WANO en 2006.

⁷ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du Rapport annuel 2006 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) et sur le site : <http://www-ns.iaea.org/>.

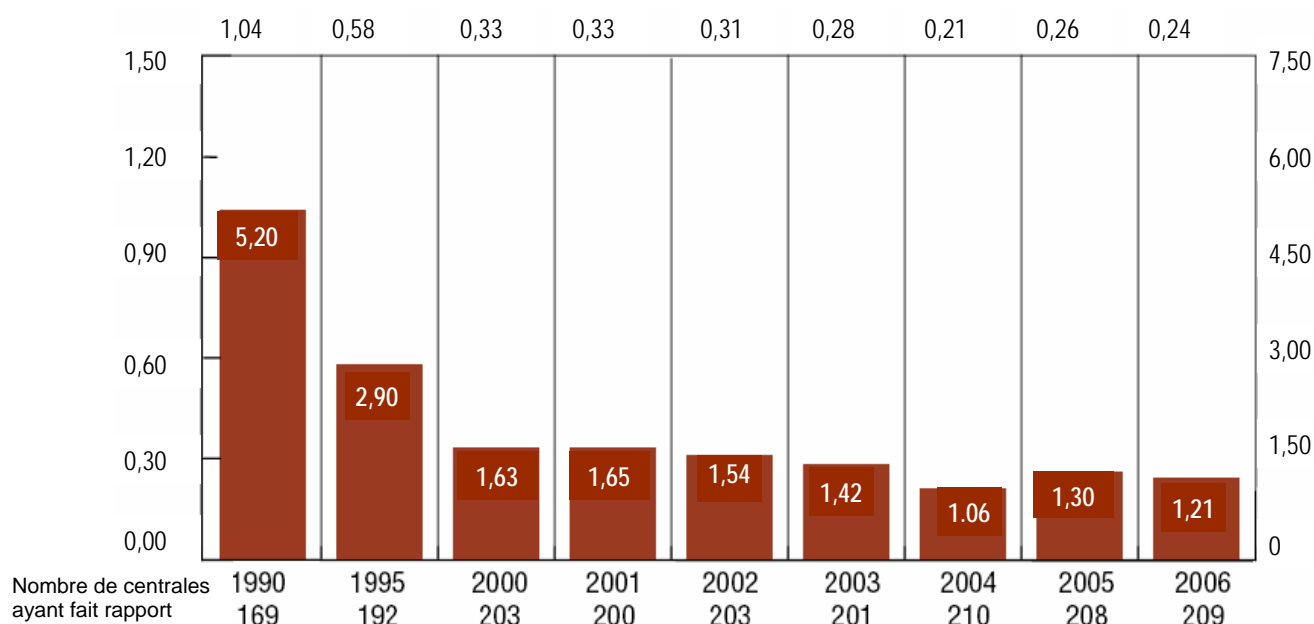


FIG. A-5. Taux d'accidents industriels dans les centrales nucléaires pour 200 000 heures ouvrées (échelle à gauche et valeurs au-dessus du tableau) et par million d'heures ouvrées (échelle à droite du tableau et valeurs sur les colonnes). Source : indicateurs de performance WANO en 2006.

A.7.4. Mise en valeur des ressources humaines

49. Les attentes croissantes suscitées par l'électronucléaire ont attiré l'attention sur les ressources humaines – à la fois ouvriers qualifiés et titulaires de diplômes d'études nucléaires – qui seront nécessaires pour satisfaire ces attentes.

50. En 2007, le Comité de direction de l'énergie nucléaire de l'AEN a publié une déclaration sur le rôle que jouent les gouvernements en veillant à ce que le secteur nucléaire soit doté de ressources humaines qualifiées. Selon l'AEN, des études récentes ont montré que la formation théorique et pratique dans ce domaine avait subi un déclin de plus ou moins grande ampleur dans les pays de l'AEN, et que, si aucune mesure n'était prise, il risquait d'être confronté à une pénurie de personnel qualifié pour assurer la réglementation et l'exploitation en bonne et due forme des installations nucléaires existantes ainsi que la construction de nouvelles installations. Pour l'Europe, cette conclusion a été confirmée dans un rapport de la Commission européenne de 2007 intitulé *The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform : A vision report*, qui recommande un renforcement de la formation théorique et pratique en sciences et en génie nucléaires.

51. Suite à une période de déclin, les inscriptions à l'université connaissent une croissance modeste, influencée par :

- le besoin structurel constant en ressources humaines pour les applications non énergétiques, dont les applications médicales et l'agriculture ;
- le besoin continu des programmes nucléaires et des organisations nucléaires bien établis de remplacer le personnel partant à la retraite ;
- la croissance future attendue qui conduira à une reprise du recrutement dans l'industrie nucléaire, y compris dans les producteurs d'électricité, les organismes de réglementation et les établissements de recherche.

52. La croissance prévue, les initiatives récentes en matière d'innovation technologique (voir section B), l'augmentation du financement public, l'accélération des programmes nucléaires dans des pays comme la Chine et l'Inde et la reprise des programmes nucléaires dans d'autres pays contribuent également à attirer de nouveaux étudiants. Par exemple, aux États-Unis, un financement public spécial a permis de quadrupler, entre 2000 et 2007, le nombre d'étudiants (qui est passé de 500 à 2 000) s'inscrivant à des programmes d'enseignement du 1^{er} cycle dans un domaine nucléaire.

53. On remédie également aux problèmes de ressources humaines en développant les programmes de gestion des connaissances nucléaires par le biais d'organisations internationales et d'organismes de l'industrie nucléaire. Outre l'AIEA et la formation qu'elle dispense dans des domaines allant des simulateurs de réacteurs au droit nucléaire⁸, on peut citer comme exemples parmi ceux-ci des organismes de réglementation tels que la NRC des États-Unis, des producteurs d'électricité comme Energie Baden-Württemberg (EnBW) en Allemagne et des concepteurs tels que l'EACL au Canada. Par ailleurs, les réseaux et la coopération universitaires se sont développés. Le Réseau asiatique d'enseignement en technologie nucléaire compte à présent 28 établissements membres dans 12 pays. Le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires compte aussi 28 membres, ainsi que 16 membres associés, dans 17 pays. La troisième université d'été de l'Université nucléaire mondiale s'est tenue à Séoul (République de Corée) en 2007, avec 102 participants de 35 pays.

B. Fission et fusion avancées

B.1. Fission avancée⁹

B.1.1. INPRO et GIF

54. Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'Agence constitue un cadre international ouvert pour l'étude des options électronucléaires et des besoins associés. Il aide à mettre en place des compétences pour l'élaboration et la mise en œuvre de systèmes d'énergie nucléaire innovants, et assiste les États Membres dans la coordination des projets connexes menés en collaboration.

55. L'INPRO a élaboré une méthodologie pour l'évaluation des systèmes d'énergie nucléaire innovants, qui est appliquée actuellement pour des études d'évaluation par l'Argentine, l'Arménie, le Brésil, la Chine, la France, l'Inde, l'Ukraine et la Commission européenne ainsi que pour une évaluation commune d'un cycle du combustible nucléaire fermé avec réacteurs à neutrons rapides

⁸ En 2007, le programme de coopération technique de l'Agence a appuyé des projets concernant 2 287 participants à des cours et 1 661 bénéficiaires de bourses et de voyages d'étude.

⁹ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les réacteurs à fission avancés figurent dans les sections correspondantes du Rapport annuel 2006 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>). Voir aussi : Terms for describing new, advanced nuclear power plants, TECDOC-936, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1997; Status of liquid metal cooled fast reactor technology, TECDOC-1083, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1999; Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology, TECDOC-1198, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2001; HWRs: Status and projected development, TRS-407, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002; Review of national accelerator driven system programmes for partitioning and transmutation, TECDOC-1365, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2003; Status of Advanced Light Water Reactor Designs: 2004, TECDOC-1391, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2004; Status of innovative small and medium sized reactor designs, TECDOC-1485, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2005; Status of Small Reactor Designs without On-site Refuelling, TECDOC-1536, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2007.

menée par le Canada, la Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'Ukraine.

56. L'INPRO élabore aussi des critères communs d'utilisation pour la mise au point et l'implantation de nouvelles centrales nucléaires dans les pays en développement. L'objectif est de faciliter la compréhension entre les utilisateurs et les détenteurs de la technologie à propos des besoins des utilisateurs.

57. Enfin, les travaux progressent en ce qui concerne 12 propositions de projets de coopération approuvées en juillet 2007 par le comité directeur de l'INPRO.

58. À travers un système de contrats et d'accords, le Forum international Génération IV (GIF) coordonne les activités de recherche sur les six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems* : réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz, réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, réacteurs à sels fondus, réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, réacteurs refroidis par eau supercritique et réacteurs à très haute température.

