

## Cinquante-cinquième session ordinaire

Point 17 de l'ordre du jour provisoire  
(GC(55)/1)

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011

*Rapport du Directeur général*

## Résumé

- À la demande des États Membres, le Secrétariat publie chaque année un rapport d'ensemble exhaustif sur la technologie nucléaire. Le rapport ci-joint fait ressortir les faits importants survenus essentiellement en 2010.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011* passe en revue les domaines suivants : applications énergétiques, fission et fusion avancées, données atomiques et nucléaires, utilisation des accélérateurs et des réacteurs de recherche, techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, environnement, ressources en eau, et production de radio-isotopes et technologie des rayonnements. Une documentation complémentaire au Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011 est disponible, en anglais, sur le site de l'Agence<sup>1</sup> sur des faits nouveaux dans les domaines suivants : techniques de radio-oncologie, amélioration de la sécurité sanitaire et de la qualité des aliments grâce à des techniques isotopiques pour la traçabilité des aliments et utilisation d'isotopes de façon efficace pour promouvoir une gestion globale des ressources en eaux souterraines.
- Des informations sur les activités de l'Agence dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires figurent également dans le *Rapport annuel pour 2010* (GC(55)/2), en particulier dans la partie Technologie, et dans le *Rapport sur la coopération technique pour 2010* (GC(55)/INF/2).
- Le présent document a été modifié pour tenir compte, dans la mesure du possible, des observations faites par le Conseil des gouverneurs et d'autres observations communiquées par les États Membres.

---

<sup>1</sup> <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/Agenda/index.html>

## Tables des matières

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011 .....	1
Synthèse .....	1
A. Applications énergétiques .....	5
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui .....	5
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire .....	7
A.3. Cycle du combustible .....	9
A.3.1. Ressources et production d'uranium .....	9
A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible .....	10
A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible .....	12
A.3.4. Gestion des déchets radioactifs et déclassement .....	12
A.4. Sûreté .....	15
B. Fission et fusion avancées .....	17
B.1. Fission avancée .....	17
B.1.1. Réacteurs refroidis par eau .....	17
B.1.2. Systèmes à neutrons rapides .....	18
B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz .....	19
B.1.4. INPRO et GIF .....	20
B.2. Fusion .....	21
C. Données atomiques et nucléaires .....	22
D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche .....	23
D.1. Accélérateurs .....	23
D.2. Réacteurs de recherche .....	25
E. Technologies nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture .....	28
E.1. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail .....	28
E.2. Lutte contre les insectes nuisibles .....	29
E.3. Amélioration des cultures .....	30
E.4. Gestion des sols et de l'eau .....	32
E.4.1. Nouvelles voies pour l'évaluation de la fixation du carbone dans les terres agricoles .....	32
E.4.2. Utilisation des isotopes de l'oxygène présents dans le phosphate pour suivre les sources et le cycle du phosphore dans le sol .....	33
F. Santé humaine .....	34
F.1. Nutrition .....	34
F.2. Progrès dans les applications en radio-oncologie .....	34
F.3. Faits nouveaux en médecine nucléaire dans le domaine de la cardiologie .....	35
G. Environnement .....	36
G.1. Recours à la technologie nucléaire pour une alerte rapide concernant la prolifération d'algues marines nuisibles .....	36
G.2. Recours aux radionucléides à longue période pour la compréhension des processus environnementaux .....	38
H. Ressources en eau .....	39
I. Production de radio-isotopes et technologie des rayonnements .....	39
I.1. Radio-isotopes et radiopharmaceutiques .....	39
I.1.1. Agents de ciblage moléculaire pour l'imagerie et la thérapie .....	39
I.1.2. Sécurité des approvisionnements en molybdène 99 et en technétium 99m .....	40
I.2. Application de la technologie des rayonnements .....	41
I.2.1. Méthodes intégrées de gestion des sédiments basées sur les radiotraceurs et la simulation par ordinateur .....	41
I.2.2. Accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie .....	42

# Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011

*Rapport du Directeur général*

## Synthèse

1. L'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi dû aux catastrophes naturelles extraordinaires, à savoir le tremblement de terre et le tsunami, qui ont frappé le Japon le 11 mars 2011, est toujours en cours d'évaluation. Étant donné que le présent rapport se concentre sur les développements intervenus en 2010, la question de l'accident et de ses implications n'y est pas abordée mais elle sera prise en considération dans les rapports futurs de l'Agence.
2. En 2010, 16 nouveaux réacteurs nucléaires de puissance ont été mis en chantier, soit le nombre le plus élevé depuis 1985. Avec cinq nouveaux réacteurs couplés au réseau et seulement un réacteur déconnecté pendant l'année, la capacité électronucléaire totale dans le monde est passée à 375 GWe. Les projections révisées en 2010 de la croissance future de l'électronucléaire indiquaient encore que les attentes sont élevées en ce qui concerne l'expansion de ce secteur.
3. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie. Deux tiers des réacteurs en construction se trouvent en Asie, de même que 13 des 16 réacteurs mis en chantier. Rien qu'en Chine, on dénombre dix réacteurs mis en chantier. Les récentes tendances à augmenter la capacité et à renouveler ou à proroger les licences de réacteurs en service se sont poursuivies en 2010, en particulier dans certains pays européens, qui ont continué à réexaminer leurs politiques restreignant le recours futur à l'électronucléaire. L'intérêt pour le lancement de nouveaux programmes électronucléaire est resté élevé, plus de 60 États Membres ayant indiqué à l'Agence leur désir d'envisager d'introduire cette forme d'énergie.
4. Dans l'édition 2010 du Livre rouge de l'AEN (OCDE) et de l'AIEA, les estimations des ressources classiques répertoriées d'uranium (à moins de 130 \$/kg U) ont légèrement baissé par rapport à l'édition précédente, mais la production totale d'uranium dans le monde a bien augmenté en raison principalement d'une production accrue au Kazakhstan. Les prix au comptant de l'uranium, qui avaient baissé en 2009, ont atteint, fin 2010, leur plus haut niveau en plus de deux ans, avec 160 \$/kg U, bien que les prix aient varié jusqu'en milieu d'année entre 105 \$/kg U et 115 \$/kg U.
5. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA dont celle-ci sera propriétaire et assurera la gestion, et qui servira de ressource de dernier recours pour la production d'électricité. Toujours en décembre, une réserve d'UFE établie sous l'égide de l'Agence a été ouverte à Angarsk (Fédération de Russie). Elle recèle 120 tonnes d'UFE, soit une quantité suffisante pour deux cœurs de réacteur de 1 000MWe.

6. Plus de 50 États Membres étudient des solutions de rechange ou ont commencé à mettre au point des options de stockage définitif appropriées pour leurs stocks de déchets. En janvier 2010, un décret confirmant l'utilisation d'un site pour le dépôt de déchets de faible et moyenne activité est entré en vigueur en Slovaquie.

7. En novembre 2010, la Commission européenne a publié une proposition de directive du Conseil sur la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs qui prévoyait notamment de demander aux États Membres de l'UE de présenter leur programme national en indiquant quand, où et comment ils construiraient et gèreraient des dépôts de stockage définitif garantissant les normes de sûreté les plus strictes. La Finlande et la Suède sont en train d'établir la documentation requise pour les autorisations de construction d'installations de stockage géologique prévues pour du combustible usé. L'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a présenté une nouvelle édition du plan national pour la gestion des matières radioactives.

8. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis a été créée en janvier 2010 suite à la décision prise en 2009 par l'administration américaine de ne pas mettre à exécution le projet concernant le site de dépôt géologique de Yucca Mountain. La Commission devrait publier son premier rapport intérimaire en juillet 2011.

9. L'appui fourni par l'AIEA aux États Membres et aux programmes internationaux pour réexpédier le combustible de réacteurs de recherche vers son pays d'origine s'est poursuivi. Dans le cadre du programme de renvoi du combustible d'origine russe pour réacteurs de recherche (RRRFR), environ 109 kg de combustible neuf à UHE et 376 kg de combustible usé à UHE ont été rapatriés en Fédération de Russie. À la fin de 2010, 2 500 kg de combustible usé dégradé de réacteurs de recherche ont été transportés de Vinča (Serbie) en Fédération de Russie. Cette réexpédition a représenté le projet de coopération technique le plus important en termes de valeur de l'histoire de l'Agence.

10. En Chine, le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de type piscine de 65 MWth (20 MWe) a divergé pour la première fois le 21 juillet 2010. Au Japon, le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 280 MWe a été remis en service le 6 mai 2010 et des essais de confirmation ont débuté.

11. En ce qui concerne la fusion nucléaire, la phase de construction du Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) a officiellement débuté en juillet 2010. On s'attend à ce que le premier plasma soit réalisé en novembre 2019. Des progrès importants ont également été faits à l'Installation nationale d'ignition (NIF), aux États-Unis, où une impulsion de 1 MJ a été atteinte en janvier 2010.

12. La mise au point, les essais, la validation et l'application de techniques nucléaires et apparentées rapides et précises pour le diagnostic précoce des maladies ont joué un rôle majeur dans l'amélioration de la sécurité alimentaire en 2010. Ainsi, des vaccins sont mis au point contre la brucellose (une zoonose répandue) en Argentine et en Géorgie, les infections dues à des vers parasites (Éthiopie, Soudan et Sri Lanka), la theilériose (Chine et Turquie), la trypanosomose (Inde et Kenya), l'anaplasmose (Thaïlande), et contre les parasites transmis par les poissons (République islamique d'Iran).

13. Pour augmenter la productivité et assurer la sécurité alimentaire au niveau mondial, il est important sur le plan stratégique d'investir davantage dans la lutte contre les ravageurs. Le compte rendu d'un projet de recherche coordonnée (PRC) FAO/AIEA qui a rassemblé 18 équipes de recherche de 15 pays a été publié en 2010. Les résultats de ce projet font ressortir une série de moyens innovants mettant en jeu les rayonnements ionisants permettant d'ajouter de la valeur à la mise en œuvre de la lutte biologique grâce au recours à des prédateurs et à des parasitoïdes pour compléter la technique de l'insecte stérile et lutter contre les insectes nuisibles de manière écologiquement viable.

14. En 2010, on a continué d'utiliser avec succès les mutations ou modifications naturelles héréditaires du matériel génétique des plantes pour déterminer et sélectionner des caractères importants pour l'amélioration des cultures. Les techniques nucléaires d'induction de mutations peuvent permettre d'accroître les taux de modification génétique et partant l'adaptabilité des cultures au changement et à la variabilité climatiques. Des ensembles de techniques nucléaires basées sur l'induction de mutations, les technologies moléculaires et les biotechnologies propres à améliorer l'efficacité, y compris les techniques de culture de tissus et les technologies moléculaires à haut débit, ont été élaborés pour aider à déterminer et à exploiter les caractères essentiels pour l'adaptation au changement et à la variabilité climatiques.

15. Dans le domaine de la santé humaine, les progrès qui se sont poursuivis en 2010 en radio-oncologie permettent d'améliorer les traitements si bien qu'il est désormais possible de faire mieux correspondre le volume irradié à la forme de la tumeur et donc de mieux protéger les tissus sains voisins. La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RTC-3D) est en train d'être utilisée pour concevoir des domaines de traitement centrés sur la tumeur ciblée.

