

# Conférence générale

**GC(48)/INF/4**

Date : 20 juillet 2004

**Distribution générale**

Français

Original : Anglais

## Quarante-huitième session ordinaire

Point 16 de l'ordre du jour provisoire  
(GC(48)/1)

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – 2004

*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, qui est le troisième rapport exhaustif, fait le point sur la situation dans le monde des technologies nucléaires utilisées pour des applications aussi bien énergétiques que non énergétiques.
- Le présent rapport passe en revue les domaines suivants : bases du développement nucléaire ; applications énergétiques ; applications dans les secteurs de l'alimentation, de l'eau et de la santé, et applications intéressant l'environnement et les processus industriels durables et enfin aspects socio-économiques de l'énergie et des applications nucléaires. On trouvera sur le site GOVATOM, mais en anglais uniquement, des informations complémentaires sur les réacteurs de recherche, la situation actuelle et les 50 premières années de l'électronucléaire, les technologies avancées et innovantes des réacteurs de puissance, le diagnostic moléculaire, les technologies des radio-isotopes et des rayonnements, le dessalement nucléaire et enfin les aspects socio-économiques des applications nucléaires.
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations faites par le Conseil et d'autres observations communiquées par les États Membres.

## Table des matières

A.	Bases du développement nucléaire.....	1
	A.1. Données nucléaires, atomiques et moléculaires.....	1
	A.2. Réacteurs de recherche, accélérateurs et radio-isotopes.....	1
B.	Applications énergétiques .....	2
	B.1. L'électronucléaire aujourd'hui.....	2
	B.2. L'avenir.....	7
	B.2.1. Projections à moyen terme.....	7
	B.2.2. Développement durable et changements climatiques.....	7
	B.2.3. Fission et fusion avancées.....	9
C.	Applications dans les secteurs de l'alimentation, de l'eau et de la santé .....	10
	C.1. Techniques nucléaires pour l'amélioration des cultures.....	10
	C.2. Techniques nucléaires pour la protection des cultures.....	11
	C.3. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail.....	12
	C.4. Sécurité sanitaire des aliments.....	13
	C.5. Vers une gestion durable des terres et de l'eau.....	13
	C.6. Ressources en eau.....	14
	C.7. Santé humaine.....	15
	C.7.1. Nutrition.....	15
	C.7.2. Médecine nucléaire.....	15
D.	Applications intéressant l'environnement et les processus industriels durables .....	16
	D.1. Protection des environnements marin et terrestre.....	16
	D.1.1. Environnement marin.....	16
	D.1.2. Environnement terrestre.....	17
	D.2. Utilisation de la technologie des rayonnements pour promouvoir des industries propres et sûres.....	18
	D.2.1. Techniques nucléaires d'analyse.....	19
	D.2.2. Dessalement nucléaire.....	19
E.	Aspects socio-économiques de l'énergie et des applications nucléaires.....	20

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire – 2004

*Rapport du Directeur général*

## **A. Bases du développement nucléaire**

### **A.1. Données nucléaires, atomiques et moléculaires**

1. Un accès facile à des données atomiques, moléculaires et nucléaires de grande qualité est indispensable pour assurer la viabilité et la crédibilité d'un vaste éventail de technologies nucléaires. L'Agence a un rôle décisif à jouer en créant et en mettant à jour des bases de données détaillées pour rassembler la documentation bibliographique ainsi que des données théoriques et expérimentales, et en enregistrant des données nucléaires et atomiques évaluées. Des liens continuent d'être tissés et entretenus à l'échelle internationale pour répondre aux besoins de divers programmes et assurer leur intégrité ; ainsi, le sous-comité des données atomiques et moléculaires du Conseil international de la recherche sur la fusion donne des avis et fait des recommandations sur les données atomiques et moléculaires, et le Comité international des données nucléaires en fait autant pour ces dernières.

2. La ou les directions dans lesquelles vont se développer les futures données continuent d'être déterminées par la demande de nouvelles technologies nucléaires, et notamment par les besoins en données dans les domaines suivants : cycles du combustible innovants, systèmes alimentés par accélérateur, transmutation des déchets nucléaires, dispositifs à fusion, radiothérapie et radiodiagnostic, optimisation de la production d'isotopes à usage médical, essais non destructifs de matériaux, techniques de radio-analyse ( par exemple analyse par activation neutronique et analyse par faisceaux d'ions), prospection de minerais et détection de mines terrestres.

3. Comme exemples de projets récents de développement de données ayant diverses applications, on peut citer : un moteur de recherche des données atomiques et moléculaires permettant de rechercher simultanément des données dans plusieurs sources différentes pour des bases de données numériques et bibliographiques destinées à aider les concepteurs, un système en ligne de calcul théorique de ce type de données, permettant à l'utilisateur de générer de nouvelles données à partir de modèles théoriques en utilisant les programmes idoines sur le site des établissements qui en assurent la maintenance ; une bibliothèque de données sur la puissance de rayonnement et l'équilibre d'ionisation de plasmas présentant un intérêt pour la recherche sur la fusion et une autre sur les sections efficaces de réaction qui réduira les incertitudes des mesures relatives, contribuant ainsi de manière décisive à l'amélioration prévue des nouvelles bibliothèques consacrées aux ions.

### **A.2. Réacteurs de recherche, accélérateurs et radio-isotopes**

4. Depuis plus de 50 ans, les réacteurs de recherche apportent une contribution précieuse au développement de l'électronucléaire, aux sciences fondamentales, à la mise au point de matériaux, à la production de radio-isotopes pour la médecine et l'industrie et à la formation théorique et pratique. Ils restent des instruments expérimentaux indispensables. En juin 2004, 673 réacteurs de recherche étaient enregistrés dans la base de données sur les réacteurs de recherche (RRDB) de l'AIEA, dont 274 en service dans 56 pays (85 dans 39 pays en développement), 214 à l'arrêt, 168 déclassés et 16 à l'étude ou en construction.

5. Dans nombre de ceux qui sont à l'arrêt sans être déclassés, du combustible, neuf et usé, est toujours entreposé sur le site. Un déclassement excessivement tardif après la mise à l'arrêt définitif aura des répercussions aussi bien sur les coûts que sur la sûreté des opérations, essentiellement en raison de la perte du personnel expérimenté (déjà d'âge mûr au moment de la mise à l'arrêt) qui est nécessaire à l'exécution de ces activités<sup>1</sup>.

6. La sous-utilisation des réacteurs de recherche est un problème dans beaucoup d'États Membres. Toutefois, de nombreux réacteurs de recherche en service sont très utilisés, au niveau tant national qu'international, pour la production de radio-isotopes, la recherche sur lignes de faisceaux, les applications industrielles, l'irradiation neutronique et les applications spécialisées. En outre, des réacteurs polyvalents et monovalents sont en construction.

7. L'utilisation de combustible à l'uranium hautement enrichi (UHE) est considérée comme présentant un risque de prolifération. À ce jour, 31 réacteurs de recherche ont été entièrement convertis pour l'utilisation d'uranium faiblement enrichi (UFE). Sept autres l'ont été partiellement, tandis que d'autres doivent l'être. L'absence d'un combustible à haute densité pouvant convenir pour la conversion de certains réacteurs de recherche est un important problème. Les difficultés liées à l'utilisation d'UFE à la place d'UHE en tant que cible pour la production d'isotopes à des fins médicales font l'objet d'un examen détaillé.

8. Les accélérateurs de particules chargées sont des outils puissants utilisés pour une multitude d'applications, telles que l'analyse d'échantillons physiques, chimiques et biologiques à l'aide de sondes, la modification par faisceaux d'ions de surfaces et de matériaux pour en renforcer les propriétés recherchées, la production de radio-isotopes, le radiotraitement de matériaux, la radiothérapie du cancer. La demande de rayonnement synchrotron et de faisceaux de neutrons pulsés de haute qualité pour les sources de spallation utilisées pour la recherche sur les matériaux augmente.

9. Un grand nombre de radio-isotopes (plus de 150 sous différentes formes), essentiellement produits en réacteur, sont largement utilisés. Des radionucléides se prêtant à la radiothérapie et pouvant facilement être produits dans des réacteurs de recherche, tels que <sup>177</sup>Lu, sont soumis à des évaluations approfondies en vue de la mise au point de radiopharmaceutiques. Par ailleurs, de petites sources scellées de <sup>125</sup>I and <sup>103</sup>Pd font l'objet de recherches pour le traitement des tumeurs oculaires et de la prostate. Les traceurs pour la tomographie à émission de positons (TEP) produits dans des cyclotrons à usage médical, en particulier le F-18 fluorodéoxyglucose (FDG), ont un impact de plus en plus grand, essentiellement en oncologie.