59. En 2007 ont été arrêtées les modalités d'exécution du projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium en vue de travaux de recherche-développement sur le combustible avancé, la conception des composants et le bilan de la centrale, et de la Démonstration internationale du cycle global des actinides, qui vise à prouver que les réacteurs à neutrons rapides peuvent s'accommoder de l'ensemble des actinides. Les plans de recherches sur les réacteurs refroidis par eau supercritique et les réacteurs refroidis par gaz ont été finalisés, et la négociation des modalités du projet relatif aux réacteurs à très haute température visant à étudier la mise au point et la validation de matériaux, combustibles et éléments du cycle du combustible de ces réacteurs en était aux derniers stades. En février 2008, l'INPRO et le GIF, qui coopèrent en vue d'éviter les doubles emplois et de créer des synergies, ont approuvé un plan d'action commun de 14 points. Ce dernier prévoit notamment l'utilisation par l'Agence du modèle d'évaluation économique (ECONS) du GIF pour l'estimation du coût des réacteurs refroidis par gaz, ainsi que l'utilisation par le GIF du modèle d'évaluation économique de l'Agence pour la production d'hydrogène d'origine nucléaire (HEEP).

B.1.2. GNEP

60. Le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP) est une collaboration de 19 pays¹⁰ qui sont d'accord sur la nécessité d'une expansion du nucléaire dans le monde. L'objectif est d'accélérer l'élaboration et l'application de technologies avancées du cycle du combustible pour favoriser le développement, protéger l'environnement et réduire le risque de prolifération nucléaire. En 2007, le GNEP a créé un comité exécutif ministériel et un comité directeur, tous deux ayant tenu des réunions de mise en route pendant l'année, ainsi que des groupes de travail sur la fiabilité des services liés au combustible nucléaire et le développement des infrastructures.

B.1.3. Autres développements concernant la fission avancée

61. Outre l'INPRO, le GIF et le GNEP, un certain nombre de pays, de sociétés et de partenariats mènent des activités de recherche, de mise au point et d'implantation de réacteurs à fission avancés. Ces programmes ont été résumés dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007*¹¹. Les

¹⁰ À la fin de 2007.

¹¹ <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/ntr2007.pdf>.

faits nouveaux survenus en 2007 ont été essentiellement dans la continuation des progrès enregistrés en 2006 et ne sont donc pas récapitulés à nouveau ici.

B.2. Fusion

62. Les efforts internationaux visant à maîtriser la fusion comme future source d'énergie ont bénéficié d'un ferme engagement des sept parties au projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) (Chine, États-Unis, Fédération de Russie, Inde, Japon, République de Corée et Union européenne) avec la finalisation et la signature de l'Accord sur la mise en œuvre conjointe lors d'une réunion ministérielle à Paris, le 21 novembre 2006. L'accord a ensuite été ratifié par tous les gouvernements concernés. Il est entré en vigueur le 24 octobre 2007, l'Organisation internationale ITER pour l'énergie de fusion acquérant ainsi la personnalité juridique. L'Agence est associée à cette initiative internationale majeure depuis plus de 20 ans et les parties à l'accord ITER ont exprimé le souhait qu'elle continue de participer au projet. L'Agence joue le rôle d'un important point de contact international pour les parties au projet ITER et tous les États Membres en ce qui concerne les activités de formation théorique et pratique liées à la fusion. Des experts travaillant sur des dispositifs à fusion plus petits peuvent influencer la conception finale des réacteurs à fusion en se rencontrant régulièrement sous les auspices de l'AIEA pour discuter de leurs réalisations techniques. L'Agence sert aussi de cadre d'échanges à des experts internationaux travaillant sur la conception de centrales sur la base du confinement magnétique et d'autres solutions. La future centrale de démonstration à fusion tirera parti de l'expérience acquise grâce au projet ITER.

63. En vue d'accélérer les applications concrètes de l'énergie de fusion, EURATOM et le Japon se sont entendus pour collaborer dans le cadre de l'accord sur une « approche plus large » pendant les dix prochaines années. L'infrastructure requise pour une installation de démonstration produisant de l'électricité à partir de l'énergie de fusion comprend notamment l'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion (IFMIF) qui est destinée à tester et à homologuer les matériaux pour les réacteurs à fusion.

64. La cinquième Conférence internationale sur les sciences et les applications en fusion inertielle, tenue au Japon en septembre 2007, a mis en lumière les résultats obtenus avec des lasers, des rayonnements ou des faisceaux d'ions lourds pour comprimer la pastille de deutérium-tritium. L'intégration d'une réunion technique de l'Agence à cette conférence internationale a donné la possibilité à des experts, bénéficiant d'un soutien au titre d'un projet de recherche coordonnée sur l'énergie de fusion inertielle, de présenter leurs travaux à un auditoire nombreux et expérimenté, comprenant de grandes équipes comme celles de l'Installation nationale d'ignition des États-Unis, du projet français Laser Mégajoule et de l'Expérience d'ignition rapide (FIREX) japonaise à l'Institut d'ingénierie laser d'Osaka (Japon). L'année 2008 marque le 50^e anniversaire de la diffusion des résultats de la recherche civile sur la fusion nucléaire lors de la deuxième conférence « L'atome pour la paix » tenue à Genève en 1958. La 22^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion (FEC-2008) se tiendra cette année en octobre au même endroit, le Palais des Nations à Genève, et sera co-organisée par la Suisse pour commémorer la conférence de 1958.

65. L'intérêt pour les activités concernant la fusion augmente dans beaucoup de pays. C'est ainsi que le Ministre brésilien de la science et de la technologie a lancé récemment un réseau brésilien de recherche sur la fusion. Ce réseau fédérera les activités des différents universités, établissements de recherche et laboratoires pour établir les priorités et encourager la collaboration internationale. Le Portugal a accueilli des expériences communes sur la fusion, permettant à 29 jeunes experts internationaux d'utiliser le tokamak portugais ISTTOK pour des expérimentations sur la conception future des expériences sur la fusion et la participation à distance à de telles expériences.

C. Données atomiques et nucléaires

66. La Conférence internationale sur les données nucléaires pour la science et la technologie a eu lieu à Nice (France) du 22 au 27 avril 2007. Au cours de six jours de débats intensifs, les participants ont plus particulièrement insisté sur les besoins en données pour : les réacteurs et les cycles du combustible innovants (réacteurs à fission plus sûrs, propres et économiques) ; les efforts concernant les réacteurs à fusion (ITER) et les essais de matériaux pour de telles installations (installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion) ; les systèmes alimentés par accélérateur destinés à la transmutation des déchets nucléaires et à la production d'énergie ; les applications médicales, y compris la production de radio-isotopes, les simulations informatiques des doses aux patients et les thérapies avancées du cancer à l'aide de particules chargées ; les techniques d'analyse adoptées pour l'étude de biens culturels et les analyses de la composition des matériaux.

67. Les scientifiques collaborent dans chacun de ces domaines, et des efforts sont faits aux niveaux national et international pour élucider et résoudre les problèmes de données atomiques et moléculaires afin d'améliorer la compréhension et la quantification dans le cadre de telles études.

68. Un nouveau projet baptisé EFNUDAT (installations européennes de mesure des données nucléaires), initiative intégrée relative aux infrastructures financée par la Commission européenne, a été lancé à Karlsruhe (Allemagne) le 11 janvier 2007. Le principal objectif de l'EFNUDAT est de promouvoir l'utilisation cohérente et l'intégration des services liés aux infrastructures par la mise en réseau, l'accès transnational des installations participantes pour les mesures de données nucléaires et des activités communes de recherche. L'EFNUDAT constituera une plateforme pour l'intégration des efforts scientifiques d'obtention de mesures de haute qualité des données nucléaires aux fins des études sur la transmutation des déchets et de la conception des systèmes de quatrième génération à l'étude pour réduire la quantité de déchets radioactifs résultant de la production d'électricité.

69. Les États-Unis et l'AEN ont publié de nouvelles bibliothèques pour applications nucléaires en 2006-2007 (ENDF/B-VII et JEFF-3.1.1, respectivement) dans lesquelles d'importantes quantités de données nouvelles ont été introduites pour améliorer encore la caractérisation et le contrôle des opérations concernant les réacteurs à fission et à fusion. Les données serviront à améliorer la fiabilité et l'efficacité, et contribueront à la réduction des déchets. Des données pour la mise au point de systèmes alimentés par accélérateur peuvent aussi être extraites. Ces bibliothèques et la base de données expérimentales sur les réactions nucléaires (EXFOR) sont utilisées pour des analyses nucléaires non destructives telles que l'analyse par activation neutronique et l'analyse par faisceau d'ions, qui servent à la caractérisation chimique et isotopique d'objets de valeur sur lesquels on peut ne prélever que de très petits échantillons.

