

Conférence générale

GC(49)/INF/3

Date : 25 juillet 2005

Distribution générale

Français

Original : Anglais

Quarante-neuvième session ordinaire

Point 18 de l'ordre du jour provisoire

(GC(49)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – mise à jour 2005

Rapport du Directeur général

Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie un *rapport exhaustif sur la technologie nucléaire* tous les deux ans et une mise à jour plus succincte les années intermédiaires. Le présent rapport est donc une mise à jour qui met en valeur les événements notables de l'année 2004 principalement.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – mise à jour 2005* passe en revue les domaines suivants : données atomiques et nucléaires, applications énergétiques, techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, ressources en eau, environnement marin et terrestre, utilisation des réacteurs de recherche et des accélérateurs et suivi des procédés industriels.
- Des informations sur les activités de l'AIEA dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires figurent également dans le *Rapport annuel pour 2004 (GC(49)/5)*, en particulier dans la partie Technologie, et dans le *Rapport sur la coopération technique pour 2004 (GC(49)/INF/2)*.
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations faites par le Conseil et d'autres observations communiquées par les États Membres.

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – mise à jour 2005

Rapport du Directeur général

Table des matières

Synthèse.....	1
A. Données atomiques et nucléaires.....	3
B. Applications énergétiques	4
B.1. L'électronucléaire aujourd'hui.....	4
B.2. L'avenir.....	8
B.2.1. Projections actualisées pour le moyen terme	8
B.2.2. Développement durable et changements climatiques	9
B.2.3. Questions d'actualité.....	10
B.2.4. Ressources	14
B.2.5. Fission et fusion avancées.....	15
C. Techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture	17
C.1. Gestion durable des terres et efficacité de l'utilisation de l'eau	17
C.2. Amélioration des cultures	17
C.3. Protection des cultures	18
C.4. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail.....	19
C.5. Sécurité sanitaire des aliments et des produits végétaux et animaux.....	20
D. Santé humaine	20
D.1. Nutrition.....	20
D.2. Médecine nucléaire.....	20
D.3. Radiothérapie.....	21
D.4. Dosimétrie et radiophysique médicale.....	22
E. Ressources en eau.....	23
F. Environnements marin et terrestre.....	24
F.1. Environnement marin	24
F.1.1. Radiotraçage de contaminants dans les poissons et fruits de mer	24
F.1.2. Traçage isotopique du phénomène d'oscillation australe El Niño (ENSO).....	24
F.1.3. Utilisation de radionucléides naturels pour retracer les puits à carbone dans l'océan	25
F.2. Environnement terrestre	25
F.2.1. Études radio-écologiques	25
G. Utilisation des réacteurs de recherche	26
H. Utilisation d'accélérateurs.....	27
I. Suivi des processus industriels	28
I.1. Radiotraitement – Nanotechnologie.....	28

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – mise à jour 2005

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. L'année 2004 a marqué le 50^e anniversaire du début de la production d'énergie d'origine nucléaire par des centrales civiles. Si les perspectives actuelles de l'électronucléaire sont toujours en demi-teinte, il est clair que ce secteur suscite des attentes plus importantes. L'Agence internationale de l'énergie de l'OCDE et l'AIEA ont révisé à la hausse leurs projections sur la situation du nucléaire à moyen terme. L'AIEA prévoit à présent que la puissance nucléaire installée dans le monde sera de 423 à 592 GWe en 2030, contre 366 GWe à la fin de 2004. Cette évolution est due au bilan de performance de l'électronucléaire, à l'augmentation des besoins énergétiques au niveau mondial, associée à celle des prix du pétrole et du gaz naturel, à de nouvelles contraintes en matière d'environnement, telles que l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto, à des inquiétudes concernant la sécurité des approvisionnements énergétiques dans certains pays et à des plans de développement ambitieux dans plusieurs pays importants.
2. À la fin de l'année 2004, l'Asie comptait 18 des 26 réacteurs en construction, ainsi que 20 des 30 derniers réacteurs couplés au réseau. Les travaux d'excavation ont commencé pour la centrale nucléaire d'Olkiluoto-3 en Finlande, qui sera la première à être construite en Europe occidentale depuis 1991, et Électricité de France a choisi un site à Flamanville pour un REP européen de démonstration, dont la construction devrait débuter en 2007. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé 11 nouvelles demandes de prolongation de licences de 20 ans chacune (pour une durée totale de vie autorisée de 60 ans pour chaque réacteur). Dans le cadre du programme électronucléaire national pour 2010, le Département de l'énergie partage les coûts avec deux groupements d'investisseurs qui préparent des demandes visant à tester une nouvelle procédure d'autorisation simplifiée.
3. La part de l'électronucléaire dans la production électrique mondiale est stable à 16 %, ce qui indique que la production d'électricité d'origine nucléaire se développe, depuis 18 ans, au même rythme que la consommation totale d'électricité dans le monde. Le nombre de nouvelles centrales couplées au réseau (cinq) correspond exactement au nombre de centrales retirées du service, mais les premières représentent un total de 4 785 MWe et les secondes de seulement 1 385 MWe. En outre, une centrale arrêtée a de nouveau été couplée au réseau au Canada. Toutefois, seules deux centrales ont été mises en chantier en 2004, et, conformément à la politique d'abandon progressif du nucléaire de ces pays, le réacteur d'Obrigheim en Allemagne et celui de Barsebäck-2 en Suède ont été mis à l'arrêt en mai 2005.
4. Le prix de l'uranium, qui était bas et stable depuis une quinzaine d'années, a continué de monter, passant de 25 dollars le kilo en 2002 à 75 dollars le kilo le 29 juin 2005. La production d'uranium est nettement inférieure à la consommation depuis environ 15 ans et la hausse des prix actuelle montre que l'on considère de plus en plus que les sources secondaires, qui ont comblé la différence, commencent à s'épuiser.

5. À la fin de 2004, six centrales nucléaires avaient été entièrement déclassées et leurs sites libérés sans restrictions. Dix-sept étaient partiellement démantelées et mises en attente sûre, 33 étaient en cours de démantèlement avant que leur site puisse être libéré et 30 faisaient l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mises en attente sûre de longue durée. Une nouvelle catégorie de déchets radioactifs, les déchets de très faible activité (DTFA), a été adoptée dans certains pays. Les DTFA, issus du déclassement, nécessitent moins de traitements spéciaux que les déchets de faible activité traditionnels et leur stockage définitif reviendra bien moins cher. Un dépôt destiné à ce type de déchets, mis en service à Morvilliers (France) en 2003, est devenu pleinement opérationnel en 2004.

6. En ce qui concerne les déchets de haute activité, ce sont la Finlande, la Suède et les États-Unis qui ont le plus progressé vers la construction d'installations de stockage définitif. En Finlande, la construction d'un laboratoire souterrain de caractérisation du site de stockage définitif d'Olkiluoto a débuté en 2004. Les recherches géologiques approfondies entreprises en Suède en 2002 sur deux sites potentiels avancent rapidement, parallèlement à des consultations du public. Aux États-Unis, les travaux préparatoires d'une demande de licence sont en bonne voie.

7. Les recherches au niveau national sur des modèles de réacteurs avancés se poursuivent dans toutes les catégories – réacteurs refroidis par eau, refroidis par gaz et refroidis par métal liquide et systèmes hybrides. Cinq membres du Forum international Génération IV (GIF) lancé par les États-Unis ont signé, en février 2005, un accord-cadre sur la collaboration internationale en matière de recherche-développement sur les systèmes nucléaires de la quatrième génération. Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) compte désormais 23 membres. Il a achevé une série d'études de cas visant à tester sa méthode d'évaluation, et le rapport final sur la méthodologie INPRO actualisée a été publié en décembre.

8. Le projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) commence à se concrétiser avec l'annonce faite, le 28 juin 2005, par les pays parties – Chine, États-Unis, Fédération de Russie, Japon, République de Corée et Union européenne – que le site choisi est celui de Cadarache (France). Le but est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion en construisant un réacteur de fusion fonctionnel. La construction de l'ITER devrait prendre environ 8 ans et il sera ensuite exploité pendant une vingtaine d'années. Il s'agira du premier dispositif au monde capable de générer au moins cinq fois plus d'énergie qu'il n'en consomme grâce à une réaction de fusion nucléaire contrôlée. L'ITER ouvrira de nouveaux horizons pour les applications énergétiques de la science et de la technologie nucléaires, avec des retombées escomptées dans de nombreux autres domaines.

9. Les progrès de la technologie nucléaire sont rapides et couvrent de nombreux domaines d'application. Le présent rapport ne peut pas tous les traiter, mais il porte sur certains domaines et tendances clés qui sont considérés comme présentant un intérêt majeur pour les États Membres de l'AIEA et qui sont pertinents et jouent un rôle dans la réalisation des objectifs de développement du millénaire, ainsi que dans les cinq domaines WEHAB (eau, énergie, santé, agriculture et biodiversité) recensés au Sommet mondial pour le développement durable tenu à Johannesburg en 2002.

10. Sachant que l'agriculture représente 70 % de l'utilisation mondiale d'eau, l'application de plusieurs isotopes stables pour évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans différents systèmes de culture et d'irrigation, notamment pour des études sur l'impact de la programmation de l'irrigation sur l'efficacité d'utilisation des engrais, est donc utile à la fois pour l'approvisionnement en aliments et pour l'approvisionnement en eau. L'induction de mutations pour obtenir des variétés végétales améliorées ne nécessitant pas beaucoup d'eau et capables de pousser dans des environnements difficiles contribue à accroître l'efficacité d'utilisation de ressources en eau limitées. Dans le cadre de la gestion des ressources en eau, une attention accrue est également accordée à la gestion des aquifères

transfrontières, qui fait appel aux outils isotopiques pour déterminer les mouvements et l'âge de l'eau, ainsi que les sources de pollution.

11. Dans le secteur de la santé humaine, les cliniciens s'appuient sur les radionucléides à courte période pour examiner les processus métaboliques. La tomographie à émission de positons (PET), une des techniques de médecine nucléaire qui se développent le plus rapidement, fait appel à des radio-isotopes de période ultracourte attachés à des marqueurs biologiques qui, lorsqu'ils sont fusionnés avec des images radiologiques informatisées, constituent un outil encore plus efficace pour le suivi sanitaire et le diagnostic. Les défis évoluent en radiothérapie, avec l'introduction de techniques de radiothérapie guidée par imagerie capables de déterminer et de maintenir la précision du faisceau après changement de position de la tumeur et du patient.

12. Dans le domaine de l'environnement marin, des recherches sur le phénomène d'oscillation australe El Niño basées sur des études isotopiques devraient permettre de mieux comprendre les changements climatiques. On reconnaît de plus en plus la capacité des océans d'absorber le dioxyde de carbone, et donc leur influence sur le climat. Des études faisant appel au thorium 234, dérivé naturel de l'uranium 238 de l'eau de mer, aident les océanographes à mieux comprendre le rôle de l'océan à cet égard. L'instrumentation nucléaire contribue également à la compréhension de la radioécologie de l'environnement terrestre, avec par exemple la télédétection par levés gamma aériens.

13. Les réacteurs de recherche et les accélérateurs continuent à offrir de nouvelles applications. Les radio-isotopes produits dans des réacteurs de recherche sont largement utilisés en médecine et dans l'industrie, et les faisceaux de neutrons sont utilisés comme sondes puissantes pour diverses applications faisant appel à la diffusion de neutrons et aux techniques de radiographie. Les techniques nucléaires basées sur les accélérateurs semblent prometteuses pour la mise au point de nouveaux matériaux, tandis que la spectrométrie de masse par accélérateur présente un intérêt pour les techniques de datation au carbone 14, la recherche sur les médicaments et le contrôle radiologique de l'environnement.