## **B. Applications énergétiques**

### **B.1. L'électronucléaire aujourd'hui<sup>2</sup>**

10. « L'énergie produite par la désintégration de l'atome est vraiment faible. Ceux qui pensent tirer de l'énergie des transformations de l'atome disent des sornettes », déclarait Lord Rutherford en 1933.

11. « Il n'est pas exagéré de dire que nos enfants pourront avoir chez eux de l'énergie électrique [d'origine nucléaire] pour trois fois rien », disait pour sa part en 1954 Lewis Strauss, président de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis.

12. Cinquante après, nous savons que la vérité se situe quelque part entre les extrêmes<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review – 2004*'.

<sup>2</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review – 2004*'.

**Tableau B-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction  
dans le monde (au 31 décembre 2003)**

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2003		Expérience d'exploitation totale en décembre 2003	
	Nbre tranches	Total Mwe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			12,66	6,05	38	3
ALLEMAGNE	18	20 643			157,44	28,10	648	0
ARGENTINE	2	935	1	692	7,03	8,59	50	7
ARMÉNIE	1	376			1,82	35,48	36	3
BELGIQUE	7	5 760			44,61	55,46	191	7
BRÉSIL	2	1 901			13,34	3,65	25	3
BULGARIE	4	2 722			16,04	37,71	129	2
CANADA	16	11 323			70,29	12,53	486	11
CHINE	8	5 977	3	2 610	41,59	2,18	39	1
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	19	15 850	1	960	123,28	40,01	220	8
ESPAGNE	9	7 584			59,36	23,64	219	2
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	98 298			763,74	19,86	2 871	8
FÉDÉRATION DE RUSSIE	30	20 793	3	2 825	138,39	16,54	761	4
FINLANDE	4	2 656			21,82	27,32	99	4
FRANCE	59	63 363			420,70	77,68	1 346	2
HONGRIE	4	1 755			11,01	32,69	74	2
INDE	14	2 550	8	3 622	16,37	3,30	223	5
IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'			2	2 111			0	0
JAPON	53	44 139	3	3 696	230,80	25,01	1 123	7
LITUANIE	2	2 370			14,30	79,89	36	6
MEXIQUE	2	1 310			10,51	5,23	23	11
PAKISTAN	2	425			1,81	2,37	35	10
PAYS-BAS	1	449			3,80	4,48	59	0
RÉP. POP. DÉM. DE CORÉE			1	1 040			0	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 548			25,87	31,09	74	10
ROUMANIE	1	655	1	655	4,54	9,33	7	6
ROYAUME-UNI	27	12 052			85,31	23,70	1 329	8
SLOVAQUIE	6	2 442	2	776	17,86	57,35	100	6
SLOVÉNIE	1	656			4,96	40,45	22	3
SUÈDE	11	9 451			65,50	49,62	311	1
SUISSE	5	3 220			25,93	39,73	143	10
UKRAINE	13	11 207	4	3 800	76,70	45,93	279	10
Total	439	361 094	31	25 387	2524,03		11 143	5

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

— 6 réacteurs (4 884 Mwe) en service ; 2 réacteurs (2 600 Mwe) en construction ;

— 37,37 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 21,5 % de la production électrique totale en 2003 ;

Expérience d'exploitation : 134 ans et un mois.

<sup>3</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous 'Nuclear Technology Review – 2004'.

13. En 2002, l'électronucléaire a représenté 16 % de la production mondiale d'électricité, et au 31 décembre 2003 il y avait 439 centrales nucléaires en service dans le monde (voir tableau B-1). Leur facteur de disponibilité énergétique a augmenté régulièrement, passant de 74,2 % en 1991 à environ 84 % en 2003. En 2003, deux nouvelles centrales nucléaires ont été couplées au réseau, un réacteur à eau lourde sous pression (RELAP) de 665 MWe en Chine et un réacteur à eau sous pression (REP) de 960 MWe en République de Corée. En outre, le Canada a redémarré deux tranches qui avaient été mises à l'arrêt. Les travaux de construction d'une nouvelle centrale ont commencé en Inde. Quatre tranches de 50 MWe au Royaume-Uni, une de 640 MWe en Allemagne et une de 148 MWe au Japon ont été retirées du service.

14. C'est surtout en Asie que l'électronucléaire se développe actuellement et qu'il a des perspectives de croissance. Dix-huit des 31 réacteurs en construction<sup>4</sup> à la fin de 2003 sont situés en Chine, en Inde, au Japon, en République de Corée et en République populaire démocratique de Corée. Vingt et un des 30 derniers réacteurs couplés au réseau se trouvent en Extrême-Orient et en Asie du Sud.

15. En Europe occidentale, la puissance installée devrait rester relativement constante en dépit de l'abandon progressif du nucléaire en Belgique (qui a adopté une loi à cet effet en janvier 2003), en Allemagne et en Suède. C'est en Finlande que la planification d'une nouvelle capacité électronucléaire est la plus avancée. En 2003, la compagnie d'électricité Teollisuuden Voima Oy a choisi le site d'Olkiluoto pour y construire un cinquième réacteur et a signé avec un consortium Framatome ANP – Siemens un contrat pour la construction d'un réacteur à eau sous pression européen de 1 600 MWe. La demande d'autorisation de construction du réacteur a été soumise au gouvernement finlandais en janvier 2003.

16. En Fédération de Russie, ROSENERGOATOM a poursuivi son programme de prolongation des licences de 11 centrales. En 2003, l'organisme de réglementation nucléaire russe, Gosatomnadzor, a accordé une prolongation de cinq ans à la tranche Kola-1. L'organisme de réglementation bulgare a renouvelé pour dix ans la licence d'exploitation de Kozloduy-4, première licence de longue durée en Bulgarie, et a ensuite accordé une prolongation similaire de huit ans pour Kozloduy-3. La Roumanie, où les licences doivent être renouvelées tous les deux ans, a approuvé une prolongation de la licence de la centrale de Cernavoda jusqu'en 2005.

17. En 2003, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis a approuvé neuf demandes de prolongation de licences de 20 ans chacune (pour une durée totale de vie autorisée de 60 ans pour chaque réacteur), ce qui porte à 19 le nombre total de demandes de prolongation approuvées à la fin de l'année. Elle a aussi approuvé huit augmentations de la puissance nominale totalisant 401 MWth. Trois sociétés ont demandé à la NRC des autorisations préliminaires de site qui peuvent être conservées pour une utilisation ultérieure. Au Canada, une expansion à court terme de l'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. Les deux premiers redémarrages (Pickering A-4 et Bruce A-4) ont eu lieu en 2003. Parallèlement, des licences ont été prolongées jusqu'en 2005 pour quatre tranches et jusqu'en 2008 pour huit autres.

18. Les principaux éléments se répercutant sur l'expansion du nucléaire à court terme sont les aspects économiques, la sûreté et la sécurité, les déchets et les caractéristiques anti-prolifération.

19. **Aspects économiques** : La structure des coûts des centrales, qui sont groupés en début de période, implique que celles qui sont amorties et bien exploitées peuvent être très rentables, alors que les nouvelles centrales sont souvent plus chères que d'autres options. Cependant leur attractivité

---

<sup>4</sup> Y compris à Taiwan (Chine).

économique est différente selon les pays, les investisseurs et les marchés. La construction de nouvelles centrales nucléaires est plus intéressante lorsque la demande énergétique croît rapidement, les autres ressources sont rares, la sécurité de l'approvisionnement énergétique est une priorité ou que l'électronucléaire est important pour réduire la pollution atmosphérique et les émissions de gaz à effet de serre. Les centrales nucléaires sont aussi plus intéressantes pour les investisseurs du secteur public responsables de la sécurité énergétique, des émissions de gaz à effet de serre et du développement à long terme que pour ceux du secteur privé qui veulent des bénéfices rapides et ne retirent aucun avantage financier du fait que l'électronucléaire émet peu de tels gaz ou contribue à la sécurité énergétique. C'est pourquoi à l'Ouest, dans des marchés déréglementés à croissance faible, les nouvelles centrales sont en général moins prisées. Anticipant l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto, l'Europe est en train de créer un marché des émissions de gaz à effet de serre, et les futurs investisseurs pourront alors retirer des avantages conséquents de la faible production de tels gaz par les centrales nucléaires. Les États-Unis étudient divers moyens d'ajuster les mesures incitatives à court terme concernant le marché pour favoriser l'expansion de l'électronucléaire conformément à leur politique énergétique nationale à long terme.