70. Outre la radiographie traditionnelle et les sources bêta et gamma pour le traitement et le diagnostic, l'irradiation directe des patients avec des particules chargées produites en accélérateur est de plus en plus utilisée. L'un des avantages des particules chargées est que l'on évite d'irradier les tissus sains (fig. C-1). Comme on a besoin de données précises pour concevoir et planifier les installations de traitement des patients, l'Agence encourage l'évaluation des données sur les interactions avec les particules chargées aux fins des applications médicales.

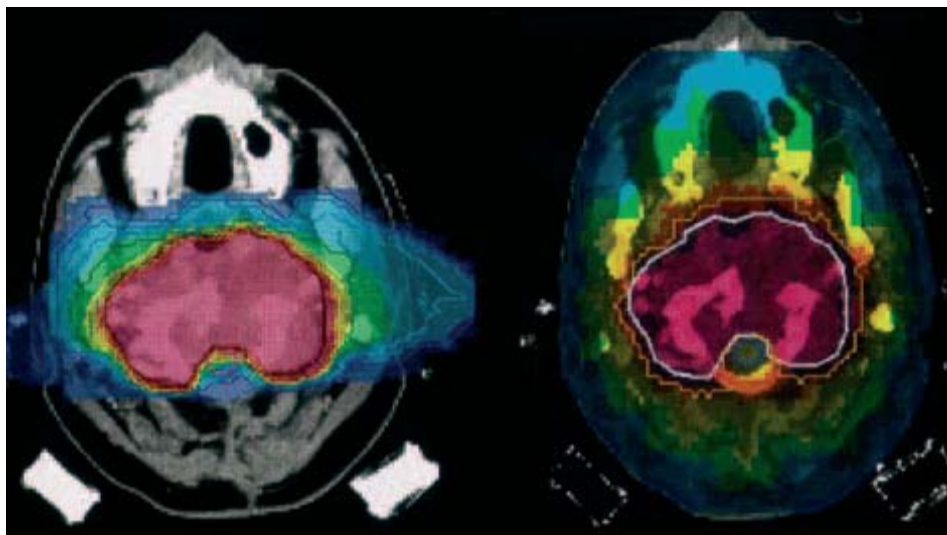


FIG. C-1. Comparaison d'un plan de traitement avec des ions carbone (à gauche) et la radiographie X classique (à droite). Le volume cible est irradié, mais la dose aux tissus sains est beaucoup plus faible avec les ions carbone. La précision de la planification dépend de la fiabilité de la base de données sur les particules chargées (source : GSI (Allemagne)).

D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

D.1. Accélérateurs

71. La construction du premier accélérateur au monde à champ fixe et gradient alterné à focalisation non invariante (NS-FFAG) (fig. D-1) a commencé au laboratoire de Daresbury (Royaume-Uni). Inventé en 1999, cet accélérateur devrait avoir un impact majeur sur la prochaine génération d'accélérateurs hospitaliers pour traitement du cancer par faisceau de protons et d'ions carbone. Il est plus petit, plus simple à utiliser et moins onéreux que les cyclotrons et synchrotrons utilisés en thérapie du cancer. Cet accélérateur NS-FFAG à faisceau d'électrons permettra d'obtenir des informations pour la conception et la construction d'un accélérateur prototype pour applications médicales, et des connaissances pour évaluer son potentiel en tant que guide protonique pour les réacteurs sous-critiques alimentés par accélérateur, la transmutation des déchets et la recherche sur les matériaux. Ce premier NS-FFAG est conçu dans le cadre d'une collaboration internationale à laquelle participent le Laboratoire national de Brookhaven (BNL), l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), le Laboratoire national de l'accélérateur Fermi (Fermilab), le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC), TRIUMF et les centres scientifiques dotés d'accélérateurs du Royaume-Uni ; il devrait entrer en service en 2009.

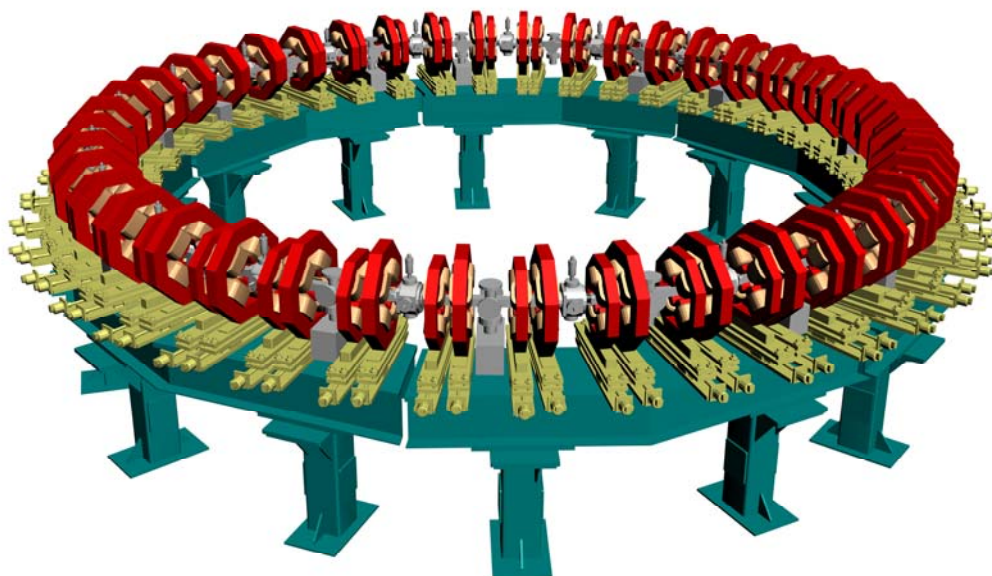


FIG. D-1. Schéma de l'anneau du NS-FFAG.

D.2. Réacteurs de recherche

72. En France, la construction du réacteur d'essai de matériaux Jules Horowitz (100 MWth) a commencé en mars 2007. Infrastructure clé de l'UE aux fins du développement de l'électronucléaire, ce réacteur, qui servira à produire des radio-isotopes et à irradier du silicium pour usage en électronique, est construit par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) français et financé par un consortium international. En attendant que du combustible uranium-molybdène (U-Mo) à l'uranium faiblement enrichi (UFE) de haute densité soit disponible, le réacteur démarrera avec du combustible au siliciure d'uranium enrichi à 27 %. En Belgique, la mise au point d'une installation d'irradiation alimentée par accélérateur, MYRRHA, en est à un stade avancé. MYRRHA devrait servir d'installation de recherche polyvalente à l'échelle européenne pour étudier notamment la transmutation des déchets de haute activité à longue période et la performance de composants et matériaux innovants pour les futurs systèmes énergétiques.

73. La coopération régionale a été longuement discutée à la Conférence internationale sur la gestion sûre et l'utilisation efficace des réacteurs de recherche qui s'est tenue à Sydney (Australie) du 5 au 9 novembre 2007. La conférence a conclu notamment que la collaboration internationale avait donné de bons résultats dans plusieurs cas, et qu'elle était essentielle pour répondre aux besoins des clients et conserver à l'avenir des institutions financièrement solides ; que les consortiums, les coalitions et les réseaux de groupes de pairs pouvaient assurer et préserver une utilisation efficace ; et que l'Agence devrait continuer à faciliter la formation de groupes d'organismes exploitant des réacteurs de recherche, en reconnaissant qu'aucun modèle ne convient pour toutes les situations.

74. Le programme sur la réduction de l'enrichissement pour les réacteurs de recherche et d'essai (RERTR), et d'autres initiatives comme l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale, visent à convertir les réacteurs de recherche pour remplacer le combustible à l'uranium hautement enrichi (UHE) par du combustible à l'UFE. Dans le monde, 55 réacteurs de recherche avaient été convertis au combustible UFE à la fin de 2007 et 46 autres devaient être convertis aux combustibles qualifiés existants. La mise au point et la qualification de combustibles avancés U-Mo de très haute densité sont nécessaires pour convertir à l'UFE 28 autres réacteurs de recherche. La coordination internationale de la mise au point et de la qualification de combustibles UFE de haute densité, qui sont essentiels, a bien

progressé, comme il ressort de la réunion annuelle du programme RERTR et de la Réunion internationale spécialisée sur la gestion du combustible des réacteurs de recherche (RRFM) en 2007.

75. Les tentatives de résoudre les problèmes de comportement des combustibles U-Mo en dispersion de très haute densité, notamment à puissance et température élevées, ont été signalés dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2007*. Plusieurs remèdes potentiels, dont des modifications de la chimie du combustible et de la matrice ou le remplacement de l'aluminium de la matrice par un autre matériau, de même qu'une autre stratégie d'élimination complète de la matrice (combustible monolithique) ont été étudiés en collaboration par un groupe de travail international sur la mise au point de combustibles comprenant l'Allemagne, l'Argentine, le Canada, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et la République de Corée.