16. La radiothérapie asservie à la respiration tient compte des mouvements de l'organe et de la tumeur au cours de la respiration du patient. Cela est particulièrement important pour les tumeurs situées dans la poitrine, le larynx, l'abdomen, la prostate, la vessie, et dans le pelvis en général. Avec cette radiothérapie informatisée, le programme analyse les mouvements et déclenche le faisceau de traitement au moment approprié.

17. Les progrès enregistrés en médecine nucléaire au cours des trois dernières années ont permis de réduire à la fois le temps de balayage et la dose de rayonnements administrée aux patients tout en améliorant la qualité générale des images, ce qui facilite l'établissement de diagnostics plus fiables et plus efficaces des maladies cardiovasculaires. De nouveaux matériaux détecteurs, comme le tellure de zinc et de cadmium combinés avec un collimateur sténopé ciblé et la reconstruction tridimensionnelle sont actuellement utilisés en imagerie SPECT traditionnelle pour réduire le temps de balayage.

18. La prolifération d'algues toxiques dans les zones côtières peut occasionner des pertes économiques importantes en raison de ses effets nocifs sur les poissons et fruits de mer pêchés à la fois pour la consommation interne et pour l'exportation. Des techniques nucléaires permettent d'évaluer précisément et rapidement ce phénomène, soutiennent les efforts faits par les organismes nationaux de réglementation pour assurer la sécurité sanitaire de ces produits. La réunion annuelle de 2010 de la Scientific Association Dedicated to Analytical Excellence (AOAC International) a déterminé la méthode du dosage récepteur-ligand, une technique nucléaire basée sur l'utilisation de toxines radiomarquées, comme l'une des deux autres méthodes mises au point possibles qui ont été testées avec succès dans des études de pré-validation.

19. Des radionucléides à longue période sont actuellement utilisés pour étudier les ressources marines et les processus océanographiques, et pour évaluer la pollution marine dans le cadre de la gestion des zones côtières. La décroissance des radionucléides au cours du temps est exploitée par les chercheurs pour dater et étudier des processus environnementaux à grande échelle, et recueillir des données autrement impossibles à obtenir.

20. Les isotopes stables et radioactifs sont actuellement utilisés dans des études temporelles et efficaces des ressources en eaux souterraines, par exemple pour l'aquifère de Guarani (Amérique du Sud), le bassin du Tadla (Maroc) et l'aquifère des grès de Nubie (Afrique du Nord). Les données isotopiques obtenues ont été utilisées en 2010 pour confirmer les résultats d'études hydrologiques classiques et pour avoir des indications sur l'écoulement des eaux souterraines et la dynamique des aquifères, autant d'éléments qui facilitent une gestion globale des ressources en eaux souterraines.

21. Les radio-isotopes et les radiopharmaceutiques ont continué de gagner en importance en 2010. L'utilisation de radiopharmaceutiques très spéciaux comme marqueurs biologiques des processus moléculaires fondamentaux d'une maladie, approche appelée « imagerie moléculaire », se développe. Ils servent soit d'indicateur précoce de la maladie, soit de paramètre objectif pour mesurer l'efficacité d'un traitement, notamment chez les patients atteints de cancer.

22. Les difficultés techniques rencontrées ont conduit à des mises à l'arrêt fréquentes, prolongées et souvent parallèles des réacteurs de recherche, ce qui a aggravé encore la crise de l'approvisionnement en molybdène 99 qui a commencé à la fin de l'année 2007. L'action coordonnée mondiale qui a été déployée pour améliorer l'efficacité du côté de la demande, réduire les problèmes de transport et approuver les réacteurs capables d'irradier des cibles ont grandement contribué à atténuer l'impact de la crise en 2010. L'Afrique du Sud est devenue le premier grand producteur à fournir des quantités industrielles de molybdène 99 au moyen de cibles à l'UFE destinées à l'exportation en 2010 et la production à grande échelle de molybdène 99 a aussi commencé en décembre 2010 à l'Institut de recherche des réacteurs atomiques à Dimitrovgrad (Fédération de Russie). Les problèmes rencontrés en ce qui concerne l'approvisionnement en molybdène 99 produit par fission, et par conséquent les générateurs de technétium 99m, ont aussi beaucoup stimulé l'intérêt pour l'étude et la mise au point de technologies de substitution pour leur production, en particulier celles qui n'utilisent pas de l'uranium hautement enrichi. En outre, le recours à des méthodes basées sur les accélérateurs pourrait contribuer à réduire la dépendance vis-à-vis des réacteurs anciens utilisés pour la production de molybdène 99 par fission. Des chercheurs canadiens examinent la possibilité de produire directement du technétium 99m en cyclotron comme mesure de substitution à court terme dans les centres médicaux situés à proximité de cyclotrons de faible ou moyenne énergie.

23. Parmi les faits marquants récents survenus dans les applications industrielles de la technologie des rayonnements, on peut signaler les méthodes intégrées basées sur les radiotraceurs et la simulation par ordinateur pour la gestion des sédiments. En 2009-2010, des études basées sur les radiotraceurs mettant en jeu l'utilisation de poudre de verre marquée au scandium 46 comme traceur ont été effectuées dans une décharge existante et deux zones proposées de décharge en Inde. Il ressort des résultats que le site existant et l'un des sites proposés étaient appropriés pour l'immersion des sédiments de dragage, contrairement à l'autre site proposé.

## A. Applications énergétiques

### A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

24. Pour la septième année consécutive, le nombre de nouveaux réacteurs mis en construction a augmenté. Loin du niveau record de 44 en 1976, les 16 mises en chantier de 2010, chiffre le plus élevé depuis 1985, représentent toutefois une augmentation sensible par rapport aux années 90 et au début des années 2000.

25. Au 31 décembre 2010, il y avait 441 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité de production totale de 375 GWe (voir tableau A-1). Cela représente une augmentation de 4 GWe de la capacité totale à la fin de 2009, augmentation due essentiellement au fait que cinq nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau (Lingao-3 (1 000 MWe) et Qinshan 2-3 (610 MWe) en Chine, Rajasthan-6 (202 MWe) en Inde, Rostov-2 (950 MWe) en Fédération de Russie et Shin Kori 1 (960 MWe) en République de Corée) alors qu'un seul a été mis à l'arrêt (Phenix (130 MWe) en France).

26. Il y a eu 16 mises en chantier en 2010 : Angra-3 au Brésil; Changjiang-1 et -2, Fangchenggang-1 et 2, Fuqing -3, Haiyang-2, Ningde-3 et -4, Taishan-2, et Yangjiang-3 en Chine ; Kakrapar-3 et -4 en Inde ; Ohma au Japon ; et Leningrad 2-2 et Rostov-4 en Fédération de Russie. À titre de comparaison, il y en avait eu 12 ainsi que la reprise de la construction active de deux réacteurs en 2009, et dix en 2008.

27. Au 31 décembre 2010, 67 réacteurs étaient en construction, soit le nombre le plus élevé depuis 1990.

28. L'expansion et les perspectives de croissance à court et à long terme sont restées concentrées en Asie. Sur les 16 réacteurs mis en chantier en 2010, 13 se trouvaient en Asie. Comme le montre le tableau A-1, sur les 67 réacteurs qui étaient en construction, 45 étaient en Asie, de même que 34 des 43 derniers réacteurs couplés au réseau.

29. En 2010, les tendances à augmenter la capacité et à renouveler ou à proroger les licences de nombreux réacteurs en service se sont poursuivies. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a renouvelé la licence d'exploitation de la centrale nucléaire Cooper, dans le Nebraska, et du Duane Arnold Energy Center, dans l'Iowa, pour 20 années supplémentaires, ce qui porte à 61 le nombre de renouvellements de licences approuvés depuis l'an 2000. En outre, la NRC a approuvé six demandes d'augmentation de la capacité en 2010 et examinait 12 demandes d'augmentation de la puissance, représentant un total d'environ 1 355 MWe. Au Royaume-Uni, le Service d'inspection des installations nucléaires a approuvé la prolongation de la licence d'exploitation de la centrale Wylfa dotée de deux tranches jumelles pour un maximum de deux années supplémentaires. Il a également approuvé la prorogation pour cinq ans des licences de 30 ans de quatre réacteurs à Hartlepool et Heysham-1. En Fédération de Russie, le Service fédéral de supervision environnementale, technologique et nucléaire a prolongé de 15 ans la licence d'exploitation de la tranche 4 de la centrale nucléaire Leningrad.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 31 décembre 2010)<sup>a</sup>

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2010		Expérience d'exploitation totale en 2010	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du Total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			12,90	5,18	52	3
ALLEMAGNE	17	20 490			133,01	28,38	768	5
ARGENTINE	2	935	1	692	6,69	5,91	64	7
ARMÉNIE	1	375			2,29	39,42	36	8
BELGIQUE	7	5 926			45,73	51,16	240	7
BRÉSIL	2	1 884	1	1 245	13,90	3,06	39	3
BULGARIE	2	1 906	2	1 906	14,24	33,13	149	3
CANADA	18	12 569			85,50	15,07	600	2
CHINE	13	10 058	28	28 230	70,96	1,82	111	2
CORÉE, REPUBLIQUE DE	21	18 698	5	5 560	141,89	32,18	360	1
ESPAGNE	8	7 514			59,26	20,09	277	6
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	101 240	1	1 165	807,08	19,59	3 603	11
FÉDÉRATION DE RUSSIE	32	22 693	11	9 153	159,41	17,09	1026	5
FINLANDE	4	2 716	1	1 600	21,89	28,43	127	4
FRANCE	58	63 130	1	1 600	410,09	74,12	1 758	4
HONGRIE	4	1 889			14,66	42,10	102	2
INDE	19	4 189	6	3766	20,48	2,85	337	3
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'			1	915				
JAPON	54	46 821	2	2 650	280,25	29,21	1 494	8
MEXIQUE	2	1 300			5,59	3,59	37	11
PAKISTAN	2	425	1	300	2,56	2,60	49	10
PAYS BAS	1	482			3,75	3,38	66	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 678			26,44	33,27	116	10
ROUMANIE	2	1 300			10,70	19,48	17	11
ROYAUME-UNI	19	10 137			56,85	15,66	1 476	8
SLOVAQUIE	4	1 816	2	782	13,54	51,80	136	7
SLOVÉNIE	1	666			5,38	37,30	29	3
SUÈDE	10	9 303			55,73	38,13	382	6
SUISSE	5	3 238			25,34	38,01	179	11
UKRAINE	15	13 107	2	1900	83,95	48,11	383	6
Total <sup>b, c</sup>	441	375 267	67	64 064	2 629,95	NA	14 353	4

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

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

Taiwan (Chine) : 6 réacteurs (4 982 MW) en service ; 2 réacteurs (2 600 MW) en construction ;

39,89 TW h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 19,3 % de la production électrique totale.

c. L'expérience d'exploitation totale tient compte également de centrales à l'arrêt en Italie (81 ans), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) et à Taïwan (Chine) (176 ans et un mois).