A. Données atomiques et nucléaires

14. Les données atomiques et nucléaires restent essentielles pour planifier et concevoir des réacteurs, exploiter des centrales et améliorer leur sûreté, ainsi que pour faciliter les activités de déclassement des installations nucléaires. Parmi les faits technologiques marquants, on peut citer les services fournis aux clients des bases de données nucléaires de l'AIEA et la constitution de meilleures bases de données sur la physique atomique et nucléaire. Les liens établis avec d'autres grands centres de données, tels que le Centre national de données nucléaires des États-Unis (NNDC) et l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), sont toujours aussi fructueux. Les préparatifs faits pour répondre, sur le plan international, à la nécessité d'offrir un accès facile, fiable et indépendant des plates-formes à des données nucléaires de qualité se renforcent, encouragés notamment par le développement d'Internet et des outils de la technologie de l'information.

15. On a jugé que le déplacement des bases de données nucléaires et des services de l'AIEA vers d'autres plates-formes de communication procurerait des avantages substantiels. Cette initiative, menée conjointement avec le NNDC, a permis d'arriver au terme de la première grande étape vers le milieu de 2004. Après avoir été testés, des logiciels et du matériel modernes ont été installés de façon à permettre l'introduction de nouveautés plus ambitieuses et ont abouti à l'élaboration de systèmes de données nucléaires multiplateformes plus facilement accessibles aux utilisateurs et plus fiables. On a déterminé d'autres améliorations possibles que l'on se propose d'apporter en 2005.

16. Les progrès continus réalisés dans la compilation et l'évaluation de données atomiques et moléculaires viennent appuyer non seulement le projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER), mais aussi d'autres travaux de recherche et travaux technologiques dans le domaine de la fusion par confinement inertiel. Les perspectives d'une coopération plus étroite et d'un examen des besoins de données visant à appuyer les recherches sur la fusion nucléaire justifient l'importance accordée à ces travaux au plan mondial.

17. Les applications médicales des rayonnements se développent, et des données fiables, qui sont à la base d'une planification efficace et sûre des traitements et d'une conception optimale des installations elles-mêmes, sont indispensables pour favoriser leur rentabilité et leur propagation. Une bonne connaissance de ces données est nécessaire pour une production optimale des radio-isotopes tels que le fluor 18, le strontium 82 et l'iode 123 au degré de pureté requis pour des applications médicales sûres. Le taux d'incidence du cancer et son augmentation alarmante escomptée dans les années à venir exigent des efforts et des stratégies concertés pour lutter contre la maladie, et les radio-oncologues ainsi que les médecins recherchent activement des données atomiques et nucléaires appropriées pour favoriser la mise au point de méthodes de traitement prometteuses.

B. Applications énergétiques

B.1. L'électronucléaire aujourd'hui¹

18. À la fin de 2004, il y avait 440 centrales nucléaires en exploitation dans le monde. En 2004, l'électronucléaire a fourni 16 % de l'électricité produite dans le monde. Ce pourcentage est plus ou moins stable depuis 1986, ce qui indique que depuis 18 ans l'électronucléaire croît au même rythme que la production mondiale d'électricité.

19. Le facteur mondial de disponibilité énergétique des centrales nucléaires est passé de 81 % en 2003 à environ 83 % en 2004. À titre de comparaison, en 1994, il y a dix ans, il était de 76 %.

20. Le tableau B-1 résume la situation du nucléaire dans le monde au 31 décembre 2004.

21. En 2004, cinq nouvelles centrales nucléaires ont été couplées au réseau (deux en Ukraine, une en Chine, une au Japon et une en Fédération de Russie) et une centrale arrêtée a été de nouveau couplée au réseau au Canada, alors qu'il y avait eu deux nouvelles centrales couplées (plus deux autres reconnectées au Canada) en 2003 et six nouvelles centrales couplées en 2002.

22. Cinq réacteurs ont été retirés du service en 2004 : quatre de 50 MWe au Royaume-Uni et la tranche de 1 185 MWe Ignalina-1, en Lituanie. À titre de comparaison, il y avait eu six tranches mises à l'arrêt en 2003 et quatre en 2002.

¹ L'AIEA tient à jour des données sur les réacteurs en service et mis à l'arrêt, ainsi que sur ceux en construction, comme indiqué dans le dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA à l'adresse suivante : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPES/index.html>. Voir notamment le Système d'information sur les réacteurs de puissance (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>).

23. D'après la définition de l'AIEA selon laquelle la construction d'une centrale nucléaire commence avec le premier coulage de béton, deux centrales nucléaires ont été mises en construction en 2004, à savoir le prototype de surgénérateur à neutrons rapides indien de 500 MWe et le REP japonais Tomari-3 de 866 MWe. En outre, la construction de deux centrales – Kalinin-4 et Balakovo-5 –, qui avait été arrêtée, a repris activement en Fédération de Russie. Par ailleurs, les travaux de préparation du site de la tranche 3 de la centrale d'Olkiluoto de 1 600 MWe en Finlande ont commencé. Une centrale avait été mise en construction en 2003 et sept en 2002.

24. L'expansion actuelle, ainsi que les perspectives de croissance à court et à long terme, sont concentrées en Asie. Comme le montre le tableau B-1, à la fin de 2004, 17 des 26 réacteurs actuellement en construction dans le monde² se trouvaient en Chine, en République de Corée, au Japon et en Inde. Vingt des 30 derniers réacteurs couplés au réseau se trouvaient en Extrême-Orient et en Asie du Sud.

25. En Asie, c'est au Japon que la capacité est la plus forte, avec 54 réacteurs en exploitation et trois en construction. À la fin de 2004, la TEPCO avait remis en service 16 des 17 réacteurs mis à l'arrêt en 2002, ce qui a fait croître la part de l'électronucléaire dans la production d'électricité à 29,3 % en 2004 par rapport à 25 % en 2003 (voir le tableau B-1) dans ce pays, mais cette part était encore plus importante en 2001 et 2002, avec 34 %.

26. En République de Corée, où 19 réacteurs sont en service et un en construction, 38 % de l'électricité produite en 2004 était d'origine nucléaire.

² Y compris à Taiwan (Chine).

Tableau B-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2004)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2004		Expérience d'exploitation totale	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			14,3	6,6	40	3
ALLEMAGNE	18	20 679			158,4	31,8	666	0
ARGENTINE	2	935	1	692	7,3	8,2	52	7
ARMÉNIE	1	376			2,2	38,8	37	3
BELGIQUE	7	5 801			44,9	55,1	198	7
BRÉSIL	2	1 901			11,5	3,0	27	2
BULGARIE	4	2 722			15,6	41,6	133	2
CANADA	17	12 113			85,3	15,0	509	7
CHINE	9	6 602	2	2 000	47,8	2,2	47	11
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	19	15 850	1	960	124,0	38,0	239	8
ESPAGNE	9	7 585			60,9	22,9	228	2
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	99 210			788,6	20,0	2 975	8
FÉDÉRATION DE RUSSIE	31	21 743	4	3 775	133,0	15,6	791	5
FINLANDE	4	2 656			21,8	26,6	103	4
FRANCE	59	63 363			426,8	78,1	1 405	2
HONGRIE	4	1 755			11,2	33,8	78	2
INDE	14	2 550	9	4 092	15,0	2,8	237	5
IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'			1	915				
JAPON	54	45 468	3	3 237	273,8	29,3	1 176	4
LITUANIE	1	1 185			13,9	72,1	38	6
MEXIQUE	2	1 310			10,6	5,2	25	11
PAKISTAN	2	425			1,9	2,4	37	10
PAYS-BAS	1	449			3,6	3,8	60	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 548			26,3	31,2	80	10
ROUMANIE	1	655	1	655	5,1	10,1	8	6
ROYAUME-UNI	23	11 852			73,7	19,4	1 354	8
SLOVAQUIE	6	2 442			15,6	55,2	106	6
SLOVÉNIE	1	656			5,2	38,9	23	3
SUÈDE	11	9 469			75,0	51,8	322	1
SUISSE	5	3 220			25,4	40,0	148	10
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	81,1	51,1	293	6
Total ^b	440	366 311	26	20 826	2 618,6	16 %	11 588	6

a. Données provenant 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 (4 884 MWe) en service ; 2 réacteurs (2 600 MWe) en construction ;

— 37,9 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 20,9 % de la production électrique totale en 2004 ;

— Expérience d'exploitation : 140 ans et un mois.

27. Ailleurs en Asie, les contributions relative et absolue de l'électronucléaire sont moindres, mais la Chine et l'Inde en particulier prévoient une forte expansion. En Inde, où 14 réacteurs étaient en service à la fin de 2004, 2,8 % de l'électricité est d'origine nucléaire. Toutefois, neuf autres réacteurs y sont en construction, y compris le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe, dont la construction a commencé en 2004 à Kalpakkam, et l'objectif actuel de ce pays est de faire passer ce pourcentage à 25 % d'ici 2050.

28. La Chine, qui avait, à la fin de 2004, neuf réacteurs en service et deux en construction, et qui tire 2,2 % de son électricité du nucléaire, prévoit que leur capacité atteindra 32-40 GWe d'ici 2020, soit 4 à 5 % de la production d'électricité. En 2004, le Conseil d'État chinois a officiellement approuvé au moins 7 GWe de nouvelle capacité en sus de celle des réacteurs déjà construction.

29. Avec le couplage au réseau de Kalinin-3 en décembre 2004 et la reprise des travaux de construction de Kalinin-4 et Balakovo-5, la Fédération de Russie avait 31 réacteurs en service et quatre en construction à la fin de l'année. L'Ukraine, après le couplage au réseau de Khmel'nitski-2 et Rovno-4, avait 15 réacteurs en exploitation et deux en construction. Le seul autre réacteur actuellement en construction en Europe orientale est Cernavoda-2 en Roumanie. Comme cela a déjà été mentionné, la tranche Ignalina-1 en Lituanie a été retirée du service à la fin de 2004.

30. L'Europe occidentale avait, fin 2004, 137 centrales nucléaires en service contre 148 en 2001, essentiellement en raison de la déconnexion au Royaume-Uni de dix petites tranches datant des années 50 et 60 (huit tranches de 50 MWe et deux de 123 MWe). Il n'y a actuellement aucune centrale nucléaire en construction dans cette région du monde, mais les travaux d'excavation de la tranche Olkiluoto-3 en Finlande ont commencé en 2004. En outre, après l'adoption par le parlement français de la législation nécessaire, Électricité de France a sélectionné un site pour un réacteur européen à eau sous pression (EPR) de démonstration, dont la construction devrait débuter en 2007. Ces deux réacteurs seront les premiers EPR à être construits. Pour ce qui est de ses centrales vieillissantes construites dans les années 70 et 80, la France a entrepris de 'remplacer le nucléaire par le nucléaire'. Quant au Royaume-Uni, le Livre blanc de 2003 sur la politique énergétique ne propose la construction d'aucune nouvelle centrale, en invoquant leurs coûts et les problèmes non résolus que posent les déchets, mais laisse ouverte l'option nucléaire au cas où une nouvelle tranche nucléaire s'avérerait nécessaire à un moment ou à un autre.

31. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé 11 nouvelles demandes de renouvellement de licences de 20 ans chacune (pour une durée totale de vie autorisée de 60 ans pour chaque réacteur), ce qui porte à 30 le nombre total de demandes approuvées à la fin de l'année. Environ les trois quarts des 104 centrales nucléaires des États-Unis ont obtenu un renouvellement de leur licence, en ont fait la demande ou ont annoncé leur intention de le faire. Le Département de l'énergie des États-Unis (DOE) a approuvé une aide financière à deux consortiums industriels pour des projets de démonstration tirant avantage de la nouvelle licence combinée de la NRC. Cette assistance fait partie du programme 'Électronucléaire 2010', dont l'objectif est la construction d'une nouvelle tranche nucléaire d'ici 2010.