**20. Sûreté et sécurité :** Bien que l'ombre de l'accident de Tchernobyl plane toujours sur l'électronucléaire, le bilan de l'industrie de ce secteur en matière de sûreté s'est considérablement amélioré. 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. Toutefois, les enjeux sont toujours les mêmes : faire en sorte que les installations nucléaires du monde entier soient exploitées selon les niveaux de sûreté les plus élevés, améliorer 'la planification de la relève' dans l'industrie nucléaire, veiller à ce que les enseignements tirés dans un pays soient réellement communiqués dans leur intégralité à tous les autres et qu'ils soient intégrés dans les pratiques d'exploitation et de réglementation de toutes les installations nucléaires pertinentes. 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.

**21.** Les mesures destinées à lutter contre d'éventuelles menaces de terrorisme nucléaire et radiologique ont pris un caractère d'urgence. Dans le monde entier, les centrales nucléaires ont renforcé leurs forces de sécurité, ajouté des barrières et pris d'autres mesures de protection pour tenir compte des nouvelles perceptions des risques en matière de sécurité. L'Agence a considérablement étendu la portée et le nombre de ses activités relatives à la sécurité nucléaire. Pour déterminer et protéger les éléments vulnérables des installations nucléaires, il est important de comprendre comment les aspects relatifs à la sûreté et à la sécurité sont interdépendants. Il est de plus en plus souvent demandé à l'Agence de donner des orientations sur les moyens de concilier le besoin de transparence en matière de sûreté nucléaire et radiologique avec le besoin de confidentialité dans le cadre des mesures de sécurité. Une gestion du risque efficace consistera à trouver un équilibre qui permettra d'assurer la sécurité des informations sensibles et de continuer à répondre de manière transparente aux préoccupations en matière de sûreté, et de faire en sorte que les leçons tirées dans les domaines de la sûreté et de la sécurité soient mises en commun pour le bien de l'ensemble de la communauté nucléaire.

**22. Combustible usé et déchets :** Comme le montre la figure B-1, les stocks de combustible usé augmentent en raison d'un retraitement limité et de retards dans le stockage définitif. 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. Le gouvernement et le parlement finlandais ont pris une 'décision de principe' de construire un dépôt pour le stockage définitif du combustible usé près d'Olkiluoto. Des licences distinctes devront en outre être obtenues pour les

travaux de construction et les activités d'exploitation. La construction devrait commencer en 2011 et la mise en service intervenir en 2020. La Suède a commencé à effectuer des recherches géologiques approfondies sur deux sites potentiels. Ces dernières devraient durer entre cinq et six ans, et la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) espère être en mesure de proposer un site définitif vers 2007. Aux États-Unis, l'installation pilote de confinement des déchets a commencé, en 1999, à recevoir des déchets transuraniens d'origine militaire pour stockage définitif dans des formations salifères stratifiées. En 2002, le Président et le Congrès des États-Unis ont décidé d'autoriser le site de stockage définitif de Yucca Mountain, dont l'exploitation devrait commencer en 2010.

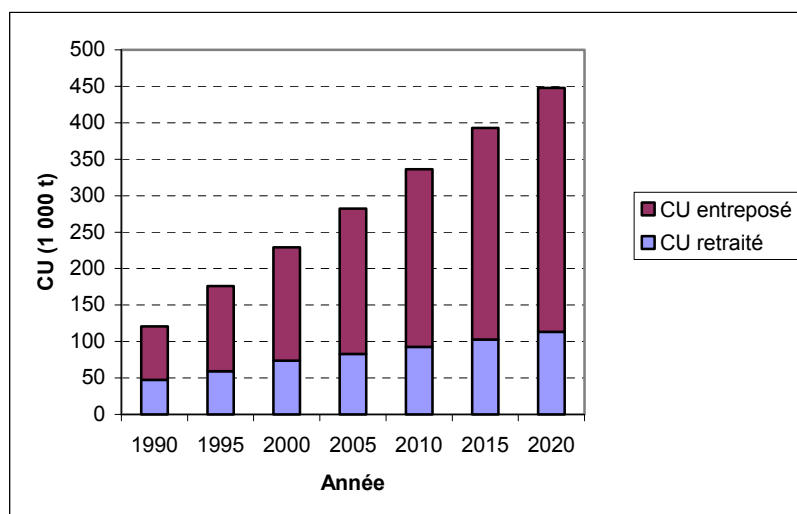


Figure B-1 : Retraitement et entreposage de combustible usé (CU) dans le monde entre 1990 et 2020.

23. Bien qu'à l'heure actuelle on continue de privilégier la création de dépôts nationaux, on envisage de nouveau la possibilité de construire des installations régionales ou internationales. Ceci s'explique d'une part par l'intérêt porté au renforcement du contrôle international des matières nucléaires dans le cadre des efforts visant à améliorer le régime mondial de non-prolifération, dont il est question ci-dessous, d'autre part par le fait que pour les pays n'ayant pas de sites appropriés pour stocker leurs déchets ou menant des programmes de recherche et électronucléaires de taille réduite, avoir leur propre site de stockage ne présente aucun intérêt économique.

24. **Caractéristiques anti-proliférantes** : Les caractéristiques anti-proliférantes d'un système nucléaire de production d'énergie sont celles qui empêchent le détournement ou la production non déclarée de matières nucléaires, ou encore l'utilisation abusive de technologie, en vue d'acquérir des armes nucléaires ou d'autres dispositifs explosifs nucléaires. Leur ampleur est le résultat d'une combinaison de paramètres de conception techniques, de modalités d'exploitation, d'arrangements institutionnels et de mesures de garanties, pour ne parler que de ceux-là. Tout récemment, notamment dans le cadre des travaux en cours sur des réacteurs et des cycles du combustible innovants, on accorde une attention accrue à la question des caractéristiques anti-proliférantes *intrinsèques*, c'est-à-dire qui découlent de la conception technique des systèmes nucléaires de production d'énergie, ainsi qu'aux mesures anti-prolifération *extrinsèques*, c'est-à-dire à celles qui résultent des décisions et des initiatives prises par les États à propos de ces systèmes. Les travaux en question prennent en compte dans tous les cas ces caractéristiques et mesures anti-prolifération qui visent à faire en sorte que les futurs systèmes nucléaires de production d'énergie continuent d'être inintéressants pour acquérir des matières destinées à un programme d'armement nucléaire.





pourrait alimenter l'électronucléaire pendant des millénaires si des techniques d'extraction avancées sont mises au point. À l'heure actuelle, on n'a extrait de l'eau de mer que de très petites quantités et le coût estimé varie entre le quintuple et le décuple du coût de l'uranium extrait selon les méthodes traditionnelles. Des efforts et des investissements considérables seraient nécessaires pour que ces ressources deviennent disponibles.

**Tableau B-3 : Disponibilité des ressources (en années)  
pour diverses technologies nucléaires<sup>5</sup>**

Réacteurs/Cycle du combustible	Nbre d'années de prod. d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2002 (ressources traditionnelles connues) (1)	Nbre d'années de prod. d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2002 (ressources traditionnelles totales) (2)	Nbre d'années de prod. d'électricité nucléaire mondiale – niveau de 2002 (ressources totales) (3)
Cycle du combustible actuel (REO, cycle ouvert)	85	270	8 200
Cycle du combustible avec recyclage (Pu uniquement, un recyclage)	100	300	9 200
Réacteurs à eau ordinaire et réacteurs à neutrons rapides combinés avec recyclage	130	410	12 000
Cycle du combustible dans réacteurs à neutrons rapides avec recyclage	2 500	8 500	240 000

(1) Les ressources traditionnelles connues comprennent toutes les catégories de coûts des ressources raisonnablement assurées (RRA) et les ressources supplémentaires estimées – catégorie I (RSE-I), soit un total de 4 588 700 tU<sup>6</sup>.

(2) Les ressources traditionnelles totales comprennent toutes les catégories de coûts des ressources raisonnablement assurées, les ressources supplémentaires estimées et les ressources hypothétiques, soit un total de 14 382 500 tU.

(3) Les ressources totales comprennent les ressources traditionnelles (14 382 500 tU) plus 90 % des ressources associées au phosphate (90 % de 22 000 000 = 19 800 000 tU) plus 10 % des ressources estimées de l'uranium présent dans l'eau de mer (10 % de 4 000 000 000 = 400 000 000 de tU), soit un total de 434 182 500 tU.

28. Le thorium est trois fois plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre. Le thorium naturel est constitué à près de 100 % de thorium 232, qui n'est pas fissile. Toutefois, il est fertile, et se transforme en thorium 233 fissile par absorption de neutrons lents. Par conséquent, un futur cycle du combustible basé sur le thorium pour la production d'électricité pourrait étendre considérablement la durée de vie des ressources nucléaires mondiales.