76. Les résultats de l'examen après irradiation de miniplaques de combustible U-Mo en dispersion irradiées lors d'essais aux États-Unis montrent que l'ajout de 2 à 5 % de silicium réduit considérablement les interactions entre le combustible et la matrice et résout efficacement les problèmes de gonflement aux puissances et aux températures des essais.

77. Les résultats des essais d'irradiation réalisés en France sur des plaques U-Mo en dispersion de taille réelle avec de la poudre U-Mo atomisée et différentes compositions de la matrice d'aluminium, avec ou sans addition de silicium, font apparaître une très bonne performance sous irradiation à température et taux de combustion élevés. Ce comportement est, en principe, attribuable à la présence d'une couche protectrice d'oxyde autour des particules.

78. Du combustible monolithique U-Mo à densité d'uranium plus élevée est requis pour la conversion des réacteurs de recherche à haute performance et sa mise au point fait l'objet d'un effort soutenu. Des miniplaques de combustible monolithique ont été irradiées avec de bons résultats tant à des puissances volumiques et taux de combustion modérés qu'à des puissances volumiques et taux de combustion très élevés. Différentes techniques de fabrication de combustible U-Mo monolithique sont en cours de mise au point et à l'étude.

E. Technologies nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture

E.1. Amélioration des cultures

79. Les mutations induites sont devenues la méthode de choix pour mettre au point des variétés végétales supérieures et se sont traduites par la diffusion officielle pour la mise en culture d'environ 3 000 variétés mutantes (fig. E-1). Les mutants de la première génération, conformément aux objectifs visés alors par la sélection végétale, répondaient au besoin d'accroissement des rendements en améliorant l'efficacité d'utilisation des nutriments et la résistance aux stress biotiques et abiotiques. Dès lors que les rendements des cultures les plus importantes plafonnent, les programmes de sélection s'attachent désormais à introduire des caractéristiques à valeur ajoutée qui permettent la diversification des utilisations finales, dégagent des revenus supérieurs grâce à une compétitivité accrue et répondent à des exigences alimentaires spécifiques. Ces caractéristiques exigent seulement des modifications subtiles des facteurs héréditaires (gènes), situation qui convient tout particulièrement à la mutagenèse induite.

80. Les variétés végétales mutantes de diffusion récente présentant des caractéristiques de qualité améliorées et répondant aux exigences indiquées ci-dessus comprennent deux variétés d'orge à teneur nutritionnelle supérieure, *Clearwater* et *Herald* (la teneur réduite en acide phytique accroît potentiellement la biodisponibilité du fer, du zinc et du calcium). En utilisant ces deux variétés dans l'alimentation des animaux par exemple, les agriculteurs réalisent des économies importantes car ils n'ont plus besoin d'acheter des compléments alimentaires coûteux pour contrecarrer les effets de l'acide phytique. L'emploi de ces mutants contribue aussi à un environnement plus propre car il permet de supprimer dans une large mesure la pollution des eaux souterraines et superficielles par les rejets de phosphates provenant des variétés d'orge pour animaux qui ont une teneur élevée en acide phytique.

81. Les mutations induites permettent aussi de diversifier les utilisations du soja en augmentant sa valeur nutritionnelle. La variété *Sakukei 4*, récemment diffusée au Japon, a la capacité de fixer l'azote et, devenant ainsi son propre fertilisant, n'a plus besoin de l'apport d'autres engrais. Cela représente une économie importante pour les agriculteurs. Les autres variétés mutantes de soja récemment diffusées comptent *Yumenori*, qui a une teneur élevée en « bon » précurseur protéinique, la glycine, et *Ichihime*, qui est exempte de lipoxydase, enzyme végétale naturelle à l'origine de maladies comme l'asthme et les troubles coronariens.

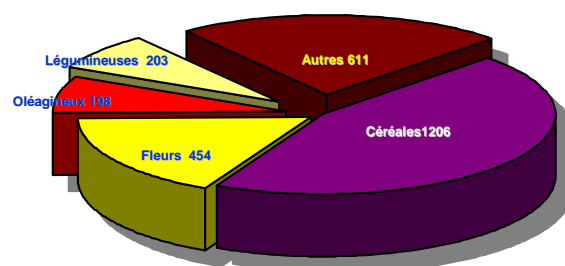


FIG. E-1. Variétés mutantes (2007)

Source : Base de données FAO/AIEA sur les variétés de mutants (<http://www-mvd.iaea.org>)

E.2. Production accrue de biocarburants

82. De nombreux pays se sont fixés des objectifs et un calendrier pour le remplacement de l'essence par du carburant provenant de ressources renouvelables. La production d'éthanol et de biodiesel devra être intensifiée pour atteindre ces objectifs, dont un grand nombre porte sur le court terme. Pour cela, il sera nécessaire, entre autres efforts, de passer de l'amidon à la cellulose pour la production d'éthanol. L'amélioration génétique des végétaux produisant de la biomasse permet d'améliorer à la fois le rendement de la biomasse et son efficacité de conversion. Ces objectifs peuvent être atteints efficacement grâce à un programme de sélection des plantes renforcé par l'induction de mutations, dans lequel la sélection repose sur l'identification de certains gènes et non de grandes régions chromosomiques contenant la caractéristique voulue. Récemment, la composition de la paroi cellulaire du maïs a été évaluée par criblage génétique à haut débit, ce qui a permis d'obtenir une collection de mutants pouvant maintenant être évalués pour l'efficacité de conversion de la biomasse. Les gènes mutants peuvent être incorporés dans un programme de sélection ou la séquence génique peut servir à identifier des variantes naturelles intéressantes.

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

83. Les applications technologiques nucléaires qui ont été élaborées pour répondre à des exigences spécifiques et uniques sont de plus en plus mises à profit pour accroître la quantité et la qualité du bétail et des produits animaux. Les tendances actuelles montrent que les techniques seront appelées à jouer un rôle important dans l'amélioration de la nutrition, de la reproduction et de la santé animales. Le radio-immunos dosage, par exemple, est utilisé actuellement pour mesurer la concentration de molécules spécifiques dans un échantillon biologique, marquer les microbes du rumen, évaluer les aliments pour animaux et analyser leur conversion et leur apport en nutriments. L'utilisation du dosage immuno-enzymatique (ELISA) est largement répandue pour l'évaluation, l'identification et la surveillance des anticorps ciblés pour détecter l'exposition des animaux aux agents pathogènes.

L'amplification génique (PCR) ou le séquençage PCR sont utilisés pour la détection et la caractérisation moléculaires d'agents pathogènes animaux par marquage direct de l'ADN pour sélectionner ou confirmer des caractéristiques génomiques souhaitables (viande plus maigre, davantage de lait, tolérance aux maladies, etc.) ou pour déterminer la filiation ou l'origine des animaux. Les pratiques vétérinaires font couramment appel à ces nouvelles applications des technologies nucléaires.

84. L'utilisation d'isotopes stables, de vaccins irradiés et de la technologie d'émission de positrons offre des perspectives pour l'avenir. Les isotopes stables sont toujours utilisés dans des applications liées à la production et à la santé animales. Le marquage au carbone 13 ou à l'azote 15 est utilisé pour surveiller à titre expérimental le métabolisme des glucides, des protéines et des nutriments. Une technique de dilution d'eau marquée par un isotope stable (oxyde de deutérium) est de plus en plus utilisée pour déterminer la masse corporelle maigre, la teneur en graisses, la composition corporelle et l'absorption totale d'eau et de lait chez le veau. La teneur des fluides corporels en oxyde de deutérium est mesurée par la spectrométrie de masse isotopique ou par la spectroscopie infrarouge. La spectrométrie de masse isotopique est aussi utilisée en pathogénicité et dans d'autres études physiologiques ainsi que pour déterminer de manière non invasive l'origine géographique des produits animaux. Les États Membres auront vraisemblablement de plus grandes possibilités économiques s'ils peuvent remonter avec précision à l'origine géographique des produits animaux. Par exemple, si une maladie donnée parvient à être éradiquée dans tout un pays donné sauf dans quelques coins précis de ce pays, l'exportation de produits animaux du reste du pays peut être justifiée si l'on peut établir que l'origine de ces produits se trouve dans les zones indemnes. En outre, cette approche pourrait servir à déterminer le rôle éventuel que jouent les animaux sauvages en tant que vecteurs de maladies animales, par exemple la contribution des oiseaux migrateurs à la diffusion de la grippe aviaire des zones d'endémie vers des zones non infestées.