32. Au Canada, l'expansion à court terme de la production électronucléaire résulte du redémarrage de certaines, voire de la totalité, des huit tranches (sur les 22 que compte le Canada) qui avaient été arrêtées ces dernières années. Le redémarrage des deux premières a eu lieu en 2003, puis celui d'une troisième, Bruce A-3, en 2004, et les autorités de la province d'Ontario ont approuvé le plan d'Ontario Power Generation visant à redémarrer Pickering A-1.

33. En Amérique latine, il y a deux réacteurs en service en Argentine, deux au Brésil et deux au Mexique ; un réacteur est en construction en Argentine.

34. En Afrique du Sud, il y a deux centrales nucléaires en service.

B.2. L'avenir

B.2.1. Projections actualisées pour le moyen terme³

35. Chaque année, l'AIEA publie des projections actualisées concernant l'énergie nucléaire sur le moyen terme. La figure B-1 montre celles de 2004, ainsi qu'un scénario de référence actualisé tiré des *Perspectives énergétiques mondiales 2004* de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE. La colonne de gauche dans les ensembles de trois y représente la projection basse de l'AIEA, qui suppose qu'aucune nouvelle centrale nucléaire ne sera construite en dehors de celles déjà en construction ou fermement planifiées de nos jours et que les anciennes centrales nucléaires seront retirées du service comme prévu. La projection basse, assortie de la lettre 'L', montre la répartition de la production d'électricité nucléaire par région.

36. La colonne du milieu dans les ensembles de trois représente la projection haute de l'AIEA, qui incorpore des projets électronucléaires plausibles planifiés et proposés autres que ceux qui sont déjà fermement annoncés. Assortie de la lettre 'H', elle montre elle aussi la répartition par région.

37. Aux fins de comparaison, la colonne de droite montre le scénario de référence actualisé des *Perspectives énergétiques mondiales 2004* de l'AIE, lequel, actualisé tous les deux ans, est bien connu et fréquemment cité comme référence dans les délibérations internationales sur les politiques et marchés énergétiques. Il est basé essentiellement sur la même approche que la projection basse de l'AIEA. Les différences quantitatives entre les deux dans la figure B-1 tiennent pour une large part à des projections plus basses de l'AIE pour l'Europe orientale.

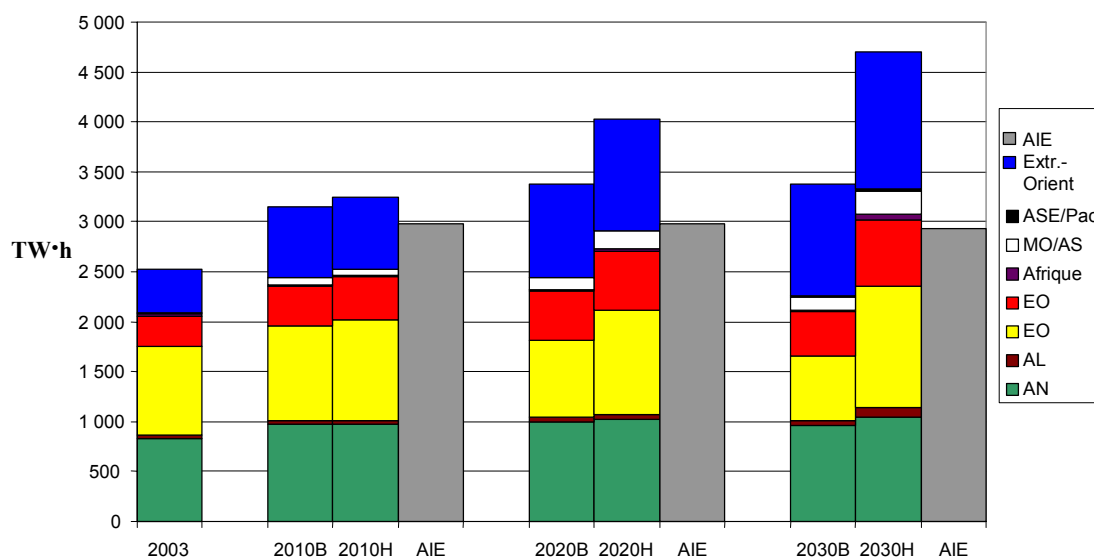


Figure B-1. Production mondiale d'électricité d'origine nucléaire en 2003 et selon trois projections jusqu'en 2030 (AN : Amérique du Nord ; AL : Amérique Latine ; EO : Europe occidentale ; EOR : Europe orientale ; MO/AS : Moyen-Orient/Asie du Sud ; ASE/Pac : Asie du Sud-Est/Pacifique).

³ Pour plus de détails sur les projections récentes de l'AIEA, voir le site <http://nesisda2/rds-1/>. Les activités récentes et actuelles de collecte de données et d'évaluation par des experts pour les projections à moyen terme de l'AIEA sont décrites dans son dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur son site web : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/>.

38. La projection basse de l'AIEA prévoit que la production d'électricité d'origine nucléaire en 2030 s'établira à 3 379 TW·h, soit une augmentation de 34 % par rapport à 2003. Il convient de noter que les projections basses de l'AIEA sont révisées à la hausse tous les ans depuis 2000. Le chiffre de production de 3 378 TW·h indiqué pour 2020 dans la figure B-1 dépasse de 60 % celui prévu dans les projections établies par l'AIEA en 2000 pour cette même année (lesquelles n'allaient d'ailleurs pas au-delà de 2020).

39. La projection haute de l'AIEA montre une augmentation de 86 % de la production d'électricité d'origine nucléaire entre 2003 et 2030. D'une année sur l'autre, il y a moins de changements dans la projection haute et leur structure est moins cohérente. L'évolution de ces projections considérées ensemble est intéressante pour une industrie qui a des perspectives raisonnablement bonnes, sans qu'elle progresse pour autant de manière extraordinaire. La liste des projets raisonnables à moyen terme dans la projection haute est relativement stable, et chaque année un nombre de plus en plus grand d'entre eux passent du stade des perspectives prometteuses à celui de projets réellement en préparation.

40. La figure B-1 montre des différences significatives entre les diverses régions du monde. Comme cela a déjà été dit, l'expansion actuelle est concentrée en Extrême-Orient, où la croissance est la plus forte dans toutes les projections. On note une expansion notable en Europe orientale dans les projections haute et basse de l'AIEA, mais une croissance très modeste en Amérique du Nord. Pour ce qui est de l'Europe occidentale, on note une contraction dans la projection basse à mesure que le nombre de réacteurs retirés du service dépasse celui de ceux qui sont mis en construction, mais une expansion significative dans la projection haute. Les taux de croissance au Moyen-Orient et en Asie du Sud sont élevés dans les deux projections de l'AIEA, bien que partant d'un seuil très bas en 2003.

41. Bien que la figure B-1 ne montre pas la répartition par région pour le scénario de référence de l'AIE, qui est légèrement différente de celle retenue par l'AIEA, le schéma qui en ressort est en grande partie le même que dans la projection basse de l'AIEA, à savoir expansion en Extrême-Orient et en Asie du Sud, contraction en Europe occidentale et stabilité en Amérique du Nord.

B.2.2. Développement durable et changements climatiques⁴

42. À long terme, le futur de l'électronucléaire dépendra notamment de la mesure dans laquelle il contribuera à satisfaire les besoins énergétiques mondiaux croissants et à résoudre les problèmes environnementaux liés à l'utilisation de l'énergie. Pour ce qui est de la croissance des besoins énergétiques dans le monde, en 2004, il n'y a eu aucune grande rencontre internationale sur les besoins énergétiques aux fins d'un développement durable. La prochaine fois que la Commission du développement durable de l'ONU abordera les questions de l'énergie sera durant ses quatorzième et quinzième sessions en 2006 et 2007.

43. En ce qui concerne la protection de l'environnement, le principal fait marquant dans le monde en 2004 a été la ratification en novembre, par la Fédération de Russie, du Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. En conséquence, les pays figurant à l'annexe I⁵ ayant ratifié le protocole représentaient ensemble plus de 55 % des émissions de carbone visées par l'annexe I en 1990, et le protocole est entré en vigueur 90 jours plus tard, le 16 février 2005.

⁴ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les aspects énergétiques du développement durable figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

⁵ Les pays figurant à l'annexe I sont les pays membres de l'OCDE en 1992 plus les pays à économie en transition à cette époque.

44. L'entrée en vigueur de cet instrument aura probablement peu d'incidences immédiates sur l'expansion du nucléaire. Le protocole ne couvre que la première période d'engagement (2008-2012), et les pays ont adopté des politiques différentes pour respecter les limites qui y sont énoncées. Toutes ces politiques ne profitent pas à l'électronucléaire, en dépit de ses très faibles émissions de gaz à effet de serre – 2 à 6 grammes de carbone seulement par kilowatt-heure pour l'ensemble de la chaîne du combustible nucléaire, soit à peu près autant que l'énergie éolienne et solaire. Cependant, à long terme, il devrait constituer une option plus intéressante à mesure que l'on s'acheminera vers une économie à taux de carbone réduit. Dans le passé, ses avantages en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre n'apparaissaient pas clairement aux investisseurs, qui n'avaient aucun intérêt économique à s'en préoccuper en l'absence de restrictions ou de taxes sur ces émissions. En tant que seul moyen actuel de réduire ces dernières sur une vaste échelle et de manière coordonnée, le Protocole de Kyoto constitue une étape importante vers l'attribution d'une valeur économique tangible à leur réduction grâce à l'électronucléaire.

B.2.3. Questions d'actualité

Considérations économiques

45. D'une manière générale, les centrales actuelles, bien gérées, continuent d'être un moyen économiquement concurrentiel de produire de l'électricité, comme le démontre le rythme soutenu des renouvellements de licences aux États-Unis et ailleurs, même si en dehors de ce pays, les périodes concernées sont en général plus courtes, les demandes plus fréquentes, ou si le renouvellement est continu.

46. Pour ce qui est de la construction de nouvelles centrales, la compétitivité de l'électronucléaire dépend, entre autres choses, du coût des autres options avec lesquelles il doit entrer en concurrence, des perspectives des investisseurs, et des marchés de l'énergie et de l'électricité sur lesquels il doit opérer. Le tableau B-2 présente des estimations récentes sur le coût des nouvelles centrales nucléaires et de leurs principaux concurrents, lesquelles font apparaître des fourchettes qui témoignent de la diversité des technologies, des situations nationales en matière de ressources et des perspectives des investisseurs. Il comporte notamment deux estimations parues récemment qui rendent compte de l'expérience actuelle. Énergie atomique du Canada Limitée a estimé à 1 500 dollars par kWe (soit 1 163 euros par kWe selon le taux de change retenu dans le tableau B-2) le coût des travaux de construction des tranches Qinshan 3-1 et Qinshan 3-2 à Zhejiang (Chine), tandis que celui indiqué pour le réacteur EPR d'Olkiluoto 3 s'établit à 1 920 euros par kWe.

47. En 2004, on note deux tendances continues importantes sur les marchés de l'électricité, à savoir une libéralisation accrue et l'application de limites plus strictes sur les émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, dans les 15 États membres de l'Union européenne (avant son élargissement en 2004), le marché de l'électricité a été entièrement ouvert à la concurrence pour tous les consommateurs non résidentiels, tandis qu'au Japon il a été ouvert à 40 % (60 % en 2005). Par ailleurs, une directive de l'Union européenne d'octobre 2003 établit un système d'échange de quotas d'émission de dioxyde de carbone qui entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2005, et en 2004 des plans nationaux d'allocation de quotas fixant une quantité initiale de quotas pour des entreprises ont été élaborés. À la fin de l'année, la Commission européenne avait évalué 21 de ces plans. Elle en a approuvé 15 sans condition, trois sous conditions et a 'partiellement rejeté' les trois derniers.