29. L'énergie nucléaire, avec les sources renouvelables, pourrait satisfaire une plus grande part des besoins énergétiques mondiaux croissants par le développement des véhicules équipés de piles à combustible et d'autres applications de l'hydrogène. L'hydrogène peut être produit à partir de l'eau à l'aide d'électricité, principal produit de l'énergie nucléaire et des sources renouvelables telles que l'énergie éolienne. Un processus de conversion économique associé à des techniques économiques de distribution et d'utilisation finale de l'hydrogène permettrait que l'énergie nucléaire et les sources renouvelables contribuent à la production de combustible pour le secteur des transports, qui dépend actuellement à 95 % du pétrole, et que la contribution de l'énergie nucléaire à la production de chaleur industrielle se développe. De nouvelles initiatives majeures de recherche sur l'hydrogène sont en

<sup>5</sup> Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire et Agence internationale de l'énergie atomique, *Uranium 2003 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris, 2004.

<sup>6</sup> Des définitions complètes des catégories RRA et RSE-I sont données dans *Uranium 2003 : Ressources, production et demande*. Brièvement, les RRA comprennent l'uranium qui se trouve dans des gisements de minerais connus et qui est récupérable avec les techniques actuelles. Les RSE-I comprennent en outre l'uranium dont on suppose la présence compte tenu de données géologiques directes.

cours, en particulier en Chine, aux États-Unis, en Europe et au Japon. Elles comportent toutes un volet sur la conception de modèles nucléaires innovants qui permettraient de produire l'hydrogène plus directement sans passer d'abord par la production d'électricité.

30. En ce qui concerne le Protocole de Kyoto, aucun progrès qui sensibiliserait les investisseurs privés à l'avantage du nucléaire en termes d'émissions quasi nulles de gaz à effet de serre, n'a été enregistré en 2003. Les prochaines délibérations importantes sur l'énergie et le développement durable, qui feront suite au Sommet mondial du développement durable (SMDD) de 2002, ne sont prévues que durant la treizième session de la Commission du développement durable (CDD) de l'ONU, qui se tiendra en 2006-2007. Le SMDD avait précédemment souscrit à certaines décisions de la CDD sur l'énergie nucléaire. Celle-ci y prenait note que les pays reconnaissent être divisés sur la contribution de l'électronucléaire au développement durable, alors qu'ils estiment tous que le choix en la matière revient à chaque pays.

### **B.2.3. Fission et fusion avancées<sup>7</sup>**

31. Confrontés aux défis que doit actuellement relever le secteur de l'électronucléaire, comme indiqué dans la Section B.1, de nombreux pays cherchent à améliorer les volets coûts, sûreté, et anti-prolifération des systèmes avancés réacteurs-cycles du combustible. En ce qui concerne les modèles avancés de centrales nucléaires, des efforts sont déployés pour 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, entraînant ainsi des économies par la production en série plutôt que des économies d'échelle. Des tranches de plus petite taille seraient également plus facilement financées, s'adapteraient mieux aux petits réseaux électriques ou aux sites éloignés, et seraient avantageuses pour le chauffage urbain, le dessalement de l'eau de mer et d'autres applications non électriques. Tous ces avantages devraient les rendre plus attrayantes pour les pays en développement.

32. Des efforts considérables sont actuellement déployés sur de grands modèles évolutifs de REO par l'Allemagne, la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France, le Japon et la République de Corée. Les principales recherches sur des modèles évolutifs de REO de faible ou moyenne puissance sont réalisées 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.

33. 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 collaborent à la conception d'un certain nombre de 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 liquide et des réacteurs rapides refroidis par gaz (hélium) sont menés par des pays appartenant au Forum international Génération IV (GIF) et par la Fédération de Russie. Des

---

<sup>7</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review – 2004*'.

recherches sur les 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 République de Corée et dans huit pays de l'UE.

34. Pour compléter les nombreuses initiatives susmentionnées, deux autres visant à promouvoir l'innovation à l'échelle internationale ont vu le jour : le GIF et le projet international de l'Agence sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (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.

35. Sont membres du projet INPRO de l'Agence les pays suivants : Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Brésil, Bulgarie, Canada, Chine, Espagne, Fédération de Russie, France, Inde, Indonésie, Pakistan, Pays-Bas, République de Corée, Suisse et Turquie, 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. Actuellement, on procède, dans le cadre du projet, à la validation de cette méthode en réalisant des essais par le biais d'une série d'études de cas.

36. 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 approche de l'étape de prise de décision sur le choix du site. En 2003, trois nouveaux membres, la Chine, les États-Unis (qui avaient délaissé ITER en 1999) et la République de Corée ont rejoint la Fédération de Russie, l'UE et le Japon au sein du projet. Les deux sites proposés se trouvent en France et au Japon.

37. 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.

## **C. Applications dans les secteurs de l'alimentation, de l'eau et de la santé**

### **C.1. Techniques nucléaires pour l'amélioration des cultures**

38. Les techniques nucléaires ont contribué et continuent de contribuer de façon déterminante à l'amélioration des cultures. Les applications varient, mais c'est dans les domaines suivants que les résultats ont été les plus probants : amélioration du matériel génétique végétal par mutations induites ; mise au point de marqueurs génétiques pour l'établissement d'empreintes génétiques, la cartographie génétique et l'établissement de diagnostics au moyen de plusieurs techniques, dont le radiomarquage des marqueurs ADN ; et découverte de gènes grâce à la mutagenèse ciblée.

39. Les mutations induites, générées au moyen de rayons gamma, de rayons X, de neutrons rapides ou de substances chimiques, ont permis d'obtenir quelques grands succès dans le domaine de l'amélioration des plantes. Dans de nombreux cas, de nouveaux phénotypes, tels que le riz et l'orge

semi-nains, ont transformé l'apparence des cultures. Des variétés mutantes d'oléagineux et de légumineuses sont désormais mises sur le marché. Des mutations plus subtiles, mais non moins importantes, ont été opérées pour accroître la résistance aux maladies et aux insectes nuisibles et pour améliorer la qualité nutritionnelle et l'aptitude technologique des cultures. Les mutants bénéfiques ont été retenus et cultivés par les sélectionneurs : 2 316 variétés de mutants sont officiellement enregistrées pour plus de 160 espèces végétales dans le monde entier (base de données FAO/AIEA sur les variétés de mutants).

40. L'amélioration des méthodes d'examen a entraîné un renouveau des applications faisant appel aux mutations radio-induites. Par exemple, à Seibersdorf, des mutants du riz halotolérants ont été mis au point par irradiation gamma. La sélection a été facilitée par un essai rapide de germination en milieu hydroponique au cours duquel 2 000 plants ont été passés en revue. Quatre mutants ont été sélectionnés et leur résistance à la salinité vérifiée sur le terrain. Les souches mutantes ne présentent aucune caractéristique défavorable et les sélectionneurs de l'Institut international de recherche sur le riz les utilisent couramment dans leurs travaux de sélection. La superficie de la zone cible pour les cultivars de riz halotolérants en Asie serait de 618 000 hectares.

41. L'explosion des informations sur les séquences d'ADN a modifié le cours des recherches en génétique qui sont maintenant fonctionnelles plutôt que structurales. Découvrir la fonction des gènes est actuellement un objectif important. Les mutants sont un élément clé à cet égard, car ils offrent la possibilité d'un criblage rapide permettant la découverte systématique de gènes et leur analyse fonctionnelle. Le TILLING (ciblage de lésions génomiques induites locales), par exemple, est une technique de génétique inverse permettant de procéder à un criblage systématique d'importantes populations de mutants au moyen de données sur les séquences d'ADN.

## **C.2. Techniques nucléaires pour la protection des cultures**

42. Ces dernières années, la rentabilité de la technique de l'insecte stérile (TIS) pour l'élimination de la mouche des fruits s'est accrue au point que cette technique peut concurrencer les méthodes traditionnelles d'élimination faisant appel aux insecticides.

43. L'une des améliorations les plus pertinentes a été la mise au point de souches se prêtant à un sexage génétique, telles que les souches thermosensibles de la mouche méditerranéenne des fruits constituées exclusivement de mâles, qui ont réduit de moitié les coûts liés au transport et aux lâchers et ont au moins triplé l'efficacité des mouches mâles stériles sur le terrain. L'utilisation de souches ne comportant que des mouches mâles est désormais la norme pour l'application de la TIS à la mouche méditerranéenne des fruits, et les pays s'étant dotés d'installations d'élevage de cette dernière ont maintenant intégré des souches se prêtant au sexage génétique à leurs procédés de production en masse.