85. L'inactivation des vaccins par irradiation produit des agents pathogènes morts qui imitent mieux le mode d'induction d'une réponse immune par des agents pathogènes vivants. Cela offre une nouvelle approche à l'immunisation, en particulier pour des maladies comme le paludisme, la fièvre aphteuse, la fièvre de la vallée du Rift, ou la neospora du bétail, du fait que les vaccins conçus par génie génétique ont donné des résultats peu concluants. Des travaux de recherche ont maintenant démarré sur les vaccins irradiés pour les parasites sanguins chez le bétail.

86. Ces dernières années, on a pu assister au transfert à des fins vétérinaires de nombreuses technologies médicales. La tomographie à émission de positons (PET) en est un exemple. Les vétérinaires utilisent la PET pour le diagnostic des tumeurs et d'autres irrégularités tissulaires chez les animaux de grande valeur comme les chevaux de race et les taureaux primés. L'utilisation de la PET peut faire baisser les coûts et améliorer le bien-être de l'animal en faisant moins appel à la chirurgie exploratoire.

E.4. Lutte contre les insectes ravageurs

E.4.1. La TIS contre les mouches tsé-tsé

87. les efforts visant à renforcer l'application de la technique de l'insecte stérile (TIS) contre la mouche tsé-tsé se poursuivent dans les zones prioritaires y compris dans le sud de la vallée du Rift, en Éthiopie. Les deux premiers modules du grand centre d'élevage et d'irradiation de tsé-tsé, situé à Kaliti près d'Addis-Abeba, pour le Projet d'éradication de la mouche tsé-tsé dans le sud de la vallée du Rift, ont été officiellement inaugurés le 3 février 2007. L'inauguration a fait suite à la conférence spéciale des donateurs pour la Campagne panafricaine d'éradication de la mouche tsé-tsé et de la trypanosomiase de l'Union africaine. Une fois achevée, l'installation comprendra sept modules et aura une capacité d'élevage d'au moins 7 millions de tsé-tsé femelles, qui pourront produire environ 700 000 mâles stériles par semaine, ce qui suffira pour couvrir des superficies allant de 4 500 à 7 500 km². À Kaliti, la colonie de tsé-tsé a augmenté régulièrement mais doit encore augmenter sensiblement jusqu'à ce qu'elle atteigne le nombre de tsé-tsé requis pour que la phase opérationnelle TIS puisse être lancée. En mai 2007, les premiers lâchers expérimentaux de tsé-tsé mâles stériles ont permis d'évaluer leur performance sur le terrain et de montrer qu'ils ont survécu et se sont dispersés comme requis pour l'exécution d'un futur programme d'éradication.

88. La procédure opératoire standard FAO/AIEA pour l'élevage en masse de la tsé-tsé vient d'être finalisée. Elle est une contribution majeure à l'application de la TIS dans la lutte contre la tsé-tsé car elle représente la première ébauche globale de l'ensemble des procédures intervenant dans la création d'une colonie, l'élevage, la collecte, le traitement et le stockage des échantillons sanguins ainsi que le contrôle de la qualité des mouches stériles.

E.4.2. La TIS contre les mouches des fruits

89. La mouche méditerranéenne des fruits *Ceratitis capitata* fait partie des insectes dont l'impact sur le commerce agricole international se fait le plus sentir. Pour surmonter les obstacles à l'exportation d'agrumes frais, l'Espagne applique la technique de l'insecte stérile dans la région de Valence, où cette activité commerciale représente 80 % des exportations d'agrumes du pays. La seconde plus grande installation au monde pour la production en masse de mouches méditerranéennes a été inaugurée en avril dernier à Valence en Espagne. Elle est le plus grand insectarium d'Europe et constitue, pour la communauté agricole autour de Valence, une avancée stratégique dans la lutte intégrée contre les ravageurs à l'échelle régionale. Avec une production hebdomadaire de 500 à 600 millions de mouches méditerranéennes mâles stériles par semaine, elle ouvre la voie en Espagne à une réduction des populations de mouches méditerranéennes par des moyens plus respectueux de l'environnement. Cet investissement permettra à l'industrie fruitière de Valence d'utiliser moins d'insecticides et d'accéder à de nouveaux marchés d'exportation.



Construction du centre d'élevage et d'irradiation de la tsé-tsé à Kaliti, Addis-Abeba (Éthiopie).



L'installation de production de masse de mouches méditerranéennes des fruits récemment inaugurée à Valence (Espagne).

E.4.3. La TIS contre les pyrales

90. Dans une vallée située dans l'ouest de la province du Cap en Afrique du Sud, où quelque 6 000 ha de terres produisent des agrumes pour l'exportation, un projet pilote a été lancé en collaboration avec la FAO et l'AIEA pour lutter contre le ver rose du cotonnier *Thaumatotibia leucotreta*. Cet insecte est le plus grand ravageur d'agrumes en Afrique du Sud. Il est difficile à combattre en raison de sa résistance aux insecticides et représente un obstacle majeur à l'exportation internationale d'agrumes. À la lumière des résultats positifs obtenus, l'industrie des agrumes a décidé de résoudre le problème en appliquant la TIS et elle a entrepris de lancer dans un avenir proche un programme TIS à échelle industrielle. L'utilisation d'isotopes stables est actuellement envisagée comme un outil de recherche supplémentaire qui permettrait de connaître les processus écologiques des insectes nuisibles migrants, comme le criquet pèlerin, afin de mieux cerner leur comportement. Une meilleure compréhension de la biologie et de l'écologie de ces insectes pourrait contribuer à terme à l'élaboration de stratégies de lutte plus efficaces.

E.5. Irradiation des aliments

91. Les pertes alimentaires causées par les insectes ravageurs, par la contamination et par la détérioration sont énormes. On estime que 42 % de la production des huit principales cultures agro-alimentaires et commerciales dans le monde sont perdus à cause des insectes ravageurs, et l'on compte en plus 10 % de pertes après récolte. Malgré l'utilisation de systèmes modernes de transformation et de distribution des aliments, les maladies transmises par les aliments constituent non seulement un facteur important de baisse de productivité économique mondiale mais en plus une menace d'une ampleur considérable pour la santé humaine. Assurer la sécurité sanitaire et la qualité des denrées agroalimentaires est par conséquent l'un des éléments de réponse essentiels des pays au double défi que représentent le développement de l'urbanisation et l'amélioration de la santé publique.

92. L'irradiation des aliments est un bon moyen de réduire les pertes dues à la détérioration des aliments, de lutter contre les microbes et les autres organismes à l'origine des maladies transmises par les aliments et de répondre aux exigences sanitaires et phytosanitaires¹². L'irradiation continue d'être utilisée à des fins sanitaires, mais aussi, de plus en plus, pour des applications phytosanitaires, notamment en rapport avec les mesures de quarantaine. Des normes et des codes de pratiques internationaux ont été élaborés pour favoriser l'application de cette technologie de traitement des

¹² De plus amples détails sont donnés dans les autres documents connexes au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008* disponibles sur GovAtom.

aliments en collaboration avec la Commission du Codex Alimentarius FAO/OMS et la Convention internationale pour la protection des végétaux.

F. Santé humaine

F.1. Approche individualisée du traitement du cancer grâce à la médecine nucléaire

93. Si l'on veut que le traitement du cancer donne de bons résultats, il importe de bien comprendre l'interaction complexe des différents facteurs qui conduisent au développement du cancer. Comprendre les propriétés spécifiques du cancer au niveau cellulaire, génétique et moléculaire chez les patients est indispensable pour prescrire un traitement spécifique qui aura beaucoup plus de chances de réussir. En médecine nucléaire, l'imagerie moléculaire par tomographie à émission de positons (PET) a permis de redéfinir et de moderniser l'approche médicale du traitement des malades. La classification d'un cancer uniquement par son siège anatomique est peut-être la raison qui fait que des patients souffrant apparemment du même cancer réagissent au traitement de manière radicalement différente. On dispose à présent d'outils qui permettent de comprendre sur le plan moléculaire les raisons pour lesquelles les réactions des patients sont si différentes. Il est possible à présent de choisir pour le patient le schéma thérapeutique qui lui convient. On s'est aperçu que des cancers détectés sur des parties du corps distantes peuvent se ressembler davantage que des tumeurs provenant d'un même organe, suivant le type de mutations cancéreuses qui y sont liées. Une connaissance détaillée des processus pathogènes que nous fournit la PET peut aussi être mise à profit pour la conception rationnelle de médicaments débouchant sur une thérapie ciblée.

94. Dans le domaine des traitements anticancéreux, les hématologues, les pédiatres et les oncologues commencent à chercher des approches thérapeutiques multiples, associant la chimiothérapie, les agents immunomodulateurs ou des agents modulateurs de la transduction du signal cellulaire combinés à des molécules ciblées (peptides, anticorps ou oligonucléotides), pour améliorer les chances de guérison des cancers. Les approches thérapeutiques radiociblées renforcées par les isotopes présentent de nombreux avantages pour traiter à la fois des cancers solides localisés ou disséminés et des hémopathies malignes.