Tableau B-2. Estimations comparatives des coûts tirées d'études récentes

	MIT ^a	Université de Chicago ^b	Académie royale d'ingénierie ^c	DGEMP France ^d	METI Japon ^e	CERI Canada ^f	AEN/AIE ^g
Coût moyen actualisé^h	<i>Centimes d'euro/kWhⁱ</i>	<i>Centimes d'euro/kWh</i>	<i>Centimes d'euro/kWh</i>	<i>Centimes d'euro/kWh</i>	<i>Centimes d'euro/kWh</i>	<i>Centimes d'euro/kWh</i>	<i>Centimes d'euro/kWh</i>
Énergie nucléaire	5,2	3,2-5,5	3,3	2,8	3,8	3,4-5,8	1,6-5,3
Charbon	3,3	2,6-3,2	3,6-5,0	3,2-3,4	4,1	3,1-3,8	1,2-5,3
Gaz naturel	2,9-4,3	2,7-3,5	3,1-4,0	3,5	4,5	4,7-4,9	2,9-5,0
Pétrole					7,8		
Énergie hydraulique							3,1-18,8
Fiente de volaille			9,7				
Vent de mer			5,3-7,7				2,4-11,2
Vent de terre			7,9-10,3				4,0-9,5
Vagues/marées			9,4				
Énergie solaire photovoltaïque							9,4-145,4
Coût afférent à la construction instantanée d'une centrale^j	<i>euros/kW(e)</i>	<i>euros/kW(e)</i>	<i>euros/kW(e)</i>	<i>euros/kW(e)</i>	<i>euros/kW(e)</i>	<i>euros/kW(e)</i>	<i>euros/kW(e)</i>
Énergie nucléaire	1550	930-1395	1642	1413	2026	1525-1931	832-1945
Charbon	1008	916-1132	1042-1171	1000-1100	1975	1040	557-1819
Gaz naturel	388	388-543	428	505	1191	462	329-1001
Pétrole					1953		
Énergie hydraulique							1194-5413
Fiente de volaille			2628				
Vent de mer			1057				756-1266
Vent de terre			1314				1269-2032
Vagues/marées			1999				
Énergie solaire photovoltaïque							2606-7877

a. The Massachusetts Institute of Technology, *The Future of Nuclear Power*, The Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA (2003)

b. The University of Chicago, *The Economic Future of Nuclear Power*, The University of Chicago, Chicago, Illinois, USA (2004)

c. The Royal Academy of Engineering, *The Cost of Generating Electricity*, London, UK (2004)

d. Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP), Ministère français de l'économie, des finances et de l'industrie, Paris, France (2003)

e. Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie, Tokyo, Japon (2004)

f. Matt Ayres, Morgan MacRae and Melanie Stogran, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, Canadian Energy Research Institute (CERI), Calgary, Alberta, Canada (2004)

g. Agence pour l'énergie nucléaire et Agence internationale de l'énergie, *Coûts prévisionnels de production de l'électricité : Mise à jour 2005*, Organisation de coopération et de développement économiques, Paris (2005)

h. Le coût moyen actualisé de l'électricité est le prix aux bornes du système nécessaire pour couvrir les coûts d'exploitation ainsi que les dépenses d'investissement d'une centrale nucléaire amorties sur une base annuelle.

i. Les monnaies nationales utilisées dans les différentes études sont converties en euros selon les taux de change en vigueur au 11 novembre 2004.

j. Le coût afférent à la construction instantanée d'une centrale est le montant qui serait versé si toutes les dépenses d'investissement étaient engagées simultanément. Il ne comprend aucun frais d'intérêt.

Sûreté⁶

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

49. Cet échange d'informations et ces travaux d'analyse expliquent en partie l'amélioration continue du bilan global de l'industrie nucléaire en matière de sûreté. Les statistiques de l'Association mondiale des exploitants nucléaires pour 2003 font apparaître un taux faible et stable d'arrêts d'urgence automatiques non planifiés – environ un tiers de ce qu'il était au début des années 90 – et une baisse continue du taux déjà faible d'accidents industriels.

50. 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* que l'AIEA publie chaque année.

Déclassement, combustible usé et déchets⁷

51. En matière de déclassement, la tendance vers un démantèlement immédiat se poursuit. Aux États-Unis, ceci s'explique en partie par la volonté d'utiliser les sites de stockage définitif des déchets disponibles tant qu'ils sont encore ouverts et avant l'augmentation des coûts. Parmi les centrales nucléaires qui arrivent à la fin du processus, on peut citer Yankee Rowe et Maine Yankee (déclassement achevé à 90 % à la fin de 2004 et 'libération du site sans restriction' prévue pour 2005), Big Rock Point (déclassement achevé à 85 % et libération du site également prévue pour 2005), Trojan (déclassement achevé à 95 % et licence venant à expiration en 2005) et Connecticut Yankee (libération du site prévue pour 2007). Les exceptions à la stratégie de démantèlement immédiat concernent essentiellement des sites dotés de plusieurs réacteurs où le démantèlement est prévu quand ces derniers auront tous atteint la fin de leur durée d'exploitation.

52. Même lorsque les stratégies sont similaires, dans certains cas les raisons sont souvent différentes. En Allemagne, par exemple, où le démantèlement immédiat semble aussi être la solution privilégiée, le projet à grande échelle de démantèlement immédiat du site de Greifswald dans l'est de l'Allemagne (cinq réacteurs initialement en service, un sur le point de l'être et deux en construction) a largement favorisé la fidélisation du personnel clé et le réemploi d'une grande partie du personnel d'exploitation.

53. La constitution d'une nouvelle catégorie de déchets radioactifs dans certains pays, les déchets de très faible activité (DTFA), constitue un progrès décisif. Un dépôt destiné à ce type de déchets, mis en service à Morvilliers (France) en 2003, est devenu pleinement opérationnel en 2004. L'Espagne envisage également d'en construire un. Cette catégorie de déchets est destinée à recueillir la plupart de ceux qui proviennent d'opérations de déclassement et dont le stockage définitif reviendra bien moins cher que s'il s'agissait de déchets de faible activité traditionnels.

⁶ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA : <http://www-ns.iaea.org/>.

⁷ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le déclassement, le combustible usé et les déchets figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html> et <http://www-ns.iaea.org/home/rtws.asp>.

54. En ce qui concerne le combustible usé, les stocks continuent de croître. Toutefois, le combustible usé est entreposé de manière sûre depuis des décennies sur des sites de réacteurs et d'entreposage provisoire, et avec une modeste expansion des capacités d'entreposage, ces installations pourront assurer l'entreposage nécessaire pour de nombreuses années.

55. En ce qui concerne les déchets de haute activité, ce sont la Finlande, la Suède et les États-Unis qui ont le plus progressé vers la construction d'installations de stockage définitif. En Finlande, les travaux de construction d'un laboratoire souterrain, qui servira à caractériser les formations géologiques locales et pourra être ultérieurement incorporé dans le dépôt final, ont démarré en 2004 à Olkiluoto. La construction du dépôt devrait commencer en 2011 et sa mise en service intervenir en 2020. La Suède a commencé à effectuer des recherches géologiques approfondies sur deux sites potentiels. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) espère être en mesure de proposer un site définitif vers 2008. Aux États-Unis, l'installation pilote de confinement des déchets du Nouveau-Mexique a commencé, en 1999, à recevoir des déchets transuraniens d'origine militaire pour stockage définitif et, en 2002, le gouvernement a décidé de mettre à exécution le projet concernant le site de stockage définitif à Yucca Mountain. Les opérations sur ce site devraient commencer en 2010. L'événement majeur en 2004 a été une décision de justice stipulant que les règlements élaborés pour le site par l'Agence de protection de l'environnement étaient moins stricts que ceux qu'exige la loi. Si la décision est maintenue, il faudra probablement modifier soit la conception de l'installation, soit la loi.

56. Au Canada, conformément à la loi de 2002 sur les déchets de combustible nucléaire, la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) a jusqu'en novembre 2005 pour recommander une stratégie de gestion du combustible nucléaire usé. En mai 2005, la SGDN a publié un projet de recommandations pour examen et observations, proposant une stratégie évolutive en trois phases. La première serait l'entreposage du combustible usé sur les sites de réacteurs pendant approximativement 30 ans. Pendant ce temps, un site pour un dépôt centralisé serait choisi et un laboratoire souterrain serait construit. La deuxième phase durerait aussi environ 30 ans. Selon 'l'orientation sociétale', le combustible usé pourrait être transféré au site central pour y être provisoirement entreposé durant cette phase. Lors de la troisième phase, il serait placé dans le dépôt. Les générations futures décideraient, au cours de cette phase, si et quand le dépôt devrait être fermé et quel type de surveillance serait nécessaire après la fermeture.

Technologie nucléaire et non-prolifération des armes nucléaires⁸

57. Plusieurs événements intervenus en 2003 et 2004 ont davantage sensibilisé la communauté internationale au risque de prolifération des armes nucléaires associé aux parties sensibles du cycle du combustible nucléaire. Un certain nombre de révélations concernant des activités non déclarées d'enrichissement d'uranium et de retraitement du combustible usé, ainsi que la découverte de l'existence d'un marché international illicite de technologies nucléaires sensibles, ont souligné la nécessité d'améliorer les contrôles sur ces parties du cycle du combustible nucléaire. Plusieurs propositions ont donc été formulées, notamment par le Directeur général de l'AIEA, en vue de consolider le régime de non-prolifération nucléaire par des mesures tendant à renforcer les garanties, à améliorer la protection physique des matières et installations nucléaires et à soutenir le système actuel de contrôle des exportations nucléaires. En outre, les travaux visant à mettre au point des technologies nucléaires antiproliférantes se sont poursuivis dans le cadre du projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) et de l'initiative Génération IV.

⁸ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la résistance à la prolifération et les garanties figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA : <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>.

B.2.4. Ressources⁹

58. En 2004, l'augmentation spectaculaire du prix de l'uranium en dollars amorcée en 2003 s'est poursuivie, comme le montre la figure B-2. Au nombre des facteurs qui y ont contribué figurent des perturbations de la production dans plusieurs mines d'uranium, la faiblesse du dollar, et la diminution des stocks et des sources d'approvisionnement secondaires. Vers le milieu de l'année 2005, le prix au comptant de l'uranium sur le marché libre a atteint 75 dollars le kilo, alors qu'il était de 40 dollars le kilo au début de 2004. À moyen terme, l'augmentation de la demande devrait peser sur les prix aussi bien dans les projections haute et basse de l'AIEA (section B.2.1) que dans le scénario de référence de l'AIE, du moins jusqu'en 2010.

59. La dernière mise à jour de la publication biennale de l'AIEA et de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (le 'Livre rouge') intitulée 'Uranium 2003 : Ressources, production et demande', parue en 2004, fait état d'une production d'uranium de 36 042 tonnes en 2002, soit un peu en deçà des 37 020 tonnes produites en 2001. En 2002, cette production a couvert 54 % des besoins des réacteurs dans le monde (66 815 tonnes d'uranium), le reste l'ayant été grâce à des sources secondaires, y compris des stocks civils et militaires, de l'uranium retraité et de l'uranium appauvri réenrichi.