30. Dans certains pays européens qui imposaient précédemment des restrictions à l'utilisation future de l'électronucléaire, la tendance à reconsidérer ces politiques, amorcée en 2009, s'est poursuivie en 2010. En Espagne, le gouvernement a approuvé une prolongation de licence de dix ans pour les deux tranches de la centrale nucléaire d'Almarez et pour la tranche 2 de la centrale de Vandellos. En novembre 2010, la CE a officiellement lancé la plateforme technologique européenne pour l'énergie nucléaire durable (ESNNI) à l'appui du Strategic Energy Technology Plan (SETP) de l'UE. La ESNNI prend en considération la nécessité de faire la démonstration des technologies applicables aux réacteurs à neutrons rapides de génération IV ainsi que les infrastructures de recherche connexes, les installations de combustible et les activités de R-D. La ESNNI fait porter l'essentiel de son action sur la conception et la construction de prototypes de la prochaine génération de systèmes nucléaires, sur les différentes façons de prolonger la durée de vie opérationnelle des centrales nucléaires existantes et sur la mise au point de solutions pour la gestion des déchets radioactifs à long terme.

31. L'intérêt pour l'examen de l'option électronucléaire était toujours élevé, plus de 60 États Membres ayant indiqué à l'Agence leur désir d'envisager d'introduire cette forme d'énergie. L'AIEA offre à ces États Membres une assistance diversifiée y compris des normes et des orientations, un appui technique accru, des services d'examen, un soutien en matière de création de capacités et des réseaux de connaissances. Elle a effectué une mission d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) en Thaïlande en décembre 2010.

## **A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire**

32. Chaque année, l'Agence actualise ses projections haute et basse de la croissance mondiale de l'électronucléaire. En 2010, malgré une morosité économique mondiale soutenue, les perspectives pour cette technologie ont été bonnes. La projection basse de l'Agence concernant la capacité mondiale, qui a été revue à la hausse en 2010 pour passer, pour l'année 2030, de 511 GWe (projection de 2009) à 546 GWe, en témoigne. Dans la projection haute actualisée, la capacité mondiale a atteint 803 GWe, accusant une légère baisse par rapport à la projection de 2009, qui était de 807 GWe. La différence entre ces deux projections pour 2030 était toujours élevée, bien qu'elle ait été ramenée à 257 GWe.

33. La tendance à la hausse relevée dans les deux projections de 2010 est la plus marquée pour l'Asie, région comprenant non seulement des pays qui ont aujourd'hui des programmes électronucléaires commerciaux comme la Chine, l'Inde, le Japon, la République de Corée et le Pakistan, mais aussi plusieurs primo-accédants, dont on peut raisonnablement prévoir qu'ils auront des centrales nucléaires en service d'ici à 2030 (voir la figure A-1). Dans la projection basse, cette région représente à elle seule 85 % de la croissance de la capacité nucléaire nette entre 2009 et 2030. La forte demande en énergie – en particulier en électricité — est tirée par la croissance démographique constante, l'accélération des aspirations au développement économique et les préoccupations au sujet de la sécurité énergétique. Cette forte demande, associée à un futur très probablement marqué par des prix élevés et instables des combustibles fossiles ainsi que par la prise en compte des questions environnementales, a encouragé la recherche de sources d'énergie à faible émission de carbone, dont l'électronucléaire est une composante.

34. D'après les projections de 2010, pour le reste du monde, sauf pour les pays de la Communauté d'États indépendants (CEI) où la hausse projetée est plus importante, l'augmentation prévue de la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire n'est que modeste. Les incertitudes concernant la demande en électricité — dues à la faible reprise économique, aux doutes quant à la conclusion d'un nouvel accord international sur le changement climatique et à l'avenir en général, et à la prudence financière toujours de mise depuis la crise financière — s'étaient traduites par une attitude attentiste en Europe et en Amérique du Nord. Dans cette dernière, la poussée récente des approvisionnements bon marché en gaz de schiste peut avoir grandement contribué à la révision à la baisse des prévisions.

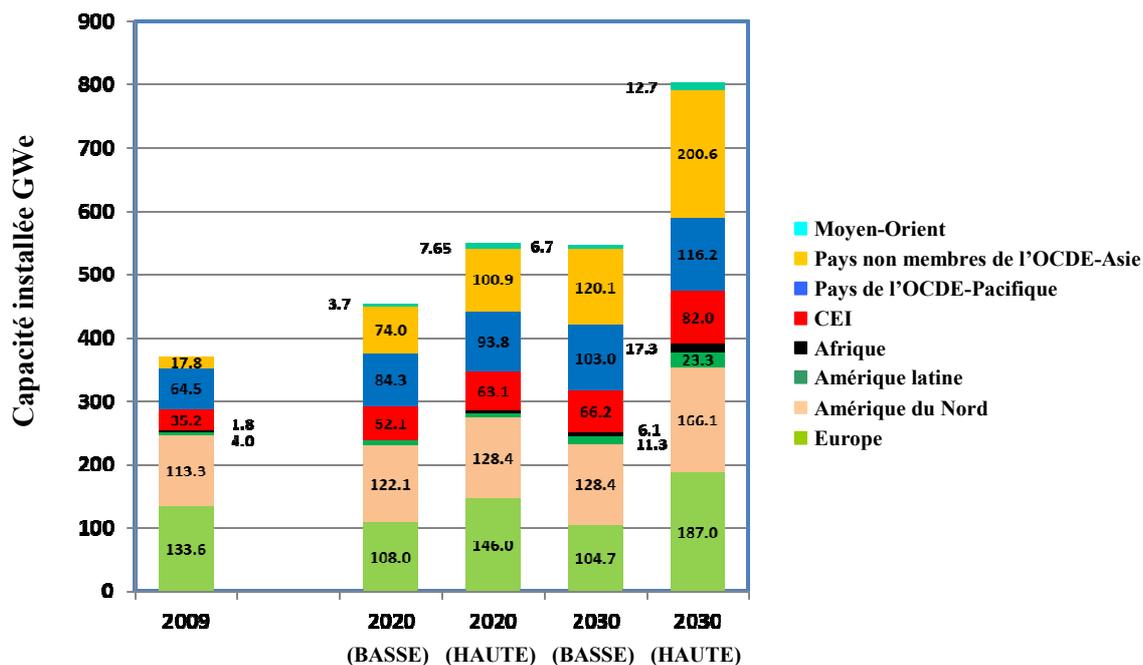


FIG. A-1. Développement des capacités régionales de production d'électricité d'énergie nucléaire, 2009-2030, projections basse et haute 2010.

35. La projection haute semble montrer que des facteurs à moyen et long termes relevant les prévisions revenaient en force en 2010, à savoir la bonne performance et la sûreté constantes des centrales nucléaires, les préoccupations persistantes concernant le réchauffement de la planète, la sécurité des approvisionnements énergétiques et les prix élevés et instables des combustibles fossiles, ainsi que la projection d'une croissance soutenue de la demande énergétique à moyen et long termes. Une reprise économique plus rapide dans les projections de 2010 se traduit par une augmentation de la demande en électricité, qui donne lieu à une expansion de la production électronucléaire dans toutes les régions. Toutefois, l'Asie représente près de 60 % de l'augmentation de la capacité mondiale et, encore une fois, se place en tête dans la projection haute. Viennent ensuite les pays électronucléaires traditionnels de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et de la CEI, tandis que les primoaccédants ne montrent les premiers signes de forte pénétration du marché qu'aux environs de la période 2025-2030.

36. Les projections figurant dans les perspectives énergétiques mondiales 2010 (*2010 World Energy Outlook*) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE (Figure A-2), sont très semblables à celles de l'AIEA pour 2010, et le scénario « Politiques actuelles » prévoit une capacité installée totale mondiale de 535 GWe d'ici à 2030 (contre 546 GWe pour la projection basse de l'AIEA) et selon le scénario à 450 ppm<sup>2</sup>, la capacité électronucléaire s'établira à 760 GWe d'ici à 2030 (chiffre proche des 803 GWe prévus dans la projection haute de l'AIEA).

<sup>2</sup> Le scénario 450 limite la concentration maximale des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à 450 parties par million (ppm) et suppose une transformation en profondeur du système énergétique mondial.<sup>3</sup> De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le cycle du combustible figurent dans les sections .

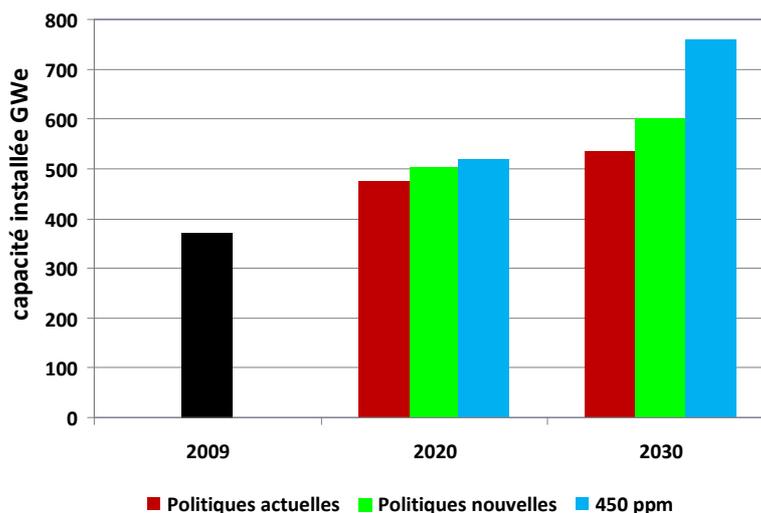


FIG. A-2. Impact des différentes politiques sur l'expansion mondiale de l'électronucléaire entre 2009 et 2030 (Source : 2010 World Energy Outlook).

### A.3. Cycle du combustible<sup>3</sup>

#### A.3.1. Ressources et production d'uranium

37. En 2010, l'AEN et l'AIEA ont publié la dernière édition du « Livre rouge », *Uranium 2009 : Ressources, production et demande*. Celui-ci estimait à 5,4 millions de tonnes (MtU) les ressources traditionnelles répertoriées d'uranium dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU. Ce chiffre est inférieur de 1,2 % aux estimations de l'édition précédente. En outre, il évaluait à 0,9 MtU celles dont les coûts de récupération s'établissent entre 130 \$/kgU et 260 \$/kgU, ce qui porte à 6,3 MtU le total des ressources traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 260 \$/kgU. Pour référence, le prix au comptant de l'uranium en 2010 a varié entre 105 \$/kgU et 115 \$/kgU jusqu'au milieu de l'année avant d'augmenter fortement pour atteindre 160 \$/kgU à la fin de l'année, soit le prix le plus élevé en deux ans.

38. Le total des ressources non découvertes (ressources pronostiquées et hypothétiques) indiqué dans le Livre rouge était supérieur à 10,4 MtU, soit une légère baisse par rapport aux 10,5 MtU mentionnées dans l'édition précédente (publiée en 2008). Les ressources traditionnelles non découvertes étaient estimées à plus de 6,5 MtU pour un coût inférieur à 130 \$/kgU, auxquelles viennent s'ajouter 0,37 MtU pour un coût s'établissant entre 130 \$/kgU et 260 \$/kgU. Il s'agit notamment des ressources que l'on compte découvrir dans des gisements connus ou dans leurs alentours et de ressources plus hypothétiques dont on pense qu'elles existent dans des zones géologiquement favorables, mais encore inexplorées. Selon les estimations, il y aurait en outre 3,6 MtU de ressources hypothétiques dont les coûts de production n'ont pas encore été calculés.