F.2. Radio-oncologie

95. Les avancées technologiques dans la planification et l'exécution du traitement ont permis l'adoption de stratégies d'irradiation des tumeurs avec la radiothérapie conformationnelle à trois dimensions (RTC-3D) ou même avec des techniques hautement conformationnelles comme la radiothérapie stéréotactique (STR) ou la radiothérapie à intensité modulée (IMRT). La radiothérapie conformationnelle permet de délivrer la dose souhaitée dans un volume défini avec précision tout en épargnant le plus possible les tissus sains. L'adoption de techniques de pointe comme la SRT et l'IMRT, mais aussi de la radiothérapie assistée par l'image (IGRT) et de la radiothérapie asservie à la respiration (RGRT) a permis de mieux comprendre l'importance des marges et du déplacement des organes. En outre, l'introduction de données d'imagerie fonctionnelle dans le processus de planification du traitement constitue un progrès majeur dans le domaine de la radiothérapie ces dernières années. La tomographie PET, par exemple, associée à la tomographie informatisée classique donne des images avec marqueurs biologiques/métaboliques qui permettront de mieux adapter les

champs et les doses radiothérapeutiques aux différents patients et d'améliorer ainsi les résultats du traitement.

96. Ces techniques suscitent l'enthousiasme car on espère que les progrès réalisés dans la localisation de la tumeur, la distribution des doses et l'individualisation des prescriptions de dose permettront d'améliorer les taux actuels de réussite du traitement par une réduction de la toxicité ou un meilleur contrôle local des tumeurs au moyen de stratégies d'escalade de dose. Ces approches font actuellement l'objet d'études actives à travers le monde.

97. Les considérations pédagogiques sont capitales en vue d'une large application des nouvelles technologies. L'enseignement virtuel basé sur Internet devrait permettre de réduire les coûts d'ensemble et d'accélérer l'adoption de ces technologies dans la pratique clinique quotidienne. Parallèlement, on constate qu'un effort est fait à l'échelle mondiale pour relever le niveau de formation des physiciens médicaux, qui appuient l'application de ces nouvelles techniques thérapeutiques. Des organisations ont été créées dans de nombreux pays pour définir les compétences des physiciens médicaux et pour accréditer leurs programmes de formation d'internes d'hôpitaux.

98. Outre les succès de la radiothérapie externe, la mise au point récente de sources à haut débit de dose (HDD) au cobalt 60 pourrait notamment permettre d'administrer un traitement moderne par curiethérapie HDD sans avoir à remplacer les sources aussi fréquemment. Cela devrait permettre une radiothérapie plus efficace par rapport au coût et améliorer l'accès des patients au traitement. En ce qui concerne les traitements multiples, la réalisation de plusieurs essais cliniques de grande qualité a confirmé de nouveau que le fait de compléter la radiothérapie par des agents pharmaceutiques pouvait améliorer la survie des patients dans le cas de nombreux cancers courants.

F.3. Nutrition

99. Le rôle central de la nutrition dans le développement a été de nouveau souligné récemment par la Banque mondiale dans sa publication intitulée *Repositioning Nutrition as Central to Development; A Strategy for Large-Scale Action*¹³. Il est capital d'investir dans ce domaine, comme le montre la prise de conscience croissante par la communauté internationale du fait que l'ampleur de la malnutrition empêchera de nombreux pays d'atteindre les objectifs du millénaire pour le développement alors que la preuve est faite de plus en plus que des solutions existent. L'excellent investissement économique des interventions nutritionnelles en vue de combattre la malnutrition a été souligné à l'occasion du consensus de Copenhague¹⁴. D'après ce consensus, la rentabilisation des investissements dans des programmes de lutte contre les maladies infectieuses comme le VIH/SIDA et le paludisme et contre la malnutrition ressort de six des 12 interventions clés proposées.

100. Le rôle des techniques nucléaires dans le développement et l'évaluation des interventions nutritionnelles est confirmé et de nombreux États Membres bénéficient actuellement d'un meilleur accès à la capacité d'application à la nutrition des techniques faisant appel aux isotopes stables¹⁵. Les tendances récentes indiquent une utilisation accrue des techniques des isotopes stables dans des domaines prioritaires comme la nutrition et le VIH/SIDA, l'alimentation des nourrissons et des enfants en bas âge et les carences en micronutriments. Ces techniques utilisées par exemple pour surveiller les modifications de la composition corporelle (masse grasseuse contre masse musculaire) pendant les interventions nutritionnelles donnent des informations importantes qui permettent d'optimiser les

¹³ <http://siteresources.worldbank.org/NUTRITION/Resources/281846-1131636806329/NutritionStrategy.pdf>.

¹⁴ <http://www.copenhagenconsensus.com/>.

¹⁵ De plus amples détails sont donnés dans les autres documents connexes au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008* disponibles sur GovAtom.

soins, le traitement et le soutien des personnes vivant avec le VIH/SIDA et s'avèrent être particulièrement appropriées pour améliorer l'accès au traitement antirétroviral dans un environnement économiquement faible.

101. Les techniques faisant appel aux isotopes stables sont également utilisées dans plusieurs pays pour évaluer l'absorption de lait maternel chez les enfants nourris au sein et pour déterminer le moment d'introduire d'autres aliments et liquides. Elles permettent de surveiller des interventions en vue de promouvoir un allaitement exclusif pendant six mois, suivi de l'introduction d'aliments complémentaires appropriés, parallèlement à la poursuite de l'allaitement, comme recommandé par l'Organisation mondiale de la santé.

102. Elles sont aussi utilisées actuellement pour élaborer et évaluer des stratégies de lutte contre les carences en micronutriments. Elles servent, par exemple, à évaluer la biodisponibilité en fer de différents composés pour pouvoir élaborer une stratégie d'enrichissement des aliments et pour suivre les variations du bilan vitamine A chez les personnes qui suivent un régime de supplémentation alimentaire.

G. Environnement

G.1. Amélioration de la détection des radionucléides pour l'évaluation de l'environnement terrestre

103. La spectroscopie gamma a de nombreuses applications sur le terrain, notamment pour l'estimation de la radioactivité dans les sols de surface, l'évaluation des champs de rayonnement gamma (et donc du débit de dose) et la localisation de sources orphelines. En cas d'accident nucléaire entraînant une large diffusion de radionucléides artificiels dans l'environnement, les levés aériens sont importants pour déterminer rapidement et à grande échelle la contamination du sol grâce à certains nucléides. Des détecteurs à cristaux d'iodure de sodium ou au germanium de haute pureté sont couramment employés. Les premiers ont l'avantage de la robustesse et d'une bonne efficacité de détection, mais l'inconvénient d'une faible résolution en énergie. On s'en sert fréquemment pour étudier des zones relativement étendues, par exemple dans des systèmes aéroportés ou mobiles, et pour évaluer des activités menées dans des conditions difficiles sur des radionucléides naturels, par exemple sur des sites d'extraction d'uranium. L'utilisation du Système mondial de localisation (GPS) pour fournir des données précises sur certains emplacements ainsi que le perfectionnement des techniques d'analyse de données se sont traduits ces dernières années par une amélioration sensible de l'analyse des données issues de ces études.

104. Les détecteurs au germanium sont couramment employés lorsqu'il est important d'identifier certains radionucléides. Grâce aux améliorations apportées ces dernières années à la production de cristaux au germanium de haute pureté, il est maintenant possible de produire des cristaux plus gros, et la détection n'en est que plus efficace. Cependant, le fait qu'il faille refroidir les détecteurs avec de l'azote liquide limite leur utilisation sur le terrain.

G.2. Qualité des résultats des mesures

105. On procède à des mesures physiques et chimiques (notamment à l'aide de techniques d'analyse nucléaire) pour évaluer la qualité de marchandises commercialisées et leur adéquation à leur usage final. La qualité des résultats des mesures doit être assurée et démontrée afin qu'ils puissent être intégrés dans le processus de prise de décisions. Parmi les facteurs contribuant à l'assurance de la

qualité figure notamment l'existence d'une infrastructure métrologique appropriée (avec des instituts nationaux de métrologie et des étalons) et d'outils de contrôle de la qualité comme les matières de référence¹⁶.