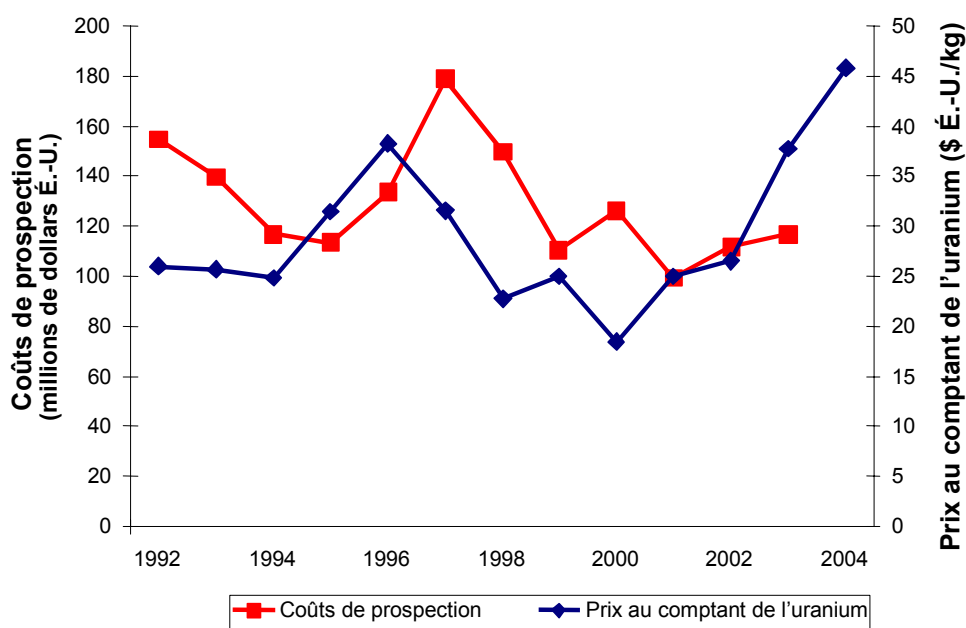


Figure B-2. Prix au comptant de l'uranium et coûts de prospection, 1992-2004.

⁹ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les ressources nucléaires figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA : http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_home.html.

60. La baisse de la production d'uranium depuis le début des années 90 n'est pas due exclusivement aux prix peu élevés, car des règlements plus stricts et l'attention accrue portée aux problèmes de l'environnement y ont aussi contribué. Par exemple, au Canada, dans les années 40 et 50, il s'écoulait normalement entre 3 et 10 ans entre la découverte d'un gisement et le début de la production, tandis que dans les années 60 et 70, un laps de temps de 11 à 16 ans était devenu la norme, et le Livre rouge de 2003 signale que depuis les années 80 un intervalle de 10 à 20 ans est courant dans de nombreux pays.

61. Dans le passé, les hausses de prix ont été d'habitude suivies, environ un an après, d'une augmentation des travaux de prospection d'uranium, comme le montre la figure B-2. Tout indique que ces tendances vont se poursuivre, et la courbe des coûts de prospection sera nettement plus élevée en 2004, lorsque toutes les données seront connues.

B.2.5. Fission et fusion avancées¹⁰

62. Confrontés aux défis que doit actuellement relever le secteur de l'électronucléaire, comme indiqué dans la section B.2.3., de nombreux pays cherchent à améliorer les volets coûts, sûreté, gestion des déchets et résistance à la prolifération des systèmes avancés réacteurs-cycles du combustible. En ce qui concerne les modèles avancés de centrales nucléaires, les efforts visent essentiellement à simplifier le fonctionnement, l'inspection, l'entretien et la réparation de ces dernières. À court terme, la plupart des nouvelles centrales adopteront probablement des concepts évolutifs, capitalisant sur des systèmes éprouvés tout en intégrant des innovations technologiques et en réalisant souvent des économies d'échelle. À plus long terme, l'accent est placé sur des modèles innovants, dont plusieurs concernent la gamme des réacteurs de faible ou moyenne puissance (jusqu'à 700 MWe). Ces modèles prévoient la construction de centrales dont des composants pourraient être préfabriqués, voire dont la conception entièrement modulaire accélérerait la mise en place, donnant ainsi la possibilité de faire des économies par une production en série plutôt que des économies d'échelle. Certains sont conçus pour une exploitation sans rechargement sur le site. Des tranches de plus petite taille seraient également plus faciles à financer, mieux adaptées aux petits réseaux électriques ou aux sites éloignés, et pourraient servir au chauffage urbain, au dessalement de l'eau de mer et à d'autres applications non électriques. Toutes ces caractéristiques devraient les rendre plus attrayantes pour de nombreux pays en développement et certains pays industrialisés.

63. Des efforts de conception considérables sont actuellement déployés sur de grands réacteurs à eau ordinaire (REO) évolutifs par l'Allemagne, la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France, le Japon et la République de Corée. Les principaux travaux sur des modèles évolutifs de REO de faible ou moyenne puissance sont réalisés par la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Japon. Des modèles *innovants* de REO (à savoir caractérisés par des changements radicaux dans les choix de conception ou la configuration des systèmes) sont mis au point en Argentine, aux États-Unis, en Fédération de Russie, au Japon et en République de Corée.

64. Le Canada et l'Inde travaillent sur des modèles de réacteurs avancés à eau lourde, tandis que l'Afrique du Sud, l'Allemagne, la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France, le Japon et le Royaume-Uni s'emploient à concevoir des modèles avancés de réacteurs refroidis par gaz. La Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon et la République de Corée sont en train de mettre au point de nouveaux réacteurs rapides refroidis par métal liquide. Des travaux visant à concevoir des systèmes de réacteurs rapides refroidis par alliage de plomb liquide et par sodium

¹⁰ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la fission avancée figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) et sur le site web de l'AIEA : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS.html>. Des informations sur les activités de l'AIEA concernant la fusion figurent également dans le rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>).

liquide et des réacteurs rapides refroidis par gaz (hélium) sont menés dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF) et par la Fédération de Russie. Des recherches sur des systèmes hybrides de réacteurs à spectre de neutrons rapides (par exemple les systèmes alimentés par accélérateur) sont en cours aux États-Unis, en Fédération de Russie, en Inde, au Japon, en République de Corée et dans huit pays de l'UE.

65. Deux autres grandes initiatives internationales visant à promouvoir l'innovation viennent compléter les précédentes, à savoir le GIF et le projet INPRO. Font partie du GIF l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, les États-Unis, la France, le Japon, la République de Corée, le Royaume-Uni, la Suisse et EURATOM. Le GIF a examiné une vaste gamme de concepts innovants et, en 2002, a choisi six types de réacteurs pour la coopération bilatérale et multilatérale future : les réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz, les réacteurs refroidis par alliage de plomb liquide, les réacteurs à sels fondus, les réacteurs refroidis par sodium liquide, les réacteurs refroidis par eau supercritique et les réacteurs à gaz à très haute température.

66. Sont membres du projet INPRO de l'AIEA les pays suivants : Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Arménie, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Chine, Espagne, Fédération de Russie, France, Inde, Indonésie, Maroc, Pakistan, Pays-Bas, République de Corée, République tchèque, Suisse, Turquie et Ukraine, ainsi que la Commission européenne. En 2003, ils ont publié un rapport initial qui a mis en évidence le potentiel de l'électronucléaire et établi des directives détaillées et une méthode pour évaluer les concepts innovants. En 2004, cette méthode a été mise à l'essai au moyen d'applications pilotes dans une série d'études de cas, et un rapport final sur cette méthode mise à jour a été publié en décembre. La prochaine phase de l'INPRO vise à faciliter l'évaluation de systèmes nucléaires innovants par les États Membres à l'aide de la méthode INPRO mise à jour, à définir et à modéliser des scénarios d'introduction de tels systèmes en prenant en compte les stratégies envisagées par les États Membres, et à définir des cadres et des options possibles pour des travaux de R-D sur la mise au point de ces systèmes qui pourraient être menés en collaboration durant la phase suivante.

67. La majeure partie des travaux actuels de recherche expérimentale et théorique sur la fusion nucléaire porte sur le Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER). Les activités de conception technique du réacteur ITER sont achevées et le projet commence à se concrétiser avec l'annonce faite, le 28 juin 2005, par les pays parties – Chine, États-Unis, Fédération de Russie, Japon, République de Corée et Union européenne – que le site choisi est celui de Cadarache (France). Le but est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion en construisant un réacteur de fusion fonctionnel. La construction de l'ITER devrait prendre environ 8 ans et il sera ensuite exploité pendant une vingtaine d'années. Il s'agira du premier dispositif au monde capable de générer au moins cinq fois plus d'énergie qu'il n'en consomme grâce à une réaction de fusion nucléaire contrôlée. L'ITER ouvrira de nouveaux horizons pour les applications énergétiques de la science et de la technologie nucléaires, avec des retombées escomptées dans de nombreux autres domaines.

68. Les recherches se poursuivent également sur d'autres dispositifs de confinement magnétique, et le confinement inertiel fait l'objet de travaux intensifs dans le cadre de programmes nationaux en France et aux États-Unis. L'Installation nationale d'ignition des États-Unis devrait être achevée en 2008. Des informations sur les travaux de recherche parrainés par l'AIEA concernant la fusion et d'autres sujets sont disponibles sur le site <http://www-crp.iaea.org>, dans le rapport intitulé *Coordinated Research Activities: Annual Report and Statistics for 2004*.

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

C.1. Gestion durable des terres et efficacité de l'utilisation de l'eau

69. La demande croissante de nourriture dans le monde met une pression énorme sur la durabilité des ressources en terre et en eau, ce qui a déplacé l'axe de recherche en agriculture : il n'importe plus simplement de trouver les moyens d'augmenter la production mais de chercher comment y parvenir sans dégrader les ressources naturelles. Ce recentrage de la recherche s'accompagne à la fois de défis nouveaux pour appliquer les techniques nucléaires existantes et d'applications nouvelles pour aborder les questions de durabilité de l'environnement. L'un des défis majeurs est l'application des techniques nucléaires de préservation du sol et de l'eau à des niveaux plus larges que la simple parcelle et le champ, c'est-à-dire à l'échelle de l'écosystème, du bassin versant et du paysage ; toutefois il importe aussi de recenser des cultures qui utilisent efficacement l'eau et les ressources en nutriments du sol et qui sont adaptées à des environnements difficiles (sécheresse, salinité ou stress nutritionnel par exemple). On est en train d'examiner toute une gamme de techniques nucléaires pour diagnostiquer les pratiques non durables et pour déterminer des pratiques de gestion à l'échelle de l'exploitation agricole et à des échelles plus vastes de l'écosystème. Il s'agit notamment des traceurs isotopiques phosphore 32 et azote 15, des variations de la teneur naturelle en isotopes stables (carbone 13, oxygène 18 et azote 15 par exemple) dans le sol, les plantes et l'eau et les radionucléides provenant des retombées (césium 137, plomb 210 et béryllium 7). En réponse aux préoccupations croissantes sur la quantité et la qualité de l'eau, de nouvelles initiatives mondiales, s'appuyant sur les avancées récentes dans le domaine de l'utilisation de plusieurs isotopes stables (hydrogène 2, oxygène 18, carbone 13 et azote 15), sont prises actuellement pour évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans différents systèmes de culture et d'irrigation. On étudiera notamment l'impact de la programmation de l'irrigation sur l'efficacité d'utilisation des engrais, la réutilisation rationnelle des eaux usées agricoles comme source d'eau et de nutriments pour améliorer la productivité des cultures et l'importance relative de différents polluants d'origine agricole affectant les eaux de ruissellement. Les isotopes mentionnés ci-dessus, utilisés en conjonction avec les traceurs non isotopiques et les humidimètres à neutrons, devraient donner des informations permettant de mettre au point des outils de gestion agricole pour renforcer l'efficacité d'utilisation de l'eau et la durabilité de systèmes agricoles à la fois dans des terres non irriguées et dans des terres irriguées, grâce à une meilleure compréhension des rapports sol-plante-eau.