39. Les ressources non traditionnelles d'uranium et le thorium viennent s'ajouter aux autres ressources. Les ressources non traditionnelles comprennent l'uranium de l'eau de mer et celles pour lesquelles l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit mineur. Actuellement, très peu de

<sup>3</sup> De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le cycle du combustible figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel de l'AIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010>) et sur <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.

pays déclarent les ressources non traditionnelles. Les précédentes estimations d'uranium potentiellement récupérable associé à des phosphates, des minerais non ferreux, de la carbonatite, du schiste noir et de la lignite sont de l'ordre de 10 MtU. Les ressources mondiales de thorium sont estimées à environ 6 Mt. Bien que le thorium soit utilisé comme combustible à des fins de démonstration, des travaux importants sont encore nécessaires avant qu'il ne puisse égaler l'uranium.

40. Les données sur les coûts de prospection et d'exploitation minières ne sont mentionnées dans le Livre rouge que jusqu'en 2008. Ils s'élèvent au total à 1,641 milliard de dollars en 2008, soit une augmentation de 133 % par rapport aux chiffres de 2006 indiqués dans l'édition précédente du Livre rouge.

41. En 2009, la production totale d'uranium dans le monde était de plus de 50 770 tU, soit une hausse de 16 % par rapport à celle de 2008 (43 800 tU). Selon les estimations, la production devrait augmenter en 2010 pour atteindre 55 000 tU. L'Australie, le Canada et le Kazakhstan représentaient 63 % de la production mondiale en 2009, et avec la Namibie, le Niger, la Fédération de Russie, l'Ouzbékistan et les Etats-Unis, ils en représentaient 93 %. Au Kazakhstan, la production d'uranium en 2009 a augmenté de plus de 70 % par rapport à 2008, ce qui en fait de loin le premier producteur mondial d'uranium en 2009 (remontant de la cinquième place en 2003 et de la deuxième place en 2008). En outre, la production totale d'uranium dans ce pays en 2010 devrait augmenter de 30 % par rapport à 2009. Au Malawi, la production d'uranium a commencé en 2009 (100 tU) et, en 2010, elle a atteint 660 tU.

42. En 2009, la production d'uranium n'a couvert qu'environ 82 % des besoins estimés des réacteurs dans le monde (61 730 tU), le reste l'ayant été grâce à cinq sources secondaires : les stocks d'uranium naturel et enrichi, le retraitement de l'uranium à partir de combustible usé, le combustible à mélange d'oxydes (MOX), dont l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium 239 provenant de combustible usé retraité, et le ré-enrichissement de résidus d'uranium appauvri (contenant moins de 0,7 % de <sup>235</sup>U). Au rythme de consommation estimé pour 2009, les 5,4 MtU de ressources d'uranium traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU devraient durer environ 90 ans. Cela soutient avantageusement la comparaison avec les réserves d'autres produits de base (cuivre, zinc, pétrole et gaz naturel), dont la durée varie entre 30 et 50 ans.

43. Sur la base des prévisions disponibles en 2010, les besoins annuels mondiaux en uranium pour les réacteurs devraient augmenter pour s'établir entre 87 370 tU et 138 165 tU d'ici à 2035. Les capacités de production primaire d'uranium actuellement projetées, incluant les installations existantes, commandées, prévues et envisagées de production d'uranium, pourraient répondre à la demande mondiale en uranium projetée jusqu'en 2028, si l'on considère la tranche supérieure de la fourchette de la demande, ou jusqu'en 2035 si l'on considère la tranche inférieure. Au-delà, pour que la production permette d'approvisionner tous les réacteurs pendant toute leur durée de vie opérationnelle, y compris les réacteurs qui seront connectés au réseau jusqu'en 2035, des ressources supplémentaires devront être identifiées, de nouvelles mines devront être exploitées et les mines existantes devront être développées en temps utile.

### **A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible**

44. La capacité mondiale de conversion est restée stable en 2010 avec environ 76 000 tonnes d'uranium naturel (tU) par an pour l'hexafluorure d'uranium (UF<sub>6</sub>) et de 4 500 tU par an pour le dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>). La demande de conversion en UF<sub>6</sub> a également été stable, avec 62 000 tU par an.

45. La capacité mondiale d'enrichissement est actuellement d'environ 60 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande totale d'environ 45 millions d'UTS par an. À la fois pour remplacer les installations anciennes de diffusion gazeuse et pour anticiper une expansion

mondiale de l'électronucléaire, quatre installations commerciales d'enrichissement, utilisant toutes l'enrichissement par centrifugation, sont à l'étude ou en construction : Georges Besse II en France, et l'Installation américaine de centrifugation (ACP), l'installation Areva Eagle Rock et l'installation URENCO USA (auparavant appelée Installation nationale d'enrichissement (NEF)) aux États-Unis. L'exploitation commerciale de l'installation Georges Besse II a commencé en décembre 2010 avec la livraison du premier conteneur d'uranium. Pour ce qui est de l'installation URENCO USA, les opérations commerciales ont démarré en juin 2010. En outre, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a remis un rapport d'évaluation de la sûreté favorable concernant l'installation d'enrichissement par laser (3 à 6 millions d'UTS) proposée par Global Laser Enrichment (GLE) en Caroline du Nord. La phase initiale du programme relatif à la boucle d'essai pour la technologie d'enrichissement par séparation d'isotopes par excitation au laser (SILEX) a été achevée avec succès par le GLE.

46. Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) pense commencer l'exploitation commerciale de cascades de centrifugeuses améliorées à Rokkasho-mura en 2011-2012 et étendre la capacité actuelle de 150 000 UTS à 1,5 million UTS d'ici à 2020. En 2010, l'Arménie et l'Ukraine ont rejoint la Fédération de Russie et le Kazakhstan au sein du Centre international d'enrichissement d'uranium (CIEU), créé en 2007 à Angarsk (Fédération de Russie). L'Argentine a mené à bien des activités de recherche-développement sur de nouvelles techniques d'enrichissement (par centrifugation et par laser) tout en reconstituant sa capacité de diffusion gazeuse à Pilcaniyeu. L'usine de Pilcaniyeu remise en état devrait entrer en service en 2011.

47. En 2010, trois installations de déconversion ont été mises en service, deux aux États-Unis d'Amérique (à Paducah dans le Kentucky et à Portsmouth dans l'Ohio) et une (W-ECP à Krasnoyarsk) dans la Fédération de Russie. La capacité totale de déconversion s'établit actuellement à 60 000 t par an.

48. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA dont celle-ci sera propriétaire et assurera la gestion, et qui servira de ressource de dernier recours pour la production d'électricité d'origine nucléaire. Si l'approvisionnement en UFE d'un État Membre est interrompu et s'il ne peut être rétabli par le marché commercial, des arrangements entre États ou tout autre moyen de ce genre, cet État Membre peut faire appel à la banque d'UFE de l'AIEA. La banque d'UFE est un instrument supplémentaire visant à assurer la fourniture de matières nucléaires pour le combustible et fait suite à l'accord approuvé par le Conseil en novembre 2009 et signé par l'Agence et la Fédération de Russie en mars 2010, en vue de la constitution d'une réserve d'UFE pour approvisionner les États Membres de l'AIEA. En décembre 2010, la réserve de combustible, d'une capacité prévue de 120 tonnes, a été entièrement approvisionnée par la Société nationale d'énergie atomique russe Rosatom et placée sous les garanties de l'AIEA à l'installation nucléaire d'Angarsk, en Sibérie.

49. La capacité mondiale de fabrication de combustible s'est maintenue à environ 13 000 tU par an (uranium enrichi) pour le combustible des réacteurs à eau ordinaire (REO) et à environ 4 000 tU par an (uranium naturel) pour le combustible des réacteurs à eau lourde sous pression (REL). La demande totale était également stable (environ 10 400 tU par an). Des installations existantes sont en cours d'expansion en Chine, en République de Corée et aux États-Unis d'Amérique et de nouvelles installations de fabrication sont prévues au Kazakhstan et en Ukraine. Celle du Kazakhstan, qui devrait avoir une capacité de 400 tU par an, est construite dans le cadre d'une co-entreprise entre AREVA et Kazatomprom et devrait être achevée en 2014.

50. Les capacités actuelles de fabrication de combustible à mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (MOX), essentiellement situées en France, en Inde et au Royaume-Uni avec quelques petites installations en Fédération de Russie et au Japon, avoisinent les 250 tonnes de métaux

lourds (tML). En octobre 2010, la JNFL a commencé à construire une nouvelle installation de fabrication de combustible MOX (130 tML) dans le village de Rokkasho (préfecture d'Aomori). Elle devrait être achevée en mars 2016. Une installation similaire est prévue à Seversk (Tomsk-7), en Fédération de Russie. En outre, ce pays a aussi planifié une installation commerciale d'une capacité de 60 t par an pour fabriquer du combustible MOX, ainsi qu'une installation d'une capacité de 14 tonnes par an pour produire du combustible au nitrure mixte dense pour réacteurs à neutrons rapides. Au Royaume-Uni, une nouvelle installation de fabrication de combustible MOX est actuellement en train d'être ajoutée à l'usine MOX de Sellafield (SMP) pour permettre d'honorer de nouveaux contrats de fourniture à long terme de MOX. D'autres usines de fabrication de combustible MOX sont en construction aux États-Unis pour utiliser les surplus de plutonium de qualité militaire. Les réacteurs Ikata-3 et Fukushima Daiichi-3, au Japon, ont commencé à employer du combustible MOX en 2010. Dans le monde, 33 réacteurs thermiques utilisent actuellement ce type de combustible.

### **A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible**

51. La quantité totale de combustible usé qui a été déchargée dans le monde est d'environ 320 000 tML, dont environ 95 000 tML ont déjà été retraitées et environ 225 000 tML ont été entreposées dans des bassins d'entreposage sur le site de réacteurs ou dans des installations d'entreposage hors du site de réacteurs. Les installations d'entreposage hors du site de réacteurs sont régulièrement agrandies. La capacité mondiale de retraitement est d'environ 5 000 tML par an. Les derniers essais de mise en service ont commencé à la nouvelle installation de retraitement de Rokkasho (Japon), qui devrait ainsi démarrer en 2012. La Chine construit actuellement une usine de retraitement pilote et des essais à chaud ont été achevés à la fin 2010. Elle prévoit également de construire une installation commerciale de retraitement et le processus du choix du site est toujours en cours.

52. Une démonstration de l'emploi direct d'uranium recyclé comme combustible dans un réacteur CANDU a commencé à la centrale nucléaire de Qinshan (Chine).

53. En Inde, on construit actuellement la première installation du cycle du combustible du réacteur à neutrons rapides, incluant une usine de fabrication et de retraitement du combustible, une usine de sous-assemblages pour cœurs de réacteurs, une usine d'oxyde d'uranium retraité et une usine de gestion des déchets, qui serviront au prochain prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MW.