44. 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. De constantes améliorations et de nouvelles avancées scientifiques augurent bien de l'application future de la TIS à un certain nombre d'espèces économiquement importantes, telles que le faux carpocapse, la pyrale de la pomme, la pyrale des dattes, le vers de la capsule et plusieurs autres insectes nuisibles, dont le charançon de la patate douce. En outre, la mise au point de souches se prêtant à un sexage génétique pour d'autres espèces importantes d'insectes nuisibles en vue d'accroître la rentabilité de la TIS restera au cœur des travaux de recherche-développement.

### C.3. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail

45. On estime que grâce à l'éradication de la lucilie bouchère de l'Amérique du Nord et de l'Amérique centrale à l'aide de la TIS, dont le coût total s'est élevé à environ 1 milliard de dollars, les bénéfices annuels du secteur de l'élevage dans cette région dépassent le montant des investissements faits pendant la campagne d'éradication, qui s'est échelonnée sur plus de 45 ans. Toutefois, en Afrique, la trypanosomose transmise par la mouche tsé-tsé empêche l'introduction de systèmes mixtes culture/élevage. Le montant total des ponctions dues à la trypanosomose sur le produit agricole intérieur brut des pays infestés par la mouche tsé-tsé en Afrique subsaharienne est estimé à 4,75 milliards de dollars par an.

46. Des zones prioritaires pour le développement agricole ont été définies à l'échelle internationale, et il semblerait que des interventions contre la mouche tsé-tsé et la trypanosomose, notamment à l'aide de la TIS, y généreraient des profits rapides, concrets et durables dans le cadre du développement agricole et de l'utilisation écologiquement rationnelle des ressources. C'est dans la vallée du Rift, au sud de l'Éthiopie, que les actions concertées à l'échelle internationale menées dans ces zones prioritaires en sont au stade le plus avancé ; des analyses coûts-avantages préliminaires prédisent que le seuil de rentabilité, moment où les bénéfices égaleront les investissements, sera atteint après cinq ou six ans, et que le taux de rentabilité interne sur 12 ans s'établira entre 33 et 43 %. L'Organisation arabe de développement agricole, la FAO et l'AIEA poursuivent leur collaboration dans le cadre d'un projet régional conjoint sur la faisabilité de l'éradication de la lucilie bouchère du Vieux Monde dans la région Asie de l'Ouest.

47. Les récentes avancées en biotechnologie, principalement dans le domaine des techniques génétiques, ont révolutionné les recherches visant à améliorer la production et la santé animales dans le monde développé. Les approches, nouvelles et innovantes, qui en ont résulté permettent de trouver des solutions uniques aux problèmes tant nouveaux qu'anciens.

48. En ce qui concerne la production animale, la caractérisation des génomes du bétail permettra d'identifier des gènes favorables, tels que ceux qui permettent de résister aux maladies ou de prospérer dans des conditions climatiques ou nutritionnelles difficiles. L'hybridation et les techniques connexes faisant appel au  $^{32}\text{P}$  et à d'autres marqueurs isotopiques ainsi que les outils moléculaires non isotopiques pour l'identification des gènes, les microsatellites et les locus quantitatifs permettront de sélectionner et d'élever des animaux résistants, améliorant ou remplaçant ainsi les méthodes traditionnelles de lutte contre les maladies.

49. Malgré ces avancées, les technologies nucléaires éprouvées, telles que le radio-immunodosage (RIA) faisant appel à  $^{125}\text{I}$  pour quantifier les hormones et les métabolites dans le sang ou le lait des animaux, continuent d'être largement utilisées. Le RIA de la progestérone est indispensable pour obtenir des informations tant sur les problèmes de gestion de la reproduction par les éleveurs que sur les lacunes des services d'insémination artificielle que leur fournissent gouvernements, coopératives ou organismes privés. Le RIA est également une méthode économique et rigoureuse servant à dépister la présence de résidus nuisibles dans les aliments d'origine animale, tels que ceux résultant de l'usage abusif de produits vétérinaires.

50. Le diagnostic moléculaire inaugure une nouvelle ère dans le domaine de la santé animale en améliorant la sensibilité et la spécificité des tests visant à détecter les maladies animales. Un objectif important de nombreuses techniques diagnostiques est la capacité de réaliser des analyses hors laboratoire pour assurer une détection rapide et précise de la présence d'agents pathogènes. Grâce à l'existence sur le marché d'instruments perfectionnés, des techniques telles que le 'séquençage  $^{35}\text{S}/^{32}\text{P}$  de gènes par imagerie phosphorescente' pourront être établies dans les pays en développement. Des avancées dans les domaines de la technologie de la microfabrication, des microfluides et de la nanotechnologie font espérer la mise au point d'instruments plus sensibles, rapides et robustes pouvant fonctionner dans diverses conditions. Les puces-laboratoires permettent d'intégrer le traitement des échantillons, l'amplification de séquences cibles et la détection dans un seul dispositif miniaturisé.

Grâce à ces technologies, il sera possible de mettre au point des trousse de diagnostic reposant sur des biopuces capables de détecter de multiples agents infectieux (antigènes) ou la présence d'agents pathogènes (anticorps) au moyen d'un seul dosage hautement sensible, spécifique et rapide. Leur adaptation pour une utilisation sur le terrain révolutionnera le diagnostic, la prévention des maladies qui ravagent le bétail dans les pays en développement et la lutte contre ces maladies<sup>8</sup>

#### **C.4. Sécurité sanitaire des aliments**

51. Soixante-dix installations d'irradiation sont actuellement utilisées dans plus de 33 pays pour assurer la sécurité sanitaire et la qualité des aliments, et satisfaire aux règlements quaranténaires concernant les échanges commerciaux, notamment pour les produits carnés, les fruits frais, les épices et les condiments végétaux séchés.

52. La Commission du Codex Alimentarius a adopté, à sa 26<sup>e</sup> session (tenue à Rome du 30 juin au 7 juillet 2003), la *Norme générale Codex pour les aliments irradiés* et le *Code d'usages international recommandé pour le traitement des aliments par irradiation* comme textes finals du Codex. En outre, la Commission intérimaire des mesures phytosanitaires, organe directeur de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV), a adopté, à sa 5<sup>e</sup> session (tenue à Rome du 7 au 11 avril 2003), les *Directives pour l'utilisation de l'irradiation comme mesure phytosanitaire*. Le Codex et les normes CIPV jouissent d'un statut juridique en vertu de l'Accord SPS de l'OMC.

53. On aura de plus en plus besoin de recourir aux techniques nucléaires pour assurer la sécurité sanitaire et la qualité des aliments, et pour valider et normaliser des techniques d'analyse des contaminants et des résidus alimentaires qui soient bon marché et adaptées aux pays en développement. Des efforts concertés dans ces domaines permettront de renforcer la sécurité alimentaire et de favoriser le commerce international des denrées alimentaires grâce à une approche intégrée couvrant l'ensemble de la chaîne alimentaire.

#### **C.5. Vers une gestion durable des terres et de l'eau**

54. En septembre 2002, le Sommet mondial pour le développement durable de Johannesburg a réaffirmé que la dégradation des terres était l'un des principaux problèmes en matière d'environnement et de développement durable auxquels le monde devrait faire face au XXI<sup>e</sup> siècle. L'AIEA a centré ses efforts sur l'utilisation des radiotraceurs, en particulier de <sup>137</sup>Cs, pour obtenir des estimations quantitatives de l'érosion des sols et des dépôts sur les terres agricoles, qui fourniront des informations rétrospectives à moyen terme (30-40 ans) sur les taux d'érosion et de dépôt, ainsi que sur les structures spatiales de la redistribution des sols, sans que des programmes de surveillance à long terme soient nécessaires. À l'heure actuelle, plus de 40 groupes de recherche sont capables de mener des études de ce type.

55. Le programme FAO/AIEA participe activement aux travaux de recherche-développement sur l'utilisation combinée de <sup>137</sup>Cs et d'autres radionucléides de l'environnement, tels que <sup>210</sup>Pb et <sup>7</sup>Be, pour évaluer à la fois les taux d'érosion et de sédimentation et la redistribution du sol à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces données seront utiles pour définir des mesures prometteuses de préservation des sols destinées à combattre et à atténuer l'érosion et la sédimentation, et pour élaborer des stratégies de gestion durable des bassins versants et de protection de l'environnement.