C.2. Amélioration des cultures

70. L'induction de mutations associée à la sélection reste le moyen le plus 'propre' et le moins coûteux de créer des variétés en modifiant certaines caractéristiques sans toucher au phénotype général. Les controverses sur les risques potentiels que présentent la vulgarisation et la consommation d'organismes génétiquement modifiés (OGM) suscitent dans de nombreux pays des débats sur l'opportunité d'autoriser la culture de végétaux contenant des OGM et leur consommation. Dans ce contexte, tant les sociétés commerciales que le secteur public manifestent un regain d'intérêt à l'égard des techniques d'induction de mutations comme alternative aux techniques transgéniques. Plus de 60 % de variétés mutantes ont été diffusées après 1985, ère des techniques transgéniques en phyto-génétique (89 % des nouvelles variétés mutantes officielles proviennent de mutations radio-induites). Cette tendance s'explique également par les grands succès économiques que connaît la phyto-génétique renforcée par mutagenèse aux États-Unis d'Amérique (riz, avoine, tournesol, pamplemousse, menthe poivrée), au Pakistan (coton), en Inde (soja vert), en Australie et au Canada (graine de lin), au Japon (poire) et en Chine et Australie (riz).

71. Une autre tendance importante est la privatisation de la recherche en ce qui concerne les programmes de sélection par mutation, non seulement de fleurs ornementales mais aussi de cultures industrielles, commerciales ou agroalimentaires. Ce fait est largement étayé par l'augmentation des demandes adressées à la base de données publique FAO/AIEA sur les variétés de mutants et à la banque de matériel génétique mutant FAO/AIEA. Les informations sur les protocoles utilisés pour induire des mutations dans différents végétaux sont devenues d'accès de plus en plus privilégié (secret commercial) et la libre publication d'informations sur l'origine mutante de variétés a diminué (fig. C-1).

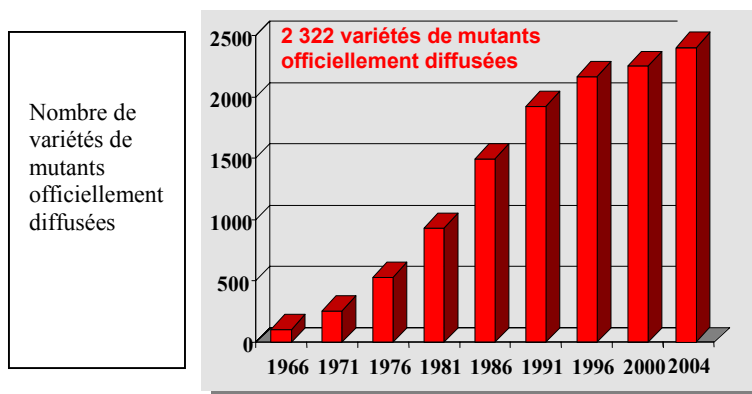


Figure C-1. Nombre cumulé de variétés officiellement diffusées dans la base de données sur les variétés de mutants. Informations provenant des autorités nationales officielles des États Membres de la FAO et de l'AIEA.

72. Il est difficile de prévoir ce qui sera disponible ou important à l'avenir et d'en prédire les conséquences mais les progrès récents en biotechnologie – notamment dans la compréhension de la structure et du fonctionnement des génomes des plantes – confirment que l'induction de mutations est l'un des outils les plus efficaces et rentables pour des projets de génomique fonctionnelle portant sur la découverte de gènes et mettant en évidence la fonction génétique. Il existe une demande de plus en plus forte de grandes collections de mutants pour l'analyse des mécanismes de développement de base et des phénomènes biochimiques et physiologiques, suscitant la mise au point de grilles de mutants (collections de mutants dans des arrangements spécifiques pour des analyses à haut débit) en génomique fonctionnelle. Les technologies à haut débit et les méthodes de génomique fonctionnelle vont ouvrir de nouvelles perspectives pour étudier les aspects fondamentaux et appliqués de la biologie. De l'analyse statique du génome, on s'oriente vers une analyse dynamique du profil du transcriptome (de tous les gènes exprimés). Les techniques nucléaires favorisent de plus en plus cette nouvelle discipline de recherche en produisant les ressources de base de mutants nécessaires.

C.3. Protection des cultures

73. Les sociétés commerciales s'intéressent de plus en plus à la production de masse d'insectes stériles pour l'application intégrée de la technique de l'insecte stérile (TIS), notamment pour lutter contre les insectes ravageurs, en particulier la mouche méditerranéenne des fruits. Auparavant, la TIS était utilisée essentiellement pour l'éradication locale des grands insectes ravageurs. Cela n'a pas conduit à une demande prévisible et continue d'insectes stériles. Toutefois, du moins pour la mouche méditerranéenne des fruits, la TIS a progressé et est actuellement une technologie rentable. Elle sert donc désormais à supprimer sur une base régulière des populations de ravageurs plutôt qu'à les

éradiquer, entraînant ainsi une demande continue de mouches méditerranéennes stériles et ouvrant la voie à la commercialisation de la TIS pour la mouche méditerranéenne des fruits.

74. Cette nouvelle situation soulève un certain nombre de questions de droits de propriété juridique et intellectuelle en rapport avec la technologie de la TIS au stade de son application et de son développement. Auparavant, les autorités publiques étaient pour l'essentiel les parties prenantes à la production et au lâcher d'insectes stériles, se partageant l'utilisation de cette technologie et il ne se posait donc guère de questions de cet ordre. Par exemple, une technique d'un intérêt majeur a été introduite dans les programmes TIS de lutte contre la mouche méditerranéenne : il s'agit des souches à sexage génétique porteuses d'une mutation thermo-sensible létale. Ces souches exclusivement mâles sont utilisées aujourd'hui dans tous les pays qui appliquent des programmes TIS pour la mouche méditerranéenne, mais les conditions de transfert ou d'octroi de licences à des sociétés privées doivent encore être définies.

75. L'utilisation des insectes stériles, à la place des insecticides, pour réduire les populations de grands ravageurs contribue à la survie et à l'efficacité des agents de lutte biologique contre des nuisibles d'ordre secondaire et, de ce fait, influe positivement sur la demande de ces produits biologiques. On estime que, pour le seul bassin méditerranéen, la demande potentielle de mouches méditerranéennes des fruits stériles s'élève au moins à 4 milliards de mâles par semaine, soit presque autant que le nombre total actuellement produit dans le monde. Afin de répondre en partie la demande dans cette région, des insectariums pour l'élevage en masse sont en construction en Israël et en Espagne.

76. En Argentine, un programme TIS de lutte intégrée contre la mouche méditerranéenne des fruits à l'échelle d'une zone, d'une durée de dix ans, a récemment abouti à la reconnaissance officielle par le Chili de 'zones exemptes de mouches méditerranéennes des fruits' dans la région de production fruitière de Mendoza. Cela permettra le transit direct des produits agricoles par le Chili jusqu'aux ports du Pacifique pour être exportés vers les marchés de fruits frais des pays en bordure du Pacifique.

77. Les progrès récents accomplis dans la mise au point de souches transgéniques d'insectes ravageurs ouvrent la voie à l'utilisation des techniques moléculaires pour améliorer les souches TIS. Un certain nombre d'universités et d'organismes de recherche sont en train d'évaluer et de caractériser dans des laboratoires fiables plusieurs de ces souches présentant des caractéristiques avantageuses. Toutefois, leur diffusion, même comme insectes stériles, exige une importante évaluation supplémentaire du risque et un cadre réglementaire et n'est donc pas envisageable à court terme.

C.4. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail

78. Les principaux travaux de recherche animale supposent l'utilisation de méthodes moléculaires et génétiques pour comprendre et manipuler les génomes. Bien qu'on fasse de plus en plus appel aux méthodes non radioactives, on continue d'utiliser largement les radio-isotopes dans de tels travaux.

79. Les récents comptes rendus du Colloque international FAO/AIEA sur le recours aux techniques génétiques pour l'amélioration de la production et de la santé animales dans les pays en développement (<http://www.iaea.org/programmes/nafa/d3/mtc/final-report-int-symposium.pdf>) mettent en lumière les avantages que les éleveurs de ces pays peuvent tirer de l'utilisation des technologies nucléaires.

C.5. Sécurité sanitaire des aliments et des produits végétaux et animaux

80. L'irradiation et les autres techniques nucléaires sont utilisées de plus en plus dans le secteur privé pour assurer la sécurité sanitaire des aliments, réduire au maximum les risques d'ordre chimique, biologique et physique, et promouvoir le commerce intérieur et international. Cette demande croissante porte sur des systèmes agricoles intégrés de production, traitement et contrôle d'hygiène des produits végétaux et animaux et comprend la gestion des risques environnementaux. On pense que les responsables gouvernementaux se concentreront de plus en plus sur le contrôle à la source de la sécurité sanitaire des aliments lors de la production de denrées à forte demande dans leurs pays, y compris les fruits et légumes frais, les produits de boucherie et de charcuterie et les produits laitiers. On prévoit également que, bien que la sécurité sanitaire et l'innocuité des aliments irradiés aient été prouvées, la perception et l'acceptation négatives de l'irradiation des aliments par le consommateur continueront d'entraver l'application de cette technique ; c'est pourquoi des programmes de formation théorique et pratique et une information sur les avantages de cette technologie sont nécessaires pour promouvoir son utilisation dans l'industrie alimentaire.

D. Santé humaine

D.1. Nutrition

81. Les techniques isotopiques sont de plus en plus considérées comme plus appropriées et précises que les méthodes traditionnelles pour définir et évaluer les programmes de nutrition. Les traceurs isotopiques sont recommandés comme un moyen efficace d'évaluer l'absorption de minéraux et de vitamines et celle d'aliments enrichis. Les techniques de dilution d'isotopes (deutérium ou oxygène 18) peuvent être utilisées pour suivre les changements intervenant dans la composition corporelle dans les cas d'obésité, de malnutrition protéino-énergétique ou chez des sidéens ou des cancéreux. Elles utilisent soit du deutérium, soit de l'oxygène 18.

82. Des données précises sur les besoins énergétiques sont également reconnues comme très utiles pour les stratégies de gestion de la santé des populations. La méthode de l'eau doublement marquée au deutérium et à l'oxygène 18 est désormais la technique standard utilisée pour mesurer la dépense énergétique, à partir de laquelle on peut calculer les besoins énergétiques de populations dans différentes circonstances.

83. On accorde également une attention accrue à l'analyse de la composition corporelle, qui est importante pour la santé ou le développement d'une maladie. À cet égard, la technique de l'absorptiométrie à rayons X en double énergie (DEXA) est riche de promesses et, bien que développée au départ pour mesurer la densité minérale osseuse, elle est à présent considérée comme un outil fiable pour déterminer la répartition générale et locale de la masse grasseuse.

D.2. Médecine nucléaire

84. Les cliniciens s'appuient sur des études faisant appel à des radionucléides à courte période et à des techniques de médecine nucléaire pour examiner les processus métaboliques chez des patients. Le métabolisme est toujours perturbé par la maladie, et les changements surviennent généralement avant l'apparition de modifications anatomiques que l'on peut identifier par des techniques d'imagerie classiques. La détection précoce des changements métaboliques peut donc fournir une meilleure base en vue d'une intervention médicale ou chirurgicale. Les protocoles normalisés fondés sur ces études,

mis au point à l'intention de patients cardiaques ou cancéreux, sont de plus en plus couramment utilisés pour optimiser la prise en charge clinique et, à terme, les résultats du traitement. Cela est devenu possible grâce à la tomographie à émission de positons (PET), une des techniques de médecine nucléaire qui se développent le plus rapidement. La PET, qui devient une application clinique courante de la médecine nucléaire, fait appel à des radio-isotopes de période ultracourte attachés à des marqueurs biologiques. Elle permet en particulier d'étudier le métabolisme du glucose et des acides aminés dans les organes en utilisant du glucose radiomarqué, ou FDG (fluoro18deoxyglucose), ou de la choline C11. Les images fonctionnelles PET sont ensuite fusionnées avec des images réalisées par tomographie informatisée aux rayons X, faisant apparaître en détail les changements survenus chez le patient, ce qui peut permettre d'améliorer le traitement du cancer. Contrairement à la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT), technique d'imagerie *in vivo* la plus couramment utilisée en médecine nucléaire, il faudra du temps pour que la PET soit mise en œuvre dans les pays en développement en raison de son coût qui reste élevé.