### **A.3.4. Gestion des déchets radioactifs et déclassé**

54. Le stock mondial de déchets radioactifs déclarés entreposés en 2008 (dernière année pour laquelle on dispose de données) était d'environ 17,6 millions de mètres cubes<sup>4</sup> (tableau A-2). Le volume de déchets radioactifs stockés définitivement est d'environ 640 000 mètres cubes par an et comprend essentiellement des déchets de faible et très faible activité (DFA et DTFA, ci-après dénommés DFMA-CP<sup>5</sup>). Le volume total de déchets stockés définitivement en 2008 était d'environ 24,6 millions de mètres cubes. L'accumulation annuelle de déchets de haute activité (DHA) traités reste assez constante, avec un taux moyen d'accumulation d'environ 850 mètres cubes par an dans le monde.

---

<sup>4</sup> Estimation calculée à l'aide de la base de données internet sur la gestion des déchets (NEWMDB) de l'AIEA et d'autres sources librement accessibles pour les pays ne communiquant pas de données dans cette base.

<sup>5</sup> Le stock de la NEWMDB est actuellement répertorié selon les recommandations de classification des déchets formulées par l'Agence en 1994, qui figurent dans le document de la collection Sécurité n° 111-G-1.1, intitulé *Classification of Radioactive Waste*. Elles ont été remplacées récemment par un nouveau système de classification, qui est présenté dans le guide général de sûreté n° GSG-1 intitulé *Classification of Radioactive Waste* (2009). Les données de la NEWMDB sont actuellement converties au nouveau système de classification.

Tableau A-2. Estimation mondiale du stock de déchets radioactifs pour 2008

<b>Classe de déchets</b>	<b>Entreposage</b> [mètres cubes]	<b>Stockage définitif cumulé</b> [mètres cubes]
<b><i>Déchets de faible ou moyenne activité à courte période (DFMA-CP)</i></b>	<b>3 618 000</b>	<b>24 349 000</b>
<b><i>Déchets de faible ou moyenne activité à longue période (DFMA-LP)</i></b>	<b>13 609 000</b>	<b>208 000</b>
<b><i>Déchets de haute activité (DHA)</i></b>	<b>384 000</b>	<b>4 000</b>

Source : NEWMDB, 2010

55. Les déchets de haute activité sont encore vitrifiés dans plusieurs pays à l'aide de fours à induction en creuset chaud ou de fours chauffés par effet joule. L'utilisation d'un four à induction en creuset froid à l'atelier R7 de La Hague (France) reste un exemple de progrès dans ce domaine. Au Royaume-Uni, l'installation de vitrification de Sellafield a franchi une étape importante en 2009, lorsqu'elle a produit le 5 000<sup>e</sup> conteneur de déchets solides de haute activité. La JNFL a encore rencontré des difficultés en 2010 avec son unité de vitrification et a dû repousser l'exploitation commerciale de l'usine de retraitement de Rokkasho de deux autres années. À Hanford (États-Unis), la construction de la plus grande usine de traitement des déchets est achevée à environ 50 %. Cette usine, d'un coût de 12 milliards de dollars qui devrait entrer en service en 2019, traitera et stabilisera quelque 200 000 m<sup>3</sup> de déchets complexes divers hérités du passé d'abord en les prétraitant, puis en les vitrifiant.

56. Plus de 50 États Membres étudient des solutions de rechange ou ont commencé à mettre au point des options de stockage définitif appropriées pour leurs stocks de déchets. Ces options sont notamment les suivantes : stockage définitif en tranchées des DTFA (Espagne, France), des déchets de matières radioactives naturelles (Malaisie, République arabe syrienne) ou des DFA dans des régions arides (Afrique du Sud, États-Unis d'Amérique, République islamique d'Iran) ; ouvrages artificiels à faible profondeur pour les DFA (Belgique, Bulgarie, Lituanie, Roumanie, Slovaquie) ; stockage définitif à moyenne profondeur des DFMA (Hongrie, République de Corée, Japon) et des déchets de matières radioactives naturelles (Norvège) ; et stockage en puits des DFA (États-Unis d'Amérique) et des sources radioactives scellées retirées du service (Ghana, Philippines, République islamique d'Iran). La Finlande et la Suède sont en train d'établir la documentation requise pour les autorisations de construction d'installations de stockage géologique prévues pour du combustible usé.

57. En janvier 2010, un décret est entré en vigueur en Slovaquie ; il confirme l'utilisation d'un site pour le dépôt de DFMA près de la seule centrale nucléaire du pays. Les travaux de construction devraient démarrer dans deux ou trois ans. Au Canada, la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) a entamé en mai 2010 un processus visant à sélectionner un site d'entreposage permanent où pourrait être établi un dépôt géologique profond pour le combustible nucléaire usé en invitant les milieux intéressés à se présenter. En Allemagne, la construction d'un dépôt souterrain de DFMA a commencé à l'ancienne mine de fer de Konrad, en Basse-Saxe. En Suède, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a soumis, en mars 2011, sa demande d'établissement d'un dépôt géologique pour le stockage définitif du combustible usé à Östhammar. La construction de ce dépôt devrait commencer en 2015 et les opérations de stockage définitif en 2025. Sur le site d'Olkiluoto, en Finlande, le tunnel d'accès d'Onkalo a été creusé pour atteindre, fin 2010, une longueur de 4 570 m et une profondeur de stockage définitif de 434 m. Le tunnel d'accès et les

autres structures souterraines seront ensuite utilisés pour le stockage définitif. La demande d'autorisation de construction devrait être présentée en 2012 et la délivrance de l'autorisation d'exploitation avoir lieu aux environs de 2020.

58. Aux États-Unis d'Amérique, la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis a été créée en janvier 2010 suite à la décision prise en 2009 par l'administration américaine de ne pas mettre à exécution le projet concernant le site de dépôt géologique de Yucca Mountain. La Commission, établie pour donner des recommandations sur la mise au point d'une solution à long terme pour la gestion du combustible nucléaire usé et des déchets nucléaires des États-Unis, prévoit de s'occuper de l'entreposage temporaire de combustible usé pour des périodes allant de 120 ans jusqu'à 300 ans. Un premier rapport intérimaire devrait être publié en juillet 2011 et le rapport final de la Commission en 2012. En outre, le président de la NRC a demandé aux membres de son personnel, en octobre 2010, de stopper l'examen de la demande d'autorisation pour le site de Yucca Mountain.

59. L'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a présenté une nouvelle édition du plan national pour la gestion des matières radioactives. Cette édition inclut un projet de stockage géologique réversible à long terme des déchets de haute et moyenne activité ainsi qu'un projet de stockage définitif à faible profondeur des déchets radioactifs de faible activité. La France progresse dans ses préparatifs en vue de la construction de son dépôt géologique pour les DHA ; l'installation recevra également des déchets nationaux de moyenne activité (DMA).

60. De nombreuses initiatives bilatérales et multilatérales ont été lancées en collaboration avec l'Agence pour améliorer le contrôle des sources radioactives scellées et les retirer des emplacements qui ne sont pas sûrs et sécurisés. Les sources de haute activité posent des problèmes particuliers car des contraintes importantes empêchent de les déplacer facilement. La cellule chaude mobile, technologie mise au point par l'organisme sud-africain Nuclear Energy Corporation of South Africa (Necsa), sous contrat avec l'Agence, a été utilisée en 2010 en Uruguay pour extraire 14 composants contenant des sources de haute activité des dispositifs dans lesquels ils étaient logés, et les conditionner dans des conteneurs de transport pour les réexpédier dans leur pays d'origine.

61. En novembre 2010, la Commission européenne a publié une proposition de directive du Conseil sur la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs qui prévoyait notamment de demander aux États Membres de l'UE de présenter leur programme national en indiquant quand, où et comment ils construiraient et gèreraient des dépôts de stockage définitif garantissant les normes de sûreté les plus strictes.

## **Déclassement**

62. Les statistiques du déclassement des réacteurs de puissance dans le monde n'ont pas beaucoup varié en 2010. À la fin de l'année, 124 réacteurs de puissance étaient mis à l'arrêt. Quinze d'entre eux étaient complètement démantelés, 52 étaient en cours de démantèlement ou devant être démantelés à court terme, 48 étaient mis en attente sûre, trois étaient placés sous massif de protection, et pour six autres, les stratégies de déclassement n'avaient pas encore été déterminées.

63. Le processus de démantèlement du réacteur de recherche Moata de l'Australian Nuclear Science and Technology (Organisation australienne de la science et la technologie nucléaires), premier réacteur à avoir été démantelé en Australie, a commencé en juillet 2009 avec le démantèlement préliminaire et l'élimination de tous les composants internes. Le démantèlement du bouclier biologique a débuté en mars 2010 et a été achevé en septembre 2010. Le démantèlement du réacteur de type Argonaute de 100 kW (th) a été mené à bien dans le cadre du budget convenu (4,2 millions de dollars australiens) et de la durée totale du projet, qui était de deux ans à compter de la date de réception de l'autorisation de démantèlement en vue de la libération du site.

64. En Europe centrale et orientale, le déclassé de réacteurs à l'arrêt a commencé à progresser grâce à certains projets en cours en Bulgarie, en Lituanie, en Slovaquie et en Ukraine. Toutes les centrales nucléaires d'Europe centrale et orientale ont élaboré des plans de déclassé préliminaires respectant les recommandations de l'Agence, ou sont sur le point d'en achever.

65. Des initiatives sont actuellement menées pour répondre à la question des déchets radioactifs hérités du passé, qui se sont accumulés aux premiers stades de la science et de l'industrie nucléaires ainsi que lors du développement des technologies nucléaires pour la défense. Le Groupe de contact d'experts établi par l'Agence, créé en 1996, s'est révélé être un cadre efficace pour l'échange d'informations et la coordination des programmes relatifs à l'héritage nucléaire en Fédération de Russie. Fin 2010, la Fédération de Russie, avec l'aide notable de partenaires internationaux qui ont financé le programme à hauteur d'un tiers, a déchargé de leur combustible et démantelé 191 sous-marins nucléaires déclassés. Quatre sous-marins sont actuellement en cours de déclassé et cinq devraient être démantelés avant la fin de l'année 2012. Les unités de réacteurs des sous-marins, qui contiennent généralement deux réacteurs déchargés de leur combustible, sont scellées puis placées dans une installation d'entreposage à long terme. Deux centres régionaux de conditionnement et d'entreposage à long terme de déchets radioactifs sont actuellement mis en place. En outre, un programme conjoint de récupération des générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (GTR) qui étaient utilisés pour la navigation le long des côtes de la Fédération de Russie est également en cours et la plupart des 870 GTR russes ont été récupérés. Il n'en reste que 248.

#### **A.4. Sûreté<sup>6</sup>**

66. Les indicateurs de sûreté, tels que ceux publiés par l'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO) et reproduits dans les figures A-3 et A-4, se sont nettement améliorés dans les années 1990. Ces dernières années, la situation s'est stabilisée dans la plupart des domaines, et des progrès ont encore été enregistrés en 2009. Toutefois, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant de vastes possibilités d'amélioration. Des informations et les évolutions récentes concernant la sûreté pour l'ensemble des applications nucléaires jusqu'à la fin de 2010 sont présentées plus en détail dans le *Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour l'année 2010*.

---

<sup>6</sup> De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010/>) et sur le site <http://www-ns.iaea.org/>.