56. Le Forum mondial de l'eau, qui a eu lieu à Kyoto (Japon) en mars 2003, a reconnu qu'il était urgent d'améliorer à la fois la productivité de l'eau pour les cultures et l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans le secteur agricole. Des recherches sont en cours pour élaborer, en s'appuyant sur les

---

<sup>8</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review – 2004*'.

techniques nucléaires, des outils pratiques et des recommandations permettant d'améliorer la productivité de l'eau dans diverses conditions climatiques et de gestion et de sélectionner des plantes performantes dans des environnements exposés à la sécheresse. À cet égard, la technique de discrimination isotopique du carbone pourrait constituer un outil de valeur pour identifier des géotypes résistants à la sécheresse.

## **C.6. Ressources en eau**

57. Il est largement admis que la compréhension du cycle de l'eau fait partie des informations scientifiques indispensables pour élaborer des mesures favorisant une gestion durable des ressources en eau douce. Les applications des isotopes en hydrologie permettent de fournir rapidement et économiquement des informations hydrologiques sur des zones étendues grâce à la signature isotopique naturelle de l'eau.

58. Douze isotopes ou paires d'isotopes sont couramment utilisés en hydrologie isotopique, les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène étant les plus fréquemment utilisés. On recourt de plus en plus souvent au tritium et à l'hélium 3 pour la datation des eaux souterraines jeunes, les eaux souterraines jouant un rôle primordial dans la satisfaction des besoins mondiaux en eau douce.

59. Le Service géologique des États-Unis fait régulièrement appel aux techniques isotopiques pour évaluer les ressources en eau douce. La plupart de ses programmes d'analyse des aquifères régionaux ont eu recours aux techniques isotopiques pour estimer la réalimentation des nappes souterraines. Ces techniques sont également utilisées aux fins de la gestion des eaux souterraines en Allemagne, en Australie, en France, en Inde, au Royaume-Uni et dans un certain nombre d'autres pays. Une étude détaillée de la composition isotopique des principaux fleuves des États-Unis a récemment fait progresser l'application des isotopes à la gestion des eaux de surface et à la compréhension de l'influence des changements climatiques sur les ressources en eau. Plus de 17 groupes de recherche participant à un projet de recherche coordonnée de l'AIEA sont en train de mettre en place un réseau mondial de surveillance isotopique des grands fleuves.

60. Les données sur la composition isotopique des précipitations, recueillies par les réseaux nationaux et mondiaux de stations de surveillance, ont apporté une nouvelle dimension aux modèles de circulation atmosphérique globale (MCAG), qui sont utilisés pour reconstituer les conditions paléoclimatiques dans le cadre de la recherche sur les changements climatiques mondiaux. Des établissements en Allemagne, aux États-Unis et en France ont récemment développé l'utilisation de données isotopiques mondiales sur les précipitations afin de mieux représenter les processus hydrologiques dans les MCAG et d'en vérifier la simulation. Les modèles basés sur des données isotopiques ont amélioré la compréhension des processus et l'on considère qu'ils simulent avec plus de fiabilité les conditions climatiques passées.

61. L'Agence a organisé en 2003 un colloque lors duquel plus de 250 participants venant de 69 pays ont examiné le passé, le présent et l'avenir des applications des isotopes à l'hydrologie et à la recherche sur le climat. D'après les conclusions de ce colloque, ces applications continueront à jouer un rôle important dans la gestion des ressources en eaux souterraines, et seront même probablement essentielles pour comprendre et prévoir les processus climatiques et atmosphériques. En aidant à comprendre les changements climatiques passés, les isotopes jouent en effet également un rôle clé dans la prévision des changements futurs, lesquels risquent non seulement d'influencer les températures à l'échelle mondiale, mais aussi les besoins énergétiques, les réserves d'eau potable et la sécurité alimentaire.



## **C.7. Santé humaine**

### **C.7.1. Nutrition**

62. Certaines méthodes classiques employées pour évaluer la santé et l'état nutritionnel peuvent être invasives, imprécises, insensibles à des changements mineurs et difficilement transférables sur le terrain. Les techniques nucléaires et isotopiques sont de plus en plus considérées comme un complément indispensable dans les travaux de recherche en nutrition appliquée. Les techniques isotopiques ont apporté une contribution fructueuse à l'élaboration de programmes et d'orientations visant à lutter contre de nombreuses formes de malnutrition. Les principales techniques utilisées dans ce domaine sont notamment : la technique de la dilution isotopique pour analyser la composition corporelle, la technique faisant appel à de l'eau doublement marquée pour mesurer le métabolisme énergétique, l'évaluation de la biodisponibilité des minéraux à l'état de traces à l'aide d'isotopes stables, la détermination des réserves de vitamine A dans le corps, l'absorptiométrie à rayons X en double énergie pour mesurer la densité minérale osseuse et le test respiratoire avec marquage au carbone 13 pour dépister des infections.

### **C.7.2. Médecine nucléaire**

#### **Applications diagnostiques**

63. Les études fonctionnelles réalisées avec et sans imagerie en médecine nucléaire permettent l'application de sources radioactives ouvertes administrées par voie interne à des fins diagnostiques et expérimentales. Les applications à des fins thérapeutiques sont également de plus en plus nombreuses. Ces techniques sont utilisées dans plusieurs disciplines, dont la cardiologie, l'oncologie, la néphrologie, la neurologie, l'infectiologie et la génétique.

64. **Études fonctionnelles réalisées avec et sans imagerie en médecine nucléaire :** Les gamma-caméras et la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT), qui sont couramment utilisées en médecine clinique, fournissent des informations à la fois statiques et dynamiques qui permettent d'établir le diagnostic et le pronostic de maladies, d'étudier les fonctions organiques et de déterminer la réponse aux traitements. La tomographie à émission de positons (TEP) est apparue comme un outil très efficace pour diagnostiquer des maladies à un stade précoce, déterminer leur étendue et la réponse au traitement, estimer les maladies résiduelles après traitement, établir le pronostic et comprendre le comportement biomoléculaire. La TEP progresse à grands pas dans les pays développés, mais sa complexité et son coût limitent son utilisation en pratique clinique courante dans la plupart des pays en développement.

65. L'utilisation de sondes gamma pour la détection et la biopsie du ganglion lymphatique sentinelle a profondément modifié la prise en charge des patients en oncologie chirurgicale, de même que le traitement des mélanomes malins et des cancers du sein et du colon.

66. **Techniques de médecine nucléaire moléculaire :** Les méthodes moléculaires ont des applications dans les domaines du dépistage et du diagnostic précoces des maladies, de la pathogenèse, de l'aide à la décision, au suivi et à la prise en charge thérapeutiques, de la recherche épidémiologique, de l'immunologie, de la pharmacogénomique et de la conception de nouveaux médicaments et vaccins. L'une des applications importantes de ces techniques est l'amplification de séquences spécifiques de gènes d'agents pathogènes par réaction de polymérisation en chaîne pour détecter des mutations responsables de la résistance aux médicaments antipaludiques et antituberculeux, ainsi que pour le sous-typage du VIH et la conception de vaccins contre ce virus.

67. **Radiopharmacologie et technologie du radio-immunodosage :** La radiopharmacologie a trait à la cinétique des traceurs et à la mise au point et à l'évaluation de radiopharmaceutiques. L'introduction

de nouveaux traceurs et d'applications innovantes peut avoir des incidences importantes pour certaines disciplines, telles que l'oncologie, la cardiologie et l'infectiologie.

68. Le radio-immunos dosage médical et la technologie qui lui est associée sont des éléments importants du système de diagnostic *in vitro* grâce auxquels il est possible de quantifier les modifications subies par les protéines et d'autres métabolites intermédiaires importants dans les états malades, en particulier dans les pays en développement. Ils sont aussi utilisés pour étudier, dans le cadre de travaux de développement, de nouvelles méthodes susceptibles d'être appliquées aux patients et comme référence pour la vérification des dosages non isotopiques.

### **Thérapie**

69. **Curiethérapie à débit de dose élevé :** Ces dernières années, la curiethérapie à débit de dose élevé est devenue une méthode très importante de traitement du cancer du col de l'utérus. Contrairement aux appareils de curiethérapie à faible débit de dose que l'on utilisait traditionnellement mais qui ne pouvaient traiter que 2 à 3 patients par semaine, elle permet de traiter plusieurs dizaines de patients par jour, avec une optimisation des doses de rayonnements sans précédent.

70. **Analyse des structures de gènes et de protéines :** La révolution génomique et protéomique en biologie et en médecine signifie que l'on peut désormais utiliser des microréseaux pour analyser plusieurs milliers de gènes ou de protéines en peu de temps. Cette technologie pourrait s'avérer très utile pour présélectionner les patients et/ou les cancers en fonction de leur réponse aux rayonnements.