85. De nombreuses procédures radio-isotopiques *in vivo* utilisées pour le génotypage, notamment moléculaire, peuvent être appliquées en biologie moléculaire clinique. Elles gagnent en importance pour l'étude de certaines affections cliniques et précliniques, qu'il s'agisse par exemple de déterminer les modifications des cellules cancéreuses ou la résistance aux antipaludiques et aux antituberculeux.

86. Outre le traitement bien établi de la thyrotoxicose et du cancer de la thyroïde, la principale nouveauté dans le domaine des applications thérapeutiques de la médecine nucléaire est l'utilisation d'anticorps monoclonaux et de peptides radiomarqués pour traiter des maladies telles que les lymphomes et les tumeurs neuro-endocriniennes. Ils fourniront des solutions thérapeutiques ciblées pouvant être appliquées à certains types de cancer avec nettement moins d'effets secondaires que la chimiothérapie classique. Un certain nombre de radiopharmaceutiques peuvent également être employés à des fins analgésiques dans le traitement palliatif du cancer à un stade avancé. Ils permettent d'améliorer, à moindre coût, la qualité de vie des patients atteints de métastases osseuses et de les dispenser d'un traitement quotidien à base d'opiacés et d'autres produits pharmaceutiques onéreux.

D.3. Radiothérapie

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

88. Depuis de nombreuses années, la pratique courante consiste à effectuer cinq séances de radiothérapie par semaine. Des études récentes ont montré qu'en administrant ce traitement plus de cinq fois par semaine (radiothérapie accélérée), on pouvait améliorer le contrôle des tumeurs dans certains types de cancers sans vraiment augmenter la toxicité. L'AIEA appuie également les activités de recherche dans ce domaine.

89. Grâce aux innovations technologiques, telles que la radiothérapie à intensité modulée, la protonthérapie et la radiothérapie aux particules lourdes, et à la tomothérapie qui permet le traitement conformationnel d'une tumeur et la visualisation des images en ligne pendant le traitement, il est possible d'augmenter la dose physique administrée au 'volume cible' sans augmenter celle administrée aux organes sains adjacents. Bien qu'actuellement élevé, le coût de ces traitements peut être réduit si l'on améliore la répartition de la dose physique en réduisant le nombre de séances (hypofractionnement) par rapport à la radiothérapie traditionnelle.

D.4. Dosimétrie et radiophysique médicale

90. L'assurance de la qualité en médecine radiologique contribue à assurer son application sûre et efficace. L'introduction de nouvelles techniques de traitement complexes entraîne une demande accrue de mesures précises des doses. Alors même que la complexité du traitement augmente, la nécessité d'un étalonnage précis du faisceau reste fondamentale. La tendance mondiale dans le domaine de la dosimétrie en radiothérapie est d'appliquer des codes de pratique basés sur l'étalonnage en termes de dose absorbée dans l'eau, tels que le code pratique international de l'AIEA intitulé *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy* (n° 398 de la collection Rapports techniques de l'AIEA). Bien que la dosimétrie en radiologie diagnostique n'ait pas encore atteint le même degré de normalisation qu'en radiothérapie, elle demeure importante pour garantir la sûreté des patients. L'AIEA et la Commission internationale des unités et des mesures radiologiques sont en train d'élaborer un code de pratique international dans ce domaine.

91. L'utilisation des données concernant les patients dans le cadre de la planification individualisée des traitements en médecine nucléaire thérapeutique revêt une importance croissante, notamment en pédiatrie. Une planification précise des traitements requiert une approche normalisée pour mesurer les paramètres physiques et biologiques nécessaires du patient et appliquer ces données aux modèles appropriés. L'AIEA travaille à l'élaboration de codes de pratique portant sur les aspects liés à l'imagerie et à la mesure de la radioactivité de ce processus.

92. L'un des nouveaux défis en radiophysique médicale est né du passage de la radiothérapie conformationnelle en 3D à la radiothérapie guidée par l'imagerie, qui permet de déterminer et de maintenir la précision du faisceau en suivant les changements au niveau de la position de la tumeur et de l'anatomie du patient. La radiothérapie guidée par l'imagerie vise à améliorer les résultats cliniques en appliquant des doses plus élevées à la tumeur avec des marges de traitement réduites, de manière à protéger les organes vulnérables et les tissus normaux. Elle tient compte des modifications de l'anatomie, du mouvement des organes et des changements de taille et de position de la tumeur lors de la préparation du plan de traitement, et suit ces changements tout au long du traitement. En outre, elle bénéficie des progrès récents de l'imagerie pour la radiothérapie, dont notamment la fusion des images RM-TI (résonance magnétique-tomographie informatisée) ou la superposition des images obtenues par PET et TI, ainsi que la TI en 4D et la TI à faisceau conique, que l'on trouve à présent dans les salles de traitement modernes. Pour contrôler l'administration du traitement, on se sert d'images multiples obtenues à l'aide de systèmes d'imagerie portale électronique (EPID), qui permettent de vérifier la position du patient et les doses administrées.

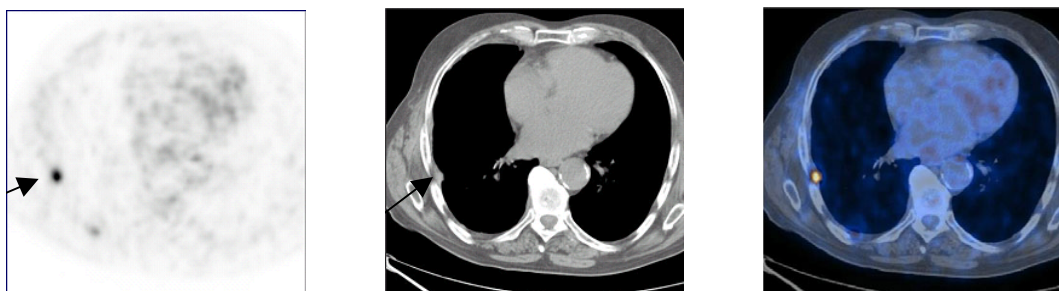


Figure D-1. Imagerie multimodale (fusion des images) : Amélioration du diagnostic du cancer (détermination du stade) grâce à la fusion des images obtenues par PET (à gauche) et par TI (au centre). La photo de droite montre l'image fusionnée, qui permet de situer précisément la tumeur à peine visible sur l'image de TI seule (reproduction autorisée par le docteur S. Fanti de l'Université de Bologne, Italie).

93. Les audits en radiothérapie sont un moyen important de garantir la qualité du processus à la fois pour les techniques classiques et nouvelles. On a actuellement tendance à étendre les audits portant sur des aspects de la physique à des examens complets réalisés par des équipes multidisciplinaires. Parallèlement, de nouvelles méthodes d'audit de la dosimétrie en radiothérapie sont mises au point pour tenir compte des progrès technologiques récents dans ce domaine.

E. Ressources en eau

94. La gestion des ressources en eau reste une question de première importance au plan international. L'ONU a proclamé la période 2005-2015 Décennie internationale d'action, 'L'eau, source de vie', reconnaissant ainsi le lien fondamental entre l'eau et le développement. L'utilisation des eaux souterraines pour satisfaire la demande croissante d'eau est une tendance de plus en plus marquée, principalement à cause de la disponibilité limitée des eaux de surface. Les activités visant à gérer la durabilité des eaux souterraines font de plus en plus appel aux techniques isotopiques, en particulier pour comprendre certains aspects du cycle hydrologique, tels que l'origine des sources d'eau, les taux de recharge et les écoulements d'eau, car ces informations sont nécessaires à une gestion rationnelle des ressources.

95. Compte tenu de l'utilisation croissante des eaux souterraines pour satisfaire à une demande en expansion, des organisations internationales, dont l'AIEA, sont en train d'élaborer une 'vision mondiale des eaux souterraines' qui sera présentée au 4^e Sommet mondial de l'eau organisé au Mexique en 2006. Cette vision servira de document directeur pour la gestion efficace des eaux souterraines et comprendra des orientations sur la manière appropriée de faire appel à cette fin à la science et à la technologie, par exemple à l'hydrologie isotopique.

96. La gestion des aquifères transfrontières attire de plus en plus l'attention. Un récent inventaire mondial des réserves d'eau douce a permis d'identifier plus de 400 de ces aquifères 'partagés'. Le Fonds pour l'environnement mondial, la Banque mondiale, le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), l'AIEA et d'autres organisations, reconnaissant que la mise en commun des ressources en eau pourrait susciter des conflits, ont commencé à appuyer des projets visant à faciliter une gestion conjointe efficace. Les outils isotopiques utilisés pour déterminer les risques et sources de pollution, ainsi que les mouvements et l'âge de l'eau sont de plus en plus reconnus comme étant essentiels à la gestion des eaux souterraines transfrontières et à l'élaboration de méthodes de gestion durable des ressources en eaux souterraines.

F. Environnements marin et terrestre

F.1. Environnement marin

F.1.1. Radiotraçage de contaminants dans les poissons et fruits de mer

97. Les techniques nucléaires faisant appel aux radiotraceurs utilisées pour évaluer et surveiller la présence de contaminants terrestres dans les pêcheries côtières gagnent en importance, ce qui se répercute sur les domaines de la santé et du commerce. Par exemple, les dosages récepteur-ligand nucléaires, qui permettent de déterminer plus efficacement les niveaux de toxines paralysantes contenues dans les mollusques et crustacés exposés aux proliférations d'algues toxiques, aident à gérer le problème de la toxicité des fruits de mer, qui va croissant dans le monde. Les concentrations de certaines toxines dans les mollusques et crustacés seront probablement réduites à des niveaux acceptables grâce à l'utilisation de dosages plus sensibles, comme ceux-là.

98. Les techniques de radiotraçage sont également précieuses pour lutter contre le problème des métaux contaminants d'origine terrestre dans les zones côtières. On arrive à comprendre les voies d'exposition aux métaux dérivant d'activités minières de certaines espèces marines et les effets de ces derniers en faisant appel à des radiotraceurs tels que le nickel 63, le cobalt 57, le manganèse 54, le cadmium 109, le zinc 65 et l'argent 110m. On évalue aussi actuellement l'efficacité de ces derniers pour le suivi de la pollution dans l'industrie de la pêche. De même, dans l'installation expérimentale de radio-écologie du Laboratoire de l'environnement marin à Monaco, on a évalué des contaminants à l'arsenic à l'aide du radiotraceur arsenic 73 pour déterminer leur capacité d'accumulation dans les pêcheries locales. À l'avenir, on compte notamment appliquer des techniques d'imagerie nucléaire aux organismes marins, et utiliser des données sur les contaminants recueillies en laboratoire et sur le terrain pour évaluer l'impact de ces derniers sur le secteur de la pêche et les consommateurs.

F.1.2. Traçage isotopique du phénomène d'oscillation australe El Niño (ENSO)

99. L'impact de l'ENSO sur l'environnement marin et le climat terrestre est considéré comme un phénomène environnemental d'importance majeure affectant le climat de la région du Pacifique et de la planète entière et ayant des incidences notables sur les populations de poissons et les précipitations, notamment la formation de cyclones. De nouvelles études isotopiques de ce phénomène ont montré que pendant un événement El Niño, la température augmente à la surface de l'océan, ce qui accroît les pertes par évaporation et le fractionnement isotopique, et modifie la teneur en hydrogène 2, carbone 13, carbone 14 et oxygène 18 de l'eau de mer. Les coraux enregistrent les variations isotopiques des océans, et leurs bandes de croissance annuelles peuvent donc permettre de retracer les

températures océaniques passées dès lors qu'une chronologie absolue de leur croissance est établie, ce qui peut être accompli par une datation indépendante des bandes coralliennes à l'aide de méthodes isotopiques (thorium/uranium).