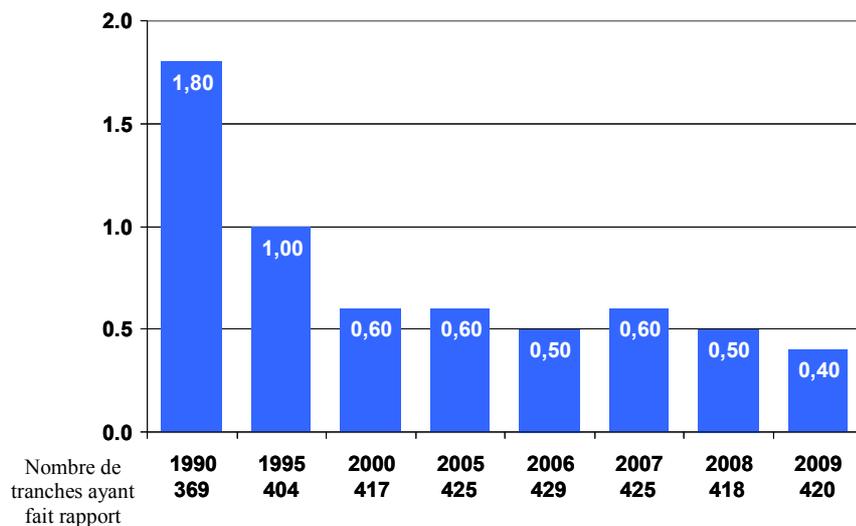


FIG. A-3. Arrêts d'urgence automatiques non planifiés pour 7 000 heures de criticité (Source : indicateurs de performance WANO en 2009).

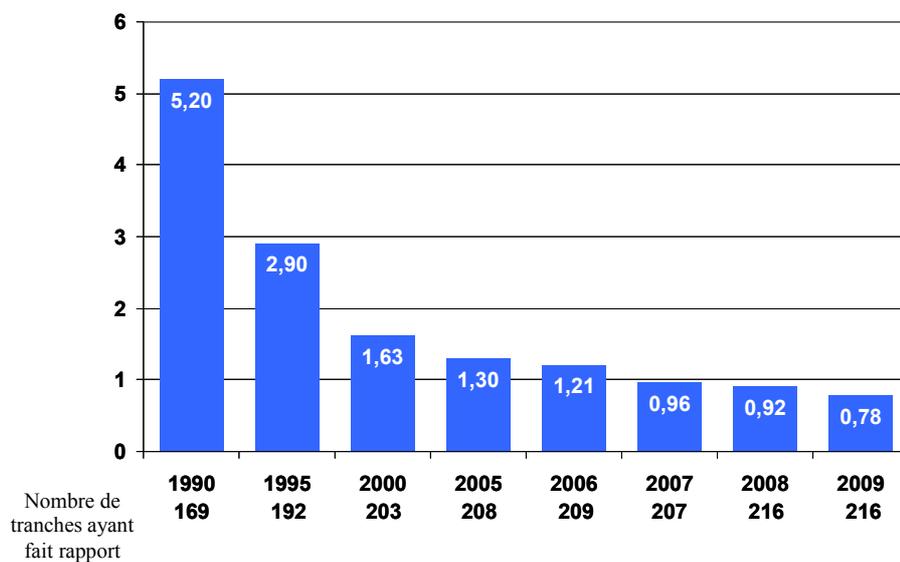


FIG. A-4. Taux d'accidents relevant de la sûreté industrielle dans les centrales nucléaires par million d'heures ouvrées (Source : indicateurs de performance WANO en 2009). Note : Ces incidents ne sont pas nécessairement de nature radiologique.

## **B. Fission et fusion avancées**

### **B.1. Fission avancée<sup>7</sup>**

#### **B.1.1. Réacteurs refroidis par eau<sup>8</sup>**

67. En ce qui concerne les réacteurs de faible et moyenne puissance, l'Argentine a commencé à se préparer en vue de la construction d'un prototype de réacteur de puissance de 25 MWe fondé sur le « concept CAREM » Le réacteur devrait être opérationnel d'ici le milieu de la décennie. Des études de préfaisabilité sont en cours en vue de la construction d'une tranche de 150 MWe.

68. En 2010, la Chine a lancé la construction de huit nouveaux réacteurs, y compris des réacteurs à eau sous pression évolutifs de 610 MWe et 1 000 MWe basés sur la technologie d'usines en exploitation existantes, ainsi que des modèles plus récents d'AP-1000 et des modèles du réacteur européen à eau sous pression (EPR). La Chine est actuellement en train de mettre au point les modèles CAP-1400 et CAP-1700, qui sont des versions plus grandes de l'AP-1000. Dans le même temps, elle investit dans la recherche sur la conception d'un réacteur refroidi par eau supercritique.

69. En France, AREVA poursuit la commercialisation de l'EPR de 1600+ MWe pour des applications locales et internationales. AREVA est aussi en train de mettre au point le REP ATMEA de 1100+ MWe, avec Mitsubishi Heavy Industries du Japon, et le réacteur à eau bouillante (REB) KERENA de 1250+ MWe, en partenariat avec E.ON d'Allemagne.

70. En 2010, le Japon a lancé la construction d'un nouveau réacteur avancé à eau bouillante (RAEB). Hitachi poursuit la mise au point de versions de 600, 900 et 1 700 MWe du RAEB, ainsi que du RAEB-II de 1 700 MWe. Mitsubishi Heavy Industries a conçu pour le marché des États-Unis une version de 1 700 MWe du réacteur avancé à eau sous pression (RAEP), dont le processus de certification par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) est en cours. Une version européenne du RAEP est aussi en train d'être mise au point et sera évaluée en fonction des exigences des compagnies d'électricité européennes. En outre, le Japon poursuit la conception d'un modèle de réacteur innovant refroidi par eau supercritique.

71. Un nouveau réacteur OPR-1000 local a été couplé au réseau en République de Corée en 2010. La construction du premier réacteur de puissance avancé, APR-1400, progresse conformément au plan et des contrats ont été passés au cours des derniers mois de 2009 pour la construction de quatre autres APR-1400 aux Émirats arabes unis. La République de Corée est en train de mettre au point une version européenne de l'APR-1400, qui sera évaluée en fonction des exigences des compagnies d'électricité européennes. Elle est aussi en train de travailler sur une version de l'APR-1400 pour les États-Unis, qui sera soumise à la certification de la NRC. Parallèlement, la mise au point d'un APR+ de 1500 MWe s'est poursuivie en 2010 et le lancement du modèle APR-1000 a été annoncé. S'agissant des réacteurs de faible ou moyenne puissance, la République de Corée a accru ses efforts pour la mise au point du REP intégral de 330 MWt SMART.

72. La construction de deux réacteurs supplémentaires a commencé en Fédération de Russie en 2010, y compris un réacteur VVER-1200. Des plans de mise au point du VVER-1200A, ainsi que du VVER-600 et du VVER-1800, basés sur le modèle VVER-1200 actuel, ont aussi été annoncés. En

---

<sup>7</sup> De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant les réacteurs à fission avancés figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/>).

<sup>8</sup> Des informations techniques détaillées concernant tous les modèles de réacteurs avancés mentionnés dans cette section dans le Système d'information sur les réacteurs avancés (ARIS) de l'Agence à l'adresse <http://aris.iaea.org>.

outre, la Fédération de Russie travaille sur un réacteur à refroidissement par eau supercritique VVER-SC et la construction du KLT 40S, un petit réacteur flottant destinée à des applications spécialisées, se poursuit.

73. Aux États-Unis d'Amérique, la NRC progresse dans le processus de certification de cinq modèles de réacteurs avancés refroidis par eau : l'AP-1000, les versions des réacteurs RAEP et REP destinées au marché américain, le Westinghouse SMR et le réacteur à eau bouillante simplifié économique (ESBWR). La NRC examine actuellement modification de la certification du modèle AP-1000 qui a été certifié en 2006. Celui-ci a été le premier de cette série à être homologué (octobre 2010). En outre, on s'attend à ce que la version du réacteur APR-1400 destinée au marché américain, le REP intégral mPower de 125 MWe de Babcock & Wilcox et le REP intégral de 45 MWe de NuScale Power, soient aussi soumis pour certification par la NRC dans un proche avenir.

74. Au Canada, en 2010, la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a achevé la Phase 1 de l'examen avant-projet du modèle de CANDU-6 amélioré de 700 MWe, qui comporte plusieurs innovations du CANDU-9 et de l'expérience récente acquise avec des tranches du CANDU-6 construites en Chine et en République de Corée. La Phase 2 de l'examen avant-projet du modèle de l'EC6, actuellement en cours, doit être achevée au début de 2012. Toujours au Canada, Énergie atomique du Canada limitée (EACL) a aussi poursuivi la mise au point du réacteur CANDU avancé (ACR-1000), un modèle de génération III+, qui est caractérisé par une normalisation très poussée des composants et fonctionne à l'uranium légèrement enrichi pour compenser l'utilisation d'eau ordinaire comme caloporteur primaire. En janvier 2011, la CCSN a achevé la phase 3 de l'examen avant-projet du modèle de réacteur CANDU avancé (ACR-1000) ; ce réacteur nucléaire de puissance est ainsi le premier pour lequel la CCSN a achevé les trois phases de cet examen. L'EACL est en outre en train de mettre au point activement un réacteur CANDU refroidi par eau supercritique, un modèle de génération IV, ce qui renforcera le rôle pilote joué par le Canada dans le cadre du programme de réacteurs refroidis par eau supercritique du Forum international Génération IV.

75. En Inde, un nouveau réacteur à eau lourde sous pression (RELAP) de 220 MWe a été couplé au réseau en 2010. L'Inde est en train de commercialiser ce réacteur pour construction dans des pays ayant de petits réseaux. Six autres réacteurs sont en construction, y compris un RELAP de 220 MWe, deux RELAP évolutifs de 700 MWe, deux VVER-1000, ainsi que le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe. La Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL) a conçu un RELAP évolutif de 700 MWe. Quatre projets comportant huit tranches de ce RELAP de 700 MWe ont été lancés en 2010. Le Centre de recherche atomique Bhabha (BARC) est en train de terminer le modèle d'un réacteur avancé à eau lourde (RAEL) de 300 MWe qui utilisera du thorium avec de l'eau lourde comme modérateur, de l'eau ordinaire bouillante comme caloporteur dans des tubes verticaux sous pression, et sera doté de systèmes de sûreté passive.

### **B.1.2. Systèmes à neutrons rapides**

76. En Chine, le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de type piscine de 65 MWth (20 MWe) a divergé pour la première fois le 21 juillet 2010. Le programme de physique du démarrage de ce réacteur est actuellement en cours.

77. Les travaux de construction du prototype indien de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe à Kalpakkam sont bien avancés : les cuves de sécurité, et les cuves primaire et interne sont installées. Le bâtiment du réacteur est fermé. La mise en service est prévue pour fin 2012 début 2013.

78. Le Japon a redémarré le prototype de surgénérateur à neutrons rapides de 280 MWe en mai 2010. Les essais de confirmation ont commencé.

79. En Fédération de Russie, la construction du réacteur rapide BN-800 à Beloyarsk progresse. Presque tous les composants ont été commandés et leur fabrication est bien avancée. La mise en service est prévue pour 2013.