71. **Thérapie par les cellules souches :** La radiothérapie a longtemps été utilisée dans le cadre de la préparation aux transplantations de moelle osseuse. Des recherches récentes semblent indiquer que la radiothérapie associée à la transplantation cellulaire ou de cellules souches pourrait également favoriser la régénération d'autres organes, tels que le foie, le pancréas et le système nerveux central.

### **Dosimétrie et radiophysique médicale**

72. La mesure précise des rayonnements ionisants (dosimétrie) est essentielle pour assurer une utilisation sûre et efficace de la technologie nucléaire à des fins de diagnostic et de traitement. Plus de 250 participants de 62 pays ont examiné divers aspects de la dosimétrie lors d'un colloque récemment organisé par l'Agence à Vienne. Plus de 90 recommandations ont été élaborées afin d'orienter les travaux futurs. Elles soulignent la nécessité de renforcer la formation du personnel soignant à la fourniture de services d'infrastructure, de disposer de matériel adapté et abordable destiné à appuyer les techniques de diagnostic et de traitement, et de mettre au point des étalons physiques pour des comparaisons et des vérifications des programmes de contrôle et d'assurance de la qualité en vue de démontrer la sûreté et l'efficacité de l'application de la technologie nucléaire aux patients.

## **D. Applications intéressant l'environnement et les processus industriels durables**

### **D.1. Protection des environnements marin et terrestre**

#### **D.1.1. Environnement marin**

73. La protection de l'environnement marin et la gestion des ressources océaniques sont particulièrement complexes et difficiles. La protection des zones côtières d'importance socio-économique, qui abritent plus de 40 % de la population de la planète et produisent une bonne partie des fruits de mer consommés dans le monde, revêt une importance capitale.

74. Les principaux problèmes auxquels sont confrontés les environnements côtiers concernent, entre autres, la santé et la sûreté du public, la santé de l'écosystème, l'eutrophisation (surfertilisation entraînant la désoxygénation), la prolifération d'algues nuisibles, et d'autres dangers comme les inondations des zones côtières et les fluctuations du niveau des mers. Le phénomène de la prolifération d'algues nuisibles a eu des incidences économiques considérables sur les industries de la pêche et des fruits de mer et sur le tourisme. Les techniques nucléaires telles que les dosages récepteur-ligand ont aidé, en tant qu'outil d'analyse, à lutter contre la prolifération croissante des algues nuisibles, un problème qui nécessite des techniques de dosage rapides, sensibles – notamment aux faibles concentrations en toxines – et bon marché.

75. Les caractéristiques de décroissance radioactive de certains radionucléides naturels en font d'excellents outils de géochronologie pour la datation, par exemple de la séquence de sédimentation dans certaines régions marines. La connaissance du moment de la sédimentation aide à établir les tendances temporelles des polluants marins. Une grande variété de radio-isotopes tels que les analogues de métaux lourds, en particulier les émetteurs gamma, sont des outils utiles pour suivre le transport, le comportement et le devenir des polluants à métaux lourds dans l'eau, les sédiments et les organismes marins en conditions de laboratoire.

### **D.1.2. Environnement terrestre**

#### **Prévention des rejets de polluants**

76. Les polluants acides tels que les oxydes de soufre et d'azote sont émis pendant la combustion du combustible fossile, et entraînent des pluies acides et la formation de brouillard. Les faisceaux d'électrons modifient les oxydes de soufre et d'azote dans les effluents gazeux et leur permettent de réagir avec l'ammoniac pour produire des effluents propres et des engrais. Le principal avantage du radiotraitement est la transformation des composés toxiques en produits utiles et inoffensifs. Des installations de traitement des gaz de combustion utilisant la technologie des faisceaux d'électrons sont en service dans des centrales à charbon en Chine et en Pologne (dans les deux cas, elles purifient les gaz de combustion avec des réacteurs de 100 MWe), avec des taux élevés d'élimination des SO<sub>x</sub> et des NO<sub>x</sub>. Les technologies nucléaires à base de faisceaux d'électrons, rayonnement électromagnétique ou sources isotopiques ont aussi été utilisées pour décontaminer et épurer les effluents aqueux, les eaux usées, les eaux résiduaires et les boues industrielles en détruisant les substances organiques nocives et toxiques et les micro-organismes qu'ils contiennent. Une technologie de synthèse, basée sur les faisceaux d'électrons et l'ozone, a été élaborée pour éliminer les hydrocarbures chlorés de l'eau potable. Une autre application permet d'obtenir, par épuration radiologique des eaux résiduaires biologiques, des boues biologiques qui peuvent être utilisées comme engrais.

#### **Surveillance et recherche environnementales**

77. Les techniques et les méthodes nucléaires de mesure sont aussi largement utilisées pour la surveillance et la recherche environnementales, les radionucléides naturels et artificiels servant d'indicateurs des processus de transport dans l'atmosphère, les sols et les mers.

78. L'apparition des radionucléides en géochronologie a révolutionné la compréhension des processus sédimentaires modernes dans les systèmes aquatiques. Les méthodes basées sur <sup>210</sup>Pb et <sup>87/86</sup>Sr sont utilisées comme outils quantitatifs en géochronologie des sédiments marins et lacustres. En outre, <sup>137</sup>Cs et d'autres radionucléides naturels et artificiels fortement absorbés à la surface du sol, présents en des concentrations très faibles mais néanmoins mesurables, ont été utilisés pour étudier l'érosion des sols et les dépôts de sédiments.

## **Déminage humanitaire**

79. Les mines terrestres abandonnées au cours des conflits armés passés et actuels restent une menace pour les populations dans plus de 60 pays du monde en développement. Une mine terrestre antipersonnel typique contient très peu de métal et est par conséquent difficile à détecter avec les moyens ordinaires de détection des métaux. Les détecteurs de métal très sensibles peuvent détecter les mines à faible teneur en métal, mais ne peuvent distinguer celles-ci des autres petits objets métalliques enfouis, comme les éclats. Une méthode nucléaire basée sur les neutrons constitue l'une des rares méthodes permettant une analyse élémentaire sans intrusion des objets enfouis, grâce à la détection de l'hydrogène contenu dans l'explosif de la mine. Un instrument doté d'un générateur de neutrons électrostatiques pulsés (appelé dispositif d'analyse élémentaire par neutrons pulsés ou PELAN) servant au déminage humanitaire a fait l'objet de nombreux travaux de recherche et s'est révélé prometteur. Les tests ont montré que le dispositif PELAN permettait de repérer efficacement des mines antichars contenant 5 à 6 kg de TNT à 15 cm de profondeur et des mines antipersonnel contenant 200 g de TNT à 5 cm de profondeur. Une conclusion définitive n'a pu être tirée en ce qui concerne la détection des mines antipersonnel plus petites, et les limites de détection doivent encore être améliorées. Pour donner pleinement satisfaction, le dispositif PELAN devra être intégré à un dispositif de détection d'anomalies approprié, par exemple un détecteur de métal ou un géoradar, pour les applications sur le terrain. En outre, des dispositifs portatifs basés sur la rétrodiffusion des neutrons ont été mis au point pour la détection des mines terrestres gainées de plastique dans les régions sèches. Ces instruments ont été testés dans des situations analogues aux conditions de terrain et on s'attend que ces types de dispositifs soient utilisés pour le déminage avec un détecteur de métal, pour la détection des mines terrestres gainées de plastique.

## **D.2. Utilisation de la technologie des rayonnements pour promouvoir des industries propres et sûres<sup>9</sup>**

80. Toute une gamme de techniques nucléaires sont disponibles pour des applications dans les domaines de l'industrie, de l'environnement, de la médecine et de la recherche. Les techniques radiologiques et isotopiques, telles que l'irradiation gamma, les faisceaux d'électrons ou d'ions et les jauges nucléaires, les radiotraceurs et les sources scellées, ainsi que les essais non destructifs et les techniques d'analyse nucléaire, sont utilisées pour le contrôle des processus, la transformation des matières, la réduction des émissions industrielles nocives et le retraitement des flux de déchets, ainsi que pour de nombreuses autres applications.

81. Outre leurs incidences économiques, les applications radiologiques et radio-isotopiques ont des conséquences majeures sur différents aspects du développement social et industriel, par exemple en ce qui concerne la santé humaine (radiostérilisation des produits médicaux, irradiation du sang et des greffons), la protection de l'environnement (utilisation des faisceaux d'électrons pour l'épuration des effluents gazeux et des eaux usées, et des rayons gamma pour le traitement des boues), la promotion de processus industriels propres et sûrs (détection des fuites avec des radiotraceurs, essais non destructifs pour les installations, les tuyauteries et les réservoirs), l'amélioration de la qualité des produits (techniques nucléaires d'analyse, essais non destructifs), l'optimisation des processus (radiotraceurs et systèmes de contrôle nucléaire), la prospection et l'exploitation des matières premières (traitement en temps réel, diagraphie des sondages) et la sécurité (inspection des marchandises et irradiation du courrier officiel).