G.3. Application des technologies nucléaires aux fins de la viabilité de l'environnement marin

G.3.1. Développement des applications des analyses radiologiques aux fins de la sécurité sanitaire des produits de la mer

106. La ciguatera est une intoxication due à l'ingestion de poissons de récifs tropicaux ayant accumulé des toxines produits par des algues. Ces toxines, qui peuvent être mesurées par des analyses radiologiques, peuvent provoquer de graves problèmes gastrointestinaux, neurologiques et cardiovasculaires. Dans le passé, la ciguatera n'affectait que les populations des îles tropicales, mais avec l'expansion de la commercialisation des produits de la mer et de leur consommation dans le monde entier et le développement du tourisme international, les populations à risques sont désormais réparties dans le monde entier. Il y a chaque année entre 10 000 et 50 000 cas de ciguatera sous les tropiques. En Polynésie française, on recourt maintenant à une technique d'analyse radiologique pour quantifier les ciguatoxines dans les aliments d'origine marine, y compris les praires et les poissons géants et pour étudier leur transfert dans les chaînes alimentaires marines tropicales. Pour faire face à ce problème croissant, l'Agence a entrepris un projet de recherche coordonnée sur la quantification des ciguatoxines dans les poissons, à l'aide des techniques d'analyse radiologique, que viendra également compléter une assistance fournie par des États Membres dans le cadre de projets de coopération technique.

G.3.2. Changement climatique et acidification des océans

107. Les niveaux de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère augmentent en raison de la combustion de combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) et de la déforestation. Ils seraient encore plus élevés s'il n'y avait pas les océans, qui en absorbent près d'un tiers. Par conséquent, les niveaux de CO₂ dans les océans augmentent également, et sous l'effet de l'acidité de cet élément, le pH des océans diminue. Cette 'acidification des océans' aura vraisemblablement des répercussions négatives sur de nombreux organismes marins, en particulier les coraux et les mollusques, tels que les huîtres et les moules, et pourra affecter des chaînes entières de ressources alimentaires marines, modifiant ainsi la biodiversité naturelle et l'aquaculture. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a récemment souligné que l'on manquait cruellement de connaissances à ce sujet¹⁷.

108. L'acidification des océans peut aussi avoir un impact sur la solubilité des polluants, tels que les métaux lourds, affectant ainsi la sécurité sanitaire des produits de la mer. On recourt à des isotopes marins comme ceux du bore pour déterminer les variations passées du pH des océans et en quoi elles diffèrent des perturbations anthropiques actuelles. Un autre isotope, le calcium 45, s'avère déterminant pour mesurer les taux de calcification des récifs de coraux qui servent d'habitat et de zones de frai aux poissons, de défense contre les tempêtes et l'érosion et sur lesquels repose une industrie du tourisme pesant plusieurs milliards de dollars. L'Agence aide les États Membres à mener des études isotopiques et à utiliser des modèles numériques pour mieux comprendre et prévoir comment l'acidification des océans affectera les ressources marines. Par exemple, des études radioécologiques appliquées faisant

¹⁶ De plus amples détails sont donnés dans les autres documents connexes au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008* disponibles sur GovAtom.

¹⁷ http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_SPM.pdf.

appel au calcium 45 et à d'autres isotopes sont menées sur l'augmentation escomptée du CO₂ et la diminution du pH afin de décrypter les effets de l'acidification des océans sur des organismes importants du point de vue commercial tels que les larves de poissons et les mollusques.



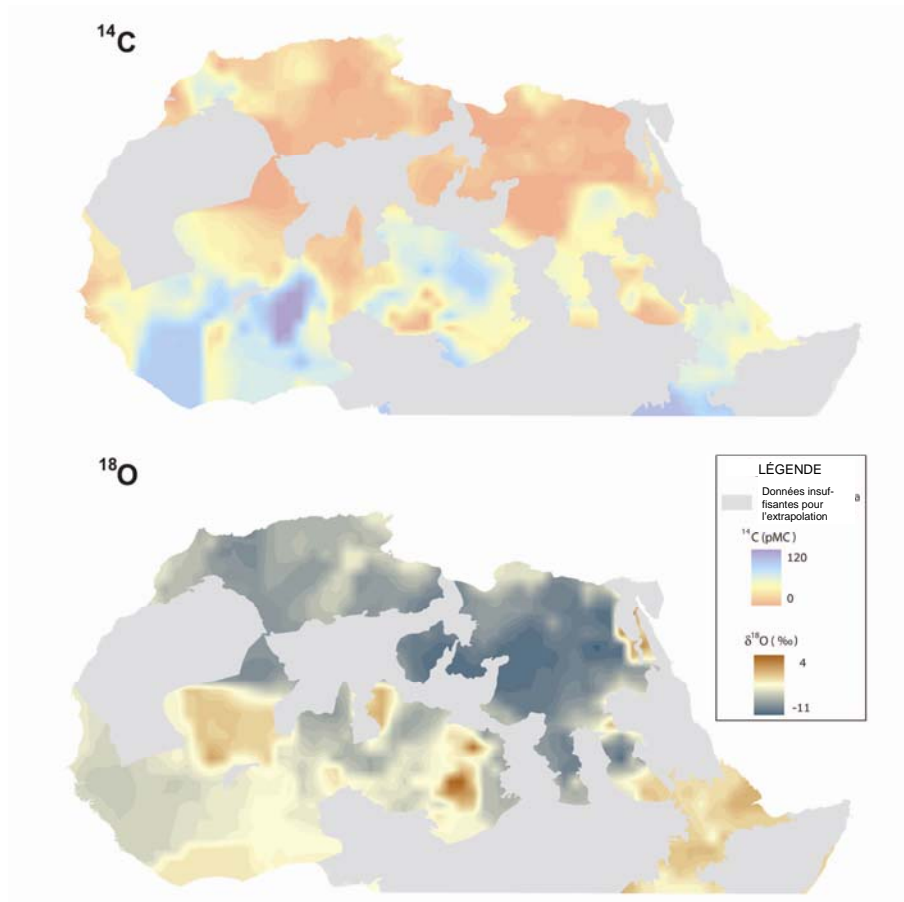
Nouvelle installation du Laboratoire de radioécologie de l'Agence, à Monaco, servant à déterminer les effets de l'acidification des océans sur les larves de poissons commercialisés.

H. Ressources en eau

109. Les ressources en eaux souterraines satisfont plus de la moitié de la demande en eau douce de la planète. Ce pourcentage peut atteindre 90 % dans des pays déficitaires en eau au climat aride ou semi aride et dans des pays en développement pratiquant l'agriculture irriguée à grande échelle. L'impact imminent du changement climatique sur la disponibilité de l'eau douce rend ces ressources encore plus précieuses et oblige à les exploiter judicieusement. Des études de plusieurs années sont nécessaires pour évaluer et gérer les aquifères qui alimentent les eaux souterraines. Il y a pénurie d'informations à ce sujet dans la plupart des régions du monde. Les données isotopiques permettent de mieux connaître les systèmes naturels d'eaux souterraines et forment un ensemble d'informations sur leur fonctionnement intégré dans l'espace et le temps, de les évaluer et de les gérer sans grands investissements en temps et en ressources.

110. Conscients de l'importance de cette application des données isotopiques, plusieurs pays prennent des mesures pour rendre ces données plus accessibles au niveau national. L'Agence est en train d'élaborer une série d'atlas qui forment une synthèse des données isotopiques recueillies dans le cadre de l'assistance technique concernant les eaux souterraines octroyée aux États Membres au cours des 50 dernières années. La plupart de ces données isotopiques sur les eaux souterraines n'étaient pas facilement disponibles jusqu'à présent.

111. Le premier atlas, qui se concentre sur l'Afrique, contient des données tirées de plus de 10 000 échantillons d'isotopes. Comme le montre la figure ci-dessous, les données isotopiques montrent clairement l'étendue de nappes d'eaux souterraines anciennes, vieilles de plus de 10 000 ans, qui ne sont plus renouvelables, dans la région de l'Afrique du Nord. Les valeurs inférieures (plus négatives) de $\delta^{18}\text{O}$ indiquent que la réalimentation de ces nappes dans de nombreuses régions d'Afrique du Nord s'est effectuée essentiellement dans des conditions climatiques plus froides que celles qui prévalent actuellement. Ces eaux souterraines sont présentes dans de grands systèmes aquifères transfrontières comme l'aquifère nubien réparti entre l'Égypte, la Jamahiriya arabe libyenne, le Soudan et le Tchad, dont la gestion commune est vitale pour le développement humain dans cette région du monde.