80. La Belgique a établi, dans le cadre d'Euratom, une équipe pour poursuivre les travaux de conception de MYRRHA (réacteur de recherche, polyvalent et hybride pour des applications de haute technologie), qui est un réacteur expérimental à neutrons rapides sous-critique. En 2010, le gouvernement belge a consacré, pour la période allant jusqu'en 2014, un montant de 60 millions d'euros destiné à financer la première phase du projet MYRRHA. Le coût total du projet, qui bénéficie du soutien d'Euratom, de la Commission européenne, du European Strategy Forum on Research Infrastructures et de la Plateforme technologique européenne pour l'énergie nucléaire durable, est estimé à 960 millions d'euros. Pour tester le suivi de la sous-criticité, une installation expérimentale, GUINEVERE, qui couple un accélérateur de deutons fonctionnant en mode continu à une cible titane-tritium placée dans un système multiplicateur sous-critique rapide refroidi au plomb, a été construite. Elle devrait être opérationnelle en 2011.

### **B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz**

81. En Chine, le plan de mise en service du réacteur de démonstration à haute température refroidi par gaz a été approuvé par le gouvernement. La licence du projet est en cours d'examen et le premier coulage de béton est prévu en 2011.

82. En Afrique du Sud, considérée comme le principal pays en ce qui concerne la construction de réacteurs à haute température refroidis par gaz, les plans relatifs au réacteur modulaire à lit de boulets (PBMR) avaient été interrompus en 2010, en raison notamment des contraintes financières apparues au lendemain de la crise économique et financière mondiale. Le projet est actuellement soumis à un « plan d'entretien et de maintenance » pour protéger la propriété intellectuelle et les biens jusqu'à ce que le gouvernement décide de son avenir.

83. Au Japon, des essais plus rigoureux – 90 jours au total dont 50 à 950 °C – du réacteur d'essais techniques à haute température ont été achevés. Le gouvernement japonais est en train d'étudier la faisabilité du couplage de ce réacteur à un système de production d'hydrogène en vue de la production d'hydrogène à petite échelle.

84. Aux États-Unis d'Amérique, les essais de sûreté du combustible isotrope à triple revêtement (TRISO), mesurée par les défaillances du combustible sur de longues périodes d'irradiation ont continué au réacteur d'essai avancé du Laboratoire national de l'Idaho. Un examen après irradiation a été entrepris pour la première expérience concernant le combustible (AGR-1) et la seconde expérience (AGR-2) a été insérée dans l'ATR à la mi-2010. Le projet de centrale nucléaire de la prochaine génération (CNPNG) a accusé un léger retard et les études de conception ont été achevées au début de 2011. En règle générale, le CNPNG axe ses activités sur la production d'applications de la chaleur industrielle à haute température avec des températures supérieures à 750 °C à la sortie du caloporteur. En 2011, les activités seront principalement axées sur la mise en place d'un partenariat public-privé chargé de la conception, de l'autorisation et de la construction d'un réacteur de démonstration.

85. La République de Corée investit, depuis les six dernières années, dans un certain nombre d'installations d'essais en vue d'essais techniques de systèmes et de composants pour un réacteur à haute température couplé à une installation de production d'hydrogène. Des applications de la chaleur industrielle sont aussi prévues, et un certain nombre d'utilisateurs de cette chaleur collaborent avec la communauté de la recherche nucléaire pour trouver des méthodes optimales de production de chaleur et d'hydrogène grâce à un réacteur à haute température. On s'attend à choisir un modèle de réacteur d'ici 2015, lorsque la plupart des essais des autres systèmes auront été achevés. Le projet de

développement et de démonstration de la production nucléaire d'hydrogène (NHDD) bénéficie d'un solide appui de l'industrie et du gouvernement.

#### **B.1.4. INPRO et GIF**

86. Le projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) qui aide les États Membres à mettre au point et à déployer des systèmes d'énergie nucléaire durables a célébré son dixième anniversaire en 2010 et s'est félicité de l'arrivée d'un nouveau membre, la Pologne ce qui porte le nombre de membres à 32. Le Forum de dialogue INPRO, qui s'est réuni deux fois en 2010, a appuyé une discussion en cours portant sur divers sujets entre des parties prenantes, quel que soit leur stade de développement nucléaire. Deux évaluations des systèmes d'énergie nucléaire (NESA), par le Bélarus et le Kazakhstan respectivement sont en cours et une publication de l'AIEA intitulée *Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment* a été publiée dans le cadre d'un module de soutien NESA à l'intention des États Membres. Deux projets de collaboration, *Résistance à la prolifération : analyse des voies d'acquisition/de détournement* et *Further Investigation of the 233U/Th Fuel Cycle (ThFC)*, ont été achevés en 2010. Compte tenu de l'intérêt grandissant que suscite pour les États Membres la modélisation conjointe des tendances aux niveaux mondial et régional de l'utilisation de l'énergie d'origine nucléaire, le projet mené en collaboration intitulé : « Architecture globale des systèmes nucléaires innovants faisant appel à des réacteurs à neutrons thermiques et rapides comportant des cycles du combustible fermés (GAINS) » a poursuivi ses études de simulation méthodologiques de stratégies visant à passer des systèmes d'énergie nucléaire actuels aux systèmes futurs.

87. À travers un système de contrats et d'accords, le Forum international Génération IV (GIF) coordonne les activités de recherche sur six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems* (réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNRRG), réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, réacteurs à sels fondus, réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, réacteurs refroidis par eau supercritique et réacteurs à très haute température (RTHT)). Les six systèmes sélectionnés font appel à diverses technologies dans les domaines des réacteurs, de la conversion de l'énergie et du cycle du combustible. Leur conception comporte un spectre des neutrons thermiques et des neutrons rapides, des cycles du combustible ouverts et fermés et toute une gamme de réacteurs de très faible à très forte puissance. En fonction de leurs niveaux respectifs de développement technique, les systèmes de Génération IV devraient être disponibles à des fins d'introduction commerciale entre 2015 et 2030 et au-delà. Le GIF compte actuellement 13 membres<sup>9</sup>.

88. L'AIEA et le GIF coopèrent dans les domaines suivants : risque et sûreté, résistance à la prolifération et protection physique, modélisation et méthodologies de l'évaluation économique ainsi que dans le cadre d'autres thèmes comme les réacteurs de faible et de moyenne puissance, le thorium et les conséquences pour le cycle du combustible. En 2010, un atelier AIEA/GIF a axé ses travaux sur des aspects relatifs à la sûreté d'exploitation des SFR, permettant de mieux faire comprendre les questions de sûreté des SFR.

---

<sup>9</sup> Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Japon, République de Corée, Royaume-Uni, Suisse et Euratom

## B.2. Fusion

89. Les caractéristiques de conception de référence pour le dispositif et l'installation du Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) ont été arrêtées par toutes les parties à la réunion extraordinaire du Conseil d'ITER en juillet 2010. Depuis, ITER est officiellement passé du stade d'examen de la conception à celui de la construction. D'après un calendrier actualisé, le premier plasma sera réalisé en novembre 2019 et l'exploitation au deutérium-tritium commencera au plus tard en mars 2027, ce qui portera à terme la puissance d'ITER à 500 MW.

90. Des progrès importants ont également été faits à l'Installation nationale d'ignition (NIF) des laboratoires Lawrence Livermore aux États-Unis d'Amérique, depuis son lancement en mai 2009. Une impulsion de 1 MJ a été atteinte en janvier 2010 et des expériences d'ignition intégrée avec une série complète et pleinement fonctionnelle de détecteurs ont démarré en septembre 2010. Elles comprennent des recherches scientifiques fondamentales sur la haute densité d'énergie effectuées sur le terrain dans des domaines comme l'astrophysique, la physique nucléaire, le transport des rayonnements, la dynamique des matériaux et l'hydrodynamique.

91. Deux nouveaux tokamaks supraconducteurs de puissance moyenne, le tokamak supraconducteur avancé de Corée (KSTAR) (fig. B-1) en République de Corée et le tokamak supraconducteur expérimental avancé (EAST) en Chine, sont actuellement pleinement opérationnels. Ces expériences liées à impulsions longues ITER sont destinées à examiner les questions pertinentes pour ce projet en ce qui concerne le fonctionnement en régime stable. Elles ont toutes deux commencé le fonctionnement à haute énergie avec le chauffage accru du plasma. L'Institut de recherche sur la fusion (NFRI) de Corée, qui abrite le KSTAR, a accueilli en octobre 2010 la 23<sup>e</sup> Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion (FEC 2010), au cours de laquelle des rapports ont été présentés sur les dernières avancées dans toutes les grandes expériences sur les plasmas de fusion.

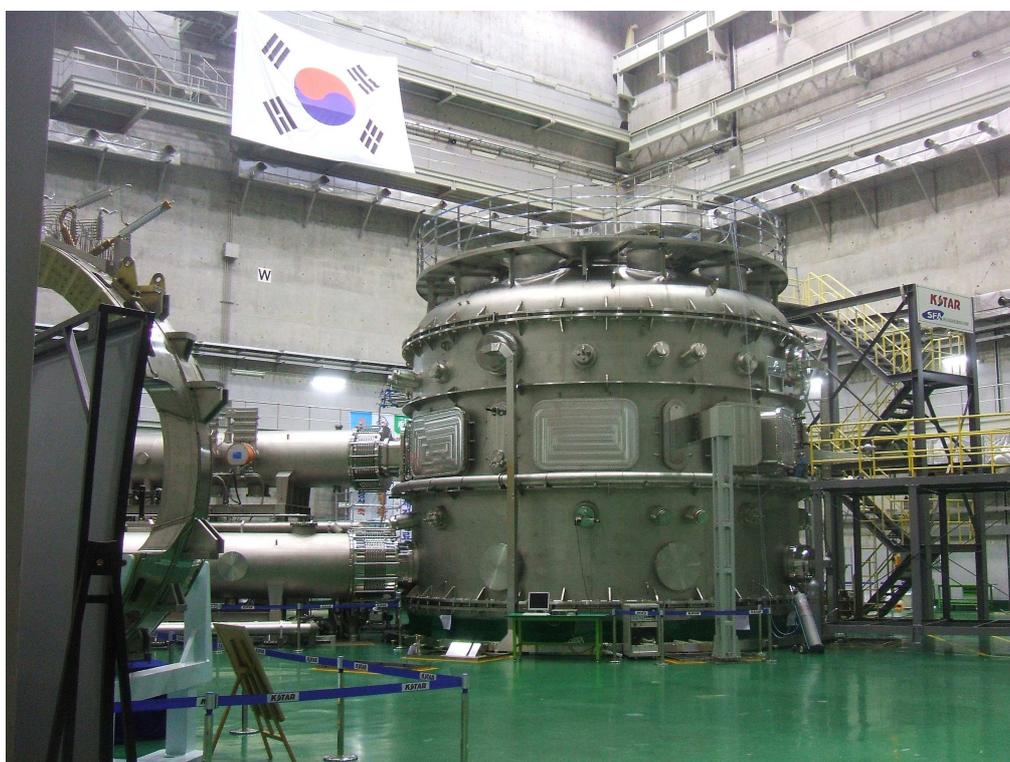


FIG. B-1. Le dispositif KSTAR au NFRI à Daejeon (République de Corée).