82. Il y a aujourd'hui plus de 160 irradiateurs gamma industriels dans le monde, dont 65 unités dans les pays en développement. Plus de 20 % de ces irradiateurs ont une activité supérieure à 1 MCi. On

---

<sup>9</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review – 2004*'.

dénombrer plus de 13 000 accélérateurs dans le monde. Les nouvelles applications ayant trait à l'environnement nécessitent des accélérateurs très puissants, fiables, et l'installation de traitement des rayonnements la plus puissante, avec une puissance totale de plus de 1 MW, a été construite pour la purification des effluents gazeux émis par les centrales en Pologne.

83. En nanotechnologie, domaine relativement nouveau, les faisceaux d'électrons sont utilisés pour certaines applications, comme la lithographie. Les structures nanométriques ont déjà été testées, et d'autres applications possibles ont trait aux polymères conducteurs polyphasés.

84. Les radiotraceurs fournissent des outils utiles dans de nombreux processus dans les domaines de l'industrie et de l'environnement, par exemple en ce qui concerne les champs pétrolifères et les raffineries, les industries chimique et métallurgique et les installations de purification des eaux usées. Les radio-isotopes utilisés couramment en tant que traceurs sont  $^3\text{H}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{24}\text{Na}$  et  $^{131}\text{I}$ .

### D.2.1. Techniques nucléaires d'analyse

85. Les techniques nucléaires d'analyse jouent un rôle important dans la certification des teneurs en éléments d'une variété de matières, et revêtent une importance particulière dans le domaine du commerce international dans la mesure où les limites légales doivent être observées pour les produits alimentaires et les résultats des analyses doivent être basés sur une reconnaissance mutuelle, ce qui est possible si les laboratoires travaillent conformément à des normes de qualité acceptées sur le plan international telles que la norme ISO 17025. On peut observer de nouvelles tendances dans le domaine des applications nucléaires avec la mise au point d'instruments robustes, automatisés et portatifs, qui peuvent être utilisés en laboratoire et sur le terrain. Les techniques nucléaires servent aussi à préserver le patrimoine culturel de l'humanité. L'analyse par activation neutronique est une méthode d'analyse multi-élémentaire très sensible servant à la détermination des empreintes des éléments traces en vue de distinguer les objets authentiques des faux ; elle est utilisée pour les pièces de monnaie et d'autres objets métalliques, les pierres, les pièces de poterie et les objets en céramique.

### D.2.2. Dessalement nucléaire<sup>10</sup>

86. L'intérêt que suscite le dessalement nucléaire s'explique par l'augmentation de la demande d'eau douce dans le monde et par l'évolution dans le domaine des réacteurs de faible ou moyenne puissance, lesquels pourraient être plus adaptés au dessalement que les réacteurs de forte puissance. Le Japon a accumulé plus de 125 années-réacteur d'expérience dans le domaine du dessalement nucléaire, et le Kazakhstan en avait accumulé 26 avant de mettre à l'arrêt le réacteur à neutrons rapides d'Aktau en 1999. L'Égypte a terminé une étude de faisabilité pour une installation mixte de production d'électricité et d'eau sur le site d'El-Dabaa. La France a achevé une étude européenne commune sur la mise au point de réacteurs pour le dessalement nucléaire (projet EURODESAL). L'Inde est en train de construire à Kalpakkam, pour la démonstration du dessalement nucléaire, une usine mixte d'une capacité de 6 300 m<sup>3</sup>/j utilisant la technologie du dessalement par étages multiples et l'osmose inverse. L'installation d'osmose inverse a été mise en service et l'ensemble de l'usine devrait l'être en 2004. Le Canada a achevé les tests fonctionnels du processus de préchauffage par osmose inverse et envisage le lancement d'un programme de démonstration de la pré-commercialisation. La Chine a achevé une étude de pré-faisabilité pour la construction, dans la région de Yantai, d'une installation de dessalement nucléaire de l'eau de mer qui utilisera un NHR-200, et l'Indonésie procède à une étude préliminaire de faisabilité économique du dessalement nucléaire sur l'île de Madura. La République de Corée a achevé les études de base de son modèle SMART en 2002, et a lancé un projet de six ans en vue de la construction d'une installation pilote à l'échelle 1/5<sup>e</sup> appelée SMART-P pour vérifier la

---

<sup>10</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous 'Nuclear Technology Review – 2004'.

performance intégrale du système et son utilisation pour le dessalement nucléaire. Le Pakistan continue ses travaux relatifs à la mise en place d'une installation de démonstration du dessalement nucléaire d'une capacité de 4 800 m<sup>3</sup>/j qui sera couplée au RELP de la centrale nucléaire de Karachi (KANUPP). En Fédération de Russie, les études sur une centrale nucléaire flottante de production d'électricité et de chaleur nucléaire, basée sur la technologie des réacteurs de navire, se poursuivent. La construction de la première centrale devrait commencer en 2005 ou 2006 dans le nord de la partie européenne de la Russie. Les plans prévoient une centrale flottante équipée de deux réacteurs KLT-40S devant servir de source d'énergie pour les installations de dessalement nucléaire. La Tunisie planifie une étude de pré-faisabilité pour une installation de dessalement nucléaire qui serait adaptée aux conditions du site envisagé.

## **E. Aspects socio-économiques de l'énergie et des applications nucléaires**

87. La technologie et les techniques nucléaires permettent de produire de l'énergie et d'accroître l'hygiène des aliments ainsi que les disponibilités alimentaires, et aident à prévenir, diagnostiquer et traiter les maladies, à optimiser l'utilisation de l'eau et à protéger l'environnement. Les techniques nucléaires ont contribué considérablement, et peuvent contribuer beaucoup plus, au développement dans les domaines qui, d'après le Sommet mondial pour le développement durable tenu à Johannesburg en 2002, constituent les principaux sujets de préoccupation de la communauté internationale, à savoir l'eau, l'énergie, la santé, l'agriculture et la biodiversité.

88. Il importe de comprendre leur impact sur les générations futures car elles influent sur les ressources d'une société, ses institutions, ses connaissances publiques, son capital humain, sa production et ses ressources naturelles. En période de mondialisation croissante, les contributions nationales et régionales peuvent aussi profiter à la communauté internationale dans son ensemble et pas seulement à une seule société. Aux plans national et régional, les sciences et les applications nucléaires constituent des disciplines essentielles sur la voie d'une société techniquement avancée. Tous les pays profitent des applications nucléaires, notamment dans le domaine des soins de santé. Certes, l'utilisation de ces applications augmente considérablement avec le développement social, technologique et économique des pays, mais elles peuvent procurer des avantages socio-économiques importants à tous les niveaux de développement. Pour que ces avantages se concrétisent, les applications nucléaires doivent être convenablement intégrées aux principaux domaines d'activité économique comme l'agriculture, la santé et l'énergie<sup>11</sup>.

89. Il faut évaluer précisément leurs coûts, leurs avantages et leurs risques, et cette évaluation doit être continue pour faire en sorte que les avantages des applications nucléaires soient disponibles dans les domaines où l'utilisation de l'atome est justifiée. Ces applications ont procuré d'importants avantages et demeurent disponibles tant pour les pays développés que pour ceux en développement. L'investissement dans l'infrastructure technique, scientifique et réglementaire requise peut donner des résultats assez rapidement, mais pour certains aspects, la maturité peut demander de nombreuses années. Le transfert de capacités humaines, réglementaires, techniques et scientifiques par l'Agence est une activité importante pour le développement socio-économique mais doit être replacé dans son contexte en termes de 'valeur ajoutée' ou de rentabilité comparative par rapport aux techniques non

---

<sup>11</sup> De plus amples informations sont disponibles sur IAEA.org sous '*Nuclear Technology Review – 2004*'.

nucléaires. Il faut adapter les techniques d'évaluation aux applications nucléaires ou isotopiques pertinentes et conduire des études pour définir les conditions limites réalistes pour que les évaluations de l'impact socio-économique soient valables. L'évaluation judicieuse de l'impact des sciences et des applications nucléaires est une tâche ardue, mais ses résultats peuvent fournir aux décideurs des justifications claires sur les plans économique et social en vue des choix concernant les applications nucléaires.