100. Grâce aux coraux datés, les océanographes et les climatologues établissent maintenant des chronologies, qui remontent à plusieurs centaines d'années, pour les coraux et les sédiments. Une fois achevés, ces travaux permettront de reconstituer, pour divers endroits, les températures océaniques de surface ainsi que la fréquence et l'intensité des phénomènes El Niño passés, favorisant ainsi la prédiction des couplages océan-climat à venir.

F.1.3. Utilisation de radionucléides naturels pour retracer les puits à carbone dans l'océan

101. Près de 50 % du CO₂ atmosphérique dérivé des combustibles fossiles est assimilé par l'océan par dissolution physico-chimique du gaz carbonique, puis par absorption biologique et sédimentation de la nécromasse. Pendant de nombreuses années, la localisation de ces transferts de carbone particulière par migration verticale vers le fond des océans a constitué un défi pour les océanographes jusqu'à ce que l'on découvre récemment que le thorium 234 (produit par l'isotope naturel ²³⁸U dans l'eau de mer) est séquestré à la surface de particules en cours de sédimentation. Sa période de 24 jours constitue une excellente 'horloge' permettant de retracer le sort de ces particules dans l'océan et de déterminer leur âge. Grâce au thorium 234, les océanographes ont relevé d'une mer à l'autre des variations de l'ordre du centuple dans les puits océaniques de carbone, lesquelles sont fortement liées à la croissance et à l'abondance du phytoplancton. Cette pompe 'biologique' à carbone dans l'océan est maintenant reconnue comme étant fondamentale à la régulation de la limite d'absorption par les océans du CO₂ et des autres gaz à effet de serre qui s'accumulent dans l'atmosphère.

F.2. Environnement terrestre

F.2.1. Études radio-écologiques

102. Les études radio-écologiques ont en grande partie commencé avec l'analyse des retombées des essais d'armes nucléaires et des effets des rejets de réacteurs et d'installations de retraitement, ou d'accidents. Ces dernières années, les États Membres ont manifesté un intérêt grandissant envers diverses autres sources d'impact radiologique, telles que les résidus d'uranium appauvri provenant d'opérations militaires, les activités d'extraction et de traitement, et les matières radioactives naturelles. Par ailleurs, l'utilisation de techniques nucléaires et l'application de modèles et de paramètres dérivés dans des analyses écotoxicologiques de polluants autres que les radionucléides, ainsi que l'évaluation des effets synergiques de mélanges de polluants font de plus en plus l'objet d'études à l'échelle mondiale.

103. Dans tous les cas qui précèdent, les gestionnaires et les responsables de la réglementation ont besoin d'informations pour fonder leurs décisions. La fourniture de données de base est importante, mais insuffisante pour répondre à leurs besoins. L'utilisation de modèles prédictifs est un outil supplémentaire, et l'AIEA travaille depuis longtemps à l'élaboration de modèles tant génériques que spécifiques, ainsi qu'à l'évaluation de valeurs de paramètres modèles qu'elle présente sous forme de tableaux.

104. De récentes avancées dans la mise au point d'outils de télédétection, en particulier l'amélioration des résolutions spatiales et spectrales, offrent de nouvelles perspectives. À titre d'exemple, on peut citer les levés gamma aériens. Auparavant, ces derniers étaient utilisés pour la prospection minière, mais de récentes améliorations de la résolution spatiale ont permis d'élargir leur application à la gestion de l'environnement et d'autres ressources. Par ailleurs, les systèmes d'information géographique (SIG) permettent de stocker, de traiter et d'afficher des données géographiques de divers types d'une manière utile aux utilisateurs finals.

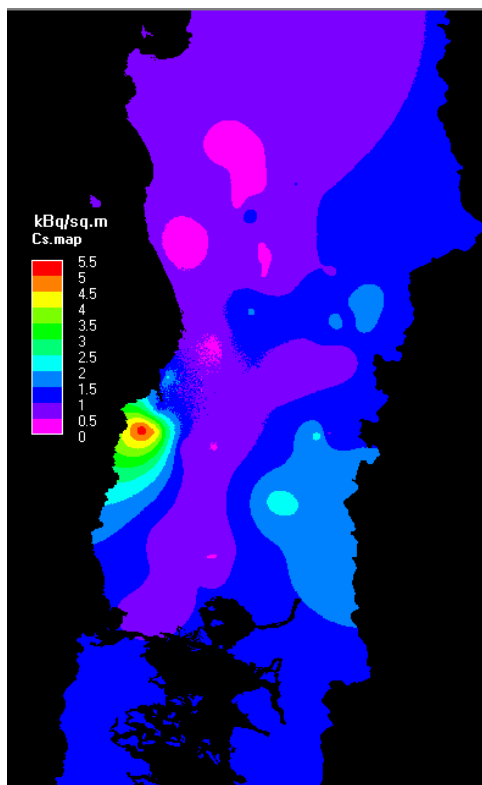


Figure F-1. Exemple d'utilisation d'un SIG dans le cadre d'un système d'aide à la prise de décisions concernant l'environnement : carte de la répartition des dépôts de ^{137}Cs au Chili, établie à l'aide de courbes de niveau et de données sur les précipitations et les mesures au sol de ^{137}Cs ¹¹.

G. Utilisation des réacteurs de recherche

105. Les réacteurs de recherche continuent de retenir l'attention car ils demandent une utilisation durable et posent des questions de sûreté et de sécurité. Il ressort du forum scientifique tenu pendant la session de 2004 de la Conférence générale que si les réacteurs de recherche sont appelés à jouer un rôle crucial en science et technologie nucléaires, il importe d'assurer leur capacité opérationnelle en termes de ressources techniques et financières, tout en répondant aux normes en vigueur de sûreté des techniques nucléaires et non nucléaires, et à d'autres aspects liés à la sécurité physique, à l'acceptation par le public et à la responsabilité en matière d'environnement. Les questions techniques qu'il importe

¹¹ (Réf.) SCHULLER P. et VOIGT G. (Eds), Development of an Environmental Decision Support System (EDSS) to Identify Radioecological Sensitive Areas for Radiocaesium in Chile (CHIRSA), Final Report to Volkswagen Foundation, Neuherberg (2004).

de résoudre sont notamment la capacité de gestion et d'entreposage sûrs du combustible usé, la remise en état éventuelle du réacteur et la décontamination et le déclasséement éventuels de l'installation.

106. Le remplacement des cibles d'uranium hautement enrichi par des cibles d'uranium faiblement enrichi pour la production à grande échelle de molybdène 99 est à l'étude afin de recenser les domaines nécessitant un soutien et une coopération internationale.

107. Un grand nombre d'autres radio-isotopes (plus de 150 sous différentes formes) sont toujours largement utilisés en médecine et dans l'industrie. Des radionucléides se prêtant aux applications radiothérapeutiques et pouvant facilement être produits dans des réacteurs de recherche, tels que ^{177}Lu , sont en train d'être évalués de manière approfondie pour la mise au point de radiopharmaceutiques.

108. Les faisceaux de neutrons des réacteurs de recherche sont utilisés comme sondes puissantes pour diverses applications faisant appel à la diffusion de neutrons et aux techniques de radiographie. L'avantage particulier des neutrons est qu'ils sont sensibles à des éléments légers (contrairement aux rayons X qui sont sensibles à des éléments plus lourds). Par conséquent, on obtient une meilleure résolution par la neutronographie pour les matériaux expérimentaux d'importance industrielle, par exemple pour l'étude d'éléments combustibles. Les progrès réalisés à l'aide de la diffusion des neutrons dans le domaine de la caractérisation des matériaux et de la science des matériaux font également avancer la mise au point de nouveaux matériaux. Les possibilités de nouvelles applications et d'adaptation de ces techniques, qui sont déjà utilisées dans certains pays, suscitent de plus en plus d'intérêt.

H. Utilisation d'accélérateurs

109. La mise au point ces dix dernières années d'accélérateurs résistants a permis à de nombreux laboratoires de moderniser leurs installations en les équipant de systèmes hautement fiables de faible maintenance pour permettre à des non-spécialistes d'en assurer une exploitation sûre. L'utilisation d'accélérateurs plus petits et compacts pour la recherche et la technologie appliquées plutôt que pour la recherche fondamentale se répand de plus en plus. Les progrès techniques récents rendent désormais possible l'exploitation de petits accélérateurs en dehors des laboratoires de recherche pour des applications *in situ*.

110. De nouvelles installations d'accélérateurs à sources de neutrons de spallation, actuellement en construction au Japon et aux États-Unis d'Amérique, seront les premières installations à exploiter des neutrons en science et technologie. Ce sont des modèles de sources de neutrons alimentées par des accélérateurs de particules de haute énergie (plus de 1 GeV). Leurs avantages sur les sources de réacteurs traditionnelles viennent en partie de l'utilisation d'un régime pulsé qui est plus efficace et ne peut pas être obtenu à partir de sources traditionnelles. En outre, le régime pulsé peut être associé à une instrumentation appropriée pour utiliser des neutrons avec une efficacité qui peut être jusqu'à trois fois supérieure.

111. Les possibilités d'application des techniques nucléaires basées sur les accélérateurs pour appuyer des études sur les matériaux ou sur l'environnement et mettre au point de nouveaux matériaux sont prometteuses. L'analyse par faisceaux d'ions et la spectrométrie de masse par accélérateur suscitent également un très vif intérêt, par exemple pour la datation au carbone 14, la recherche sur les médicaments et le contrôle radiologique de l'environnement.

I. Suivi des processus industriels

112. On utilise l'imagerie par tomodensitométrie pour diagnostiquer les processus industriels multiphasés. La technologie des réacteurs à phases multiples est à la base du raffinage pétrolier, de la conversion du gaz de synthèse en combustibles et produits chimiques, de la production de produits chimiques commerciaux, de la fabrication de produits chimiques et polymères spéciaux et de la conversion de produits indésirables en matériaux recyclables. En ingénierie des procédés, on utilise la tomographie à la fois à transmission et à émission gamma pour l'inspection des colonnes à garnissage, des colonnes à bulles, des écoulements multiphasés, des lits fluidisés et des matières poreuses. La technologie continue d'évoluer et devrait permettre à l'avenir d'améliorer sensiblement l'efficacité et la sûreté des industries des procédés à phases multiples. En adaptant les progrès à l'imagerie médicale, la méthode SPECT est actuellement introduite à l'échelle du laboratoire pour les processus industriels. L'imagerie à deux dimensions avec une gamma-caméra est aussi une technique attractive en cours d'élaboration. Les techniques de traçage de particules isolées progressent, notamment pour les études sur les réacteurs à lits fluidisés.

I.1. Radiotraitement – Nanotechnologie

113. La nanotechnologie est un des domaines de la science et de l'ingénierie qui évolue le plus rapidement et qui présente un intérêt économique considérable. Pour pouvoir utiliser pleinement cette technologie, il faut absolument avoir la capacité et la précision pour fabriquer des structures de précision à des dimensions nanométriques. À cet égard, les rayonnements sont un outil efficace, par exemple pour la modification et le traitement des surfaces. De nouvelles tendances dans le traitement de précision ont vu le jour, par exemple pour les membranes ioniques et les médicaments à libération contrôlée. Les radiotechnologies utilisant les rayons X, les faisceaux d'électrons et les faisceaux d'ions sont au cœur de différentes approches de la nanoconfiguration (création de pores de taille nanométrique) et la lithographie par faisceaux d'électrons retient de plus en plus l'attention. On étudie actuellement la radiosynthèse des nanoparticules métalliques (par exemple le cuivre et l'argent) et des zéolites pour l'appliquer aux cellules photoluminescentes, photoélectriques et solaires. La solution de sels métalliques est exposée aux rayons gamma et les espèces réactives produites par les rayonnements réduisent l'ion métallique à l'état de valence nulle. Des semi-conducteurs de sulfure métallique de taille nanométrique sont préparés par irradiation gamma d'une source de monomères, sulfure et métal en solution.