*FIG. H-1. Teneur en carbone 14 et en oxygène 18 dans les eaux souterraines d'Afrique du Nord.
Source : Atlas d'hydrologie isotopique récemment publié par l'AIEA. Les faibles valeurs de carbone 14 montrent l'étendue des nappes 'très anciennes' d'eaux souterraines qui étaient réalimentées dans les conditions climatiques prévalant il y a des milliers d'années.*

I. Technologie des rayonnements

I.1. Production de radio-isotopes

112. L'approvisionnement fiable en radio-isotopes couramment utilisés pour des applications médicales et industrielles durables, ainsi que la mise au point d'autres produits pour répondre à de nouveaux besoins, continue de retenir l'attention de la communauté internationale. L'industrie mais aussi plusieurs centres nationaux d'États Membres sont très actifs dans ce domaine. La part du technétium 99m et du fluor 18 dans l'imagerie diagnostique continue de représenter environ 80 % et

10 %, respectivement, des 25 à 30 millions d'actes exécutés dans ce domaine en 2006. En ce qui concerne les produits utilisés pour la radiothérapie, la popularité croissante du lutetium 177, qui peut être produit plus facilement et à plus grande échelle, et la mise au point au point d'un système générateur d'yttrium 90 basé sur la séparation électrochimique du strontium 90 sont deux événements marquants en 2007. Également important est l'intérêt qui commence à se manifester pour la création, dans certains États Membres, de nouvelles installations de production de molybdène 99 à l'aide de cibles à l'UFE. Une réunion importante de toutes les parties prenantes actuellement impliquées dans la production de ce radio-isotope a eu lieu à Sydney (Australie), en décembre 2007. Elle était organisée conjointement par l'Administration nationale de la sécurité nucléaire du Département de l'énergie des États-Unis et l'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (ANSTO). Son rapport recense tous les aspects à prendre en compte ainsi que l'appui nécessaire pour faciliter l'application de la technologie des cibles à l'UFE sans affecter la disponibilité de molybdène 99 de manière à être moins tributaire de l'UHE pour la production à grande échelle de ce radio-isotope. En Australie, une production régulière à grande échelle de molybdène 99 à l'aide de cibles à l'UFE devrait démarrer en 2008.

I.2. Polymères naturels

113. Les polymères naturels existent sous de multiples formes, et un grand nombre d'entre eux peuvent être transformés sous l'effet du radiotraitement en produits utiles (voir la figure I-1). On peut citer à titre d'exemple l'amidon (de la pomme de terre et du maïs), la cellulose (des plantes et des arbres), la chitine (des crevettes, crabes et homards), les alginates (des algues) et les polypeptides tels que la soie, la kératine et les cheveux. Ces polymères naturels, qui sont non toxiques et biodégradables, peuvent être obtenus pour un faible coût. Le radiotraitement est un procédé propre qui permet de les transformer, sans additifs, en nouveaux matériaux à valeur ajoutée. Les produits issus de la chitine par exemple se retrouvent dans les pansements d'hydrogels, les matelas anti-escarres, les masques cosmétiques nettoyants, les systèmes d'administration de médicaments et peuvent servir d'adsorbants de polluants comme les ions métalliques, les teintures, les protéines les particules solides et autres. Les produits à faible poids moléculaire ont des propriétés antibiotiques, antioxydantes et sont à même de stimuler la croissance des plantes.

114. Le radiotraitement des polymères naturels est un domaine prometteur dans la mesure où les caractéristiques uniques de ces matières peuvent être exploitées pour des applications pratiques dans les domaines de la médecine, de la cosmétologie, de l'agriculture, de la biotechnologie et de la protection de l'environnement.

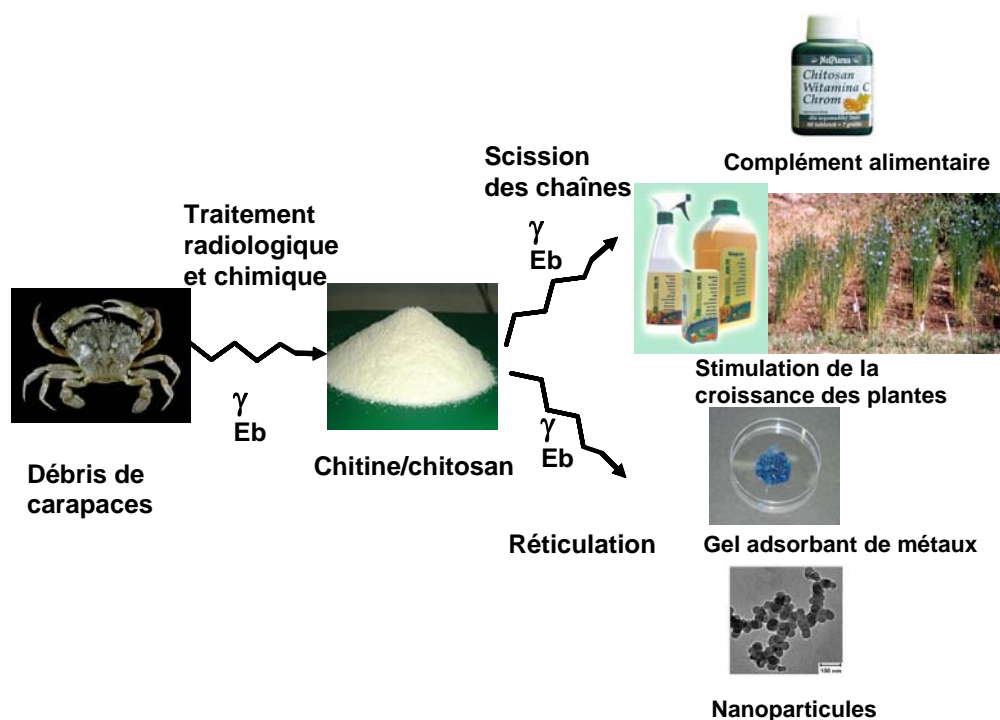


FIG. I-1. Radiotraitement de polymères naturels.

I.3. Biocontaminants dangereux

115. L'utilisation de rayonnements ionisants pour l'inactivation des microbes est une technologie éprouvée pour l'hygénisation des denrées alimentaires, la radiostérilisation des produits médicaux et des tissus biologiques et, à plus grande échelle, l'épuration des eaux usées. Plus récemment, elle a aussi fait ses preuves en réduisant certains risques de contamination biologique, entre autres par l'anthrax acheminé par le courrier. Ces résultats ont montré l'utilité des rayonnements ionisants pour intervenir contre des menaces comme la dispersion délibérée de contaminants biologiques¹⁸. Les grands avantages de la technologie des rayonnements par rapport à d'autres méthodes sont qu'elle permet de traiter des matières aussi bien sur une petite échelle que sur une très grande échelle et que le seul paramètre à contrôler est l'administration de la dose requise à l'objet/la zone cible. Les résultats communiqués jusqu'à présent indiquent que certains autres aspects devraient être traités à l'avenir, comme par exemple la manipulation et le traitement des produits contaminés et la formation en vue d'opérations sur le terrain.

I.4. Traçage automatisé de particules radioactives

116. La technique du traçage automatisé de particules radioactives (CARPT) est maintenant une méthode reconnue d'investigation de flux multiphasés complexes (par exemple gaz et liquides) dans l'industrie chimique et les industries du pétrole et du génie biologique. Elle utilise comme traceur une petite particule émettant des rayons gamma de la densité et de la taille appropriées capable de se mouvoir avec la phase soumise à l'étude ainsi que plusieurs détecteurs de rayons gamma placés stratégiquement autour du réacteur chimique pour tracer de manière fiable la position de la particule et donc le mouvement de la phase.

¹⁸ E.K. Noji, "Bioterrorism: A 'New' Global Environment Health Threat," *Global Change & Human Health*, Vol. 2, No. 1, 2001, pp 46–53.

117. Cette méthode de traçage non invasive permet de déterminer les caractéristiques dynamiques de la phase concernée. Les données obtenues sur la structure du flux, sa rapidité, sa turbulence etc. contribuent à optimiser les procédés dans les installations pilotes d'une part, et fournit des arguments pour la prise de décisions sur la conception finale des opérations d'installations réelles d'autre part¹⁹. Les principales bénéficiaires de la CARPT seront les industries pétrochimiques, qui utilisent des lits fluidisés et des colonnes à bulles, ainsi que des produits fabriqués à partir de procédés biologiques.

118. Une autre option perfectionnée pour le traçage des particules consiste à utiliser un traceur émetteur de positons. La technique de traçage de particules par émission de positons (PEPT) offre un avantage supplémentaire dû à la détection de coïncidences de rayons émis par annihilation de positons, ce qui permet d'obtenir une plus grande précision dans le traçage de la particule servant de traceur, même dans des systèmes de flux à grande vitesse couramment employés dans certains systèmes industriels. Avec ces deux techniques (CARPT et PEPT), l'objectif général est de mettre en place des procédés industriels plus efficaces et efficaces²⁰.

¹⁹ S. Bhusarapu1, M.H. Al-Dahhan and M.P. Dudukovic, "Solids Flow Mapping in a Gas–solid Riser: Mean Holdup and Velocity Fields," *Powder Technology*, Vol. 163 (1-2), 2006, pp 98–123.

²⁰ S. Bakalis, P.W. Cox, A.B. Russell, D.J. Parker and P.J. Fryer, "Development and Use of Positron Emitting Particle Tracking (PEPT) for Velocity Measurements in Viscous Fluids in Pilot Scale Equipment", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61(6), 2006, pp 1864–1877.