## C. Données atomiques et nucléaires

92. Les principales bases de données nucléaires conçues par le Réseau international de centres de données sur les réactions nucléaires et le Réseau international des évaluateurs de données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux, qui sont coordonnés par l'Agence, sont améliorées constamment. Il convient de noter en particulier qu'en 2010, le système de recherche sur le web a été développé pour que les données sur les réactions nucléaires et leurs covariances soient présentées sous différents formats, dont la visualisation graphique.

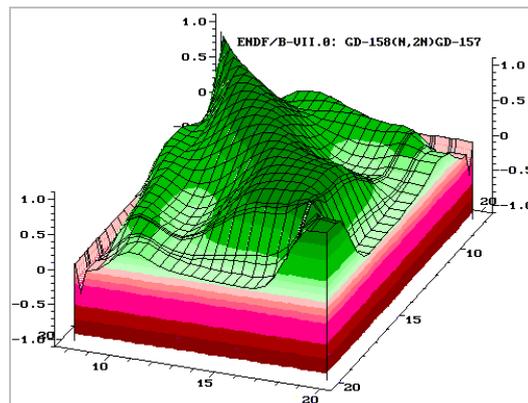


FIG. C-1. Graphique tridimensionnel des corrélations énergie-énergie pour les sections efficaces des réactions nucléaires

93. L'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion (IFMIF) est un projet international actuellement mis au point pour tester les matériaux qui seront utilisés dans le réacteur de démonstration DEMO ou dans un réacteur à fusion commercial. L'Espagne a lancé récemment un projet national appelé « TechnoFusión », qui vise à procurer un appui technique à l'IFMIF et au réacteur DEMO pour simuler les dégradations matérielles extrêmes causées par la lumière et les ions lourds. Pour fournir des données nucléaires servant à ces installations et d'autres installations de fusion, il faut procéder à une extension significative de la version 2.1 de la Bibliothèque de données neutroniques sur l'énergie de fusion (FENDL 2.1) pour y inclure des niveaux d'énergie plus élevés, ainsi que les particules chargées incidentes et l'évaluation des incertitudes associées.

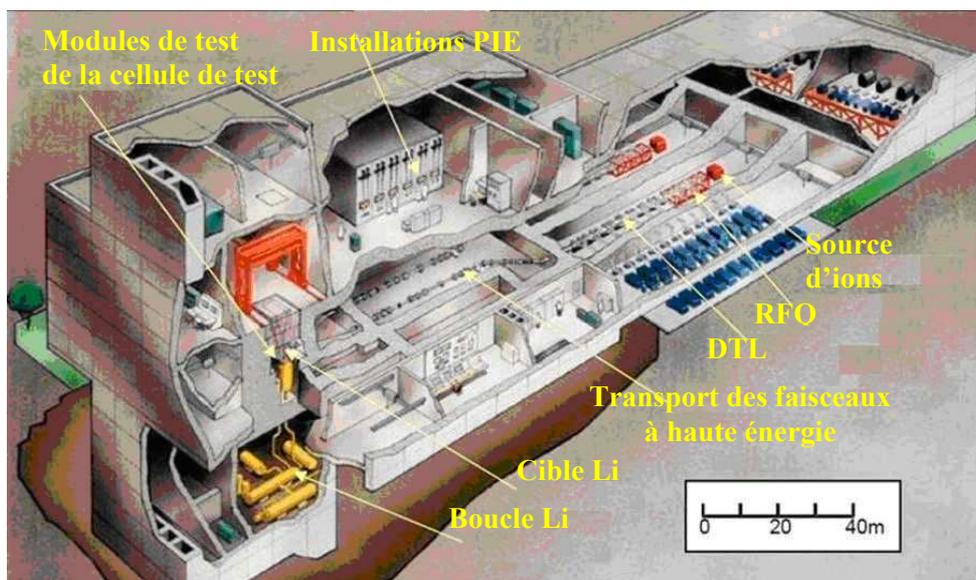


FIG. C-2. Étude de conception de l'IFMIF (PIE : examen après irradiation ; RFO = quadripôle à radiofréquence ; DTL = accélérateur linéaire à tubes de glissement)

94. La Conférence internationale triennale sur les données nucléaires pour la science et la technologie, qui a eu lieu en 2010 en République de Corée, a rassemblé plusieurs centaines de scientifiques et d'ingénieurs produisant ou utilisant de telles données pour application à l'énergie de fission et de fusion, à la technologie des accélérateurs, à la dosimétrie et au blindage, à l'astrophysique et à d'autres domaines pertinents. Portant sur l'évolution des modèles théoriques ainsi que sur les activités de mesure, d'évaluation, de traitement, de validation et de diffusion de ces données, la conférence a grandement contribué à l'amélioration de ces dernières.

95. Le Centre virtuel de données atomiques et moléculaires (VAMDC) est un projet d'une durée de trois ans et demi financé par le septième programme-cadre de recherche et de développement technologique de l'Union européenne visant à fournir une plateforme commune à une bonne vingtaine de bases de données atomiques et moléculaires. La première réunion annuelle relative à ce projet s'est tenue en 2010. Le schéma XML pour les atomes, les molécules et les solides (XSAMS), dont la mise au point est coordonnée par l'Agence, est un facteur essentiel pour assurer l'interopérabilité.

96. Le laser X à électrons libres LCLS (accélérateur linéaire source de lumière cohérente), qui est entré en service en avril 2009, a été très efficace en 2010 et permet de produire des données atomiques expérimentales dans des régimes autrefois inaccessibles. Sa brillance maximale dépasse de deux à trois ordres de grandeur celle des lasers à électrons libres précédents, ce qui permet d'étudier la matière dans des conditions semblables à celles des explosions de supernovae, des intérieurs stellaires et des plasmas produits par laser.



*FIG. C-3. Laser X à électrons libres LCLS*

## **D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche**

### **D.1. Accélérateurs**

97. Les avancées réalisées dans le domaine de la technologie des accélérateurs ont permis de mettre au point des méthodes d'analyse adaptées pour étudier la technologie de fabrication de nouveaux matériaux qui résistent aux rayonnements.

98. Un système hybride visant à fournir des protons et des neutrons pour des applications de R-D diverses a reçu un appui financier en 2010 au titre du projet MYRRHA. Un accélérateur de protons

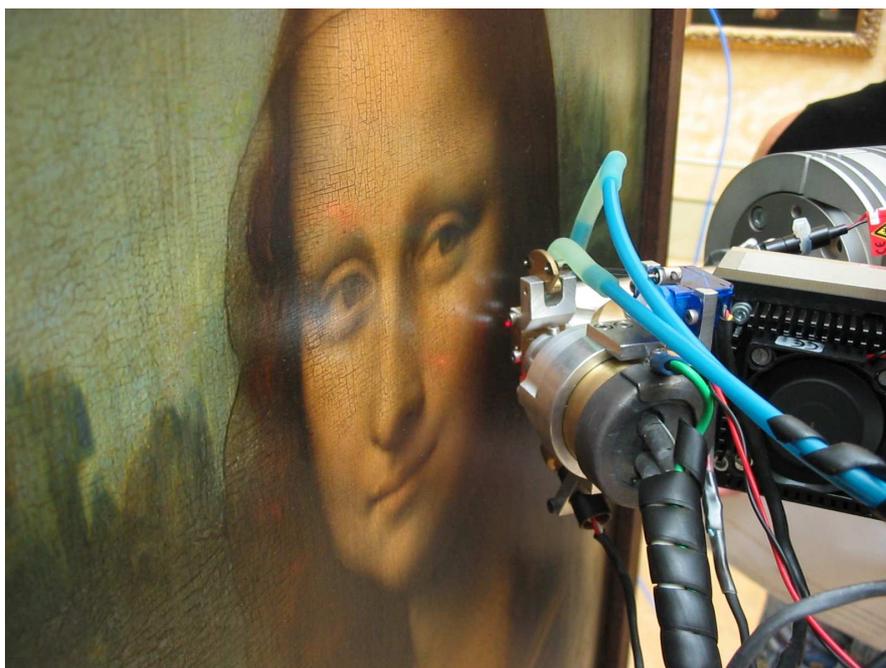
couplé à un réacteur sous-critique à neutrons rapides sera utilisé, entre autres, pour appuyer de nouvelles activités de R-D sur la transmutation des déchets. À partir de 2022, MYRRHA contribuera à l'élaboration de solutions innovantes dans le domaine des technologies nucléaires, des applications médicales, de l'industrie nucléaire et des sources d'énergie renouvelable.

99. Les techniques faisant appel aux rayons X sont devenues des outils de spectroscopie et d'imagerie essentiels dans nombre de domaines allant de la médecine à l'ingénierie. Les progrès réalisés en matière de focalisation des faisceaux de rayons X, de manipulation des spécimens et d'automatisation de la mesure des sources de rayonnement X synchrotron ont permis, ces deux dernières années, d'élargir leurs applications pour appuyer les travaux de recherche sur l'infection au VIH (virus de l'immunodéficience humaine), les causes de cancer, la fonction du système nerveux et la signalisation cellulaire, la photosynthèse, etc. Par exemple, les chercheurs de l'installation SPring-8 (Japon) ont mis au point une technique de collecte de la lumière grâce à laquelle il est possible de générer des faisceaux de rayons X de haute brillance de 7 nm de diamètre. Elle pourrait permettre de concevoir un microscope à rayons X doté d'une résolution nanométrique pouvant être utilisé pour observer directement la structure des molécules et atomes. La technologie de nouvelle génération s'appuyant sur les sources X, comme le linac à récupération d'énergie (ERL, Université Cornell, États-Unis d'Amérique), et l'achèvement de plusieurs installations équipées de lasers X à électrons libres (XFEL) dans le monde offrent de nouvelles possibilités d'étudier le comportement des atomes et des molécules dans des conditions extrêmes.

100. La microtomographie par rayonnement synchrotron (rayons X durs) à haute résolution, utilisée avec succès en 2010 à l'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF), est actuellement la seule méthode capable de fournir des informations tridimensionnelles contribuant à l'étude des matériaux nouveaux pour les réacteurs à fusion.

101. Dans les études de contrôle radiologique de l'environnement, des scientifiques de l'Université de Leicester et du Service géologique britannique ont utilisé la source de lumière Diamond pour étudier la spéciation chimique, la bioaccessibilité et la mobilité des particules présentes dans la poussière et les sols prélevés autour des usines de traitement d'uranium.

102. Une technique quantitative d'analyse chimique par fluorescence X a été utilisée pour la première fois en 2010 par des scientifiques du laboratoire du Centre de recherche et de restauration des musées de France et l'ERSF pour la caractérisation non invasive *in situ* de sept tableaux (dont le portrait de Mona Lisa), directement dans les salles du Musée du Louvre. Les résultats, publiés en juillet 2010, ont permis d'identifier et d'étudier les techniques appliquées par les anciens maîtres, comme la célèbre technique du « sfumato » utilisée par Léonard de Vinci.



*Fig. D-1. Technique d'analyse par fluorescence X utilisée pour la caractérisation non invasive in situ du portrait de Mona Lisa au Musée du Louvre (France) (avec l'aimable autorisation du laboratoire du Centre de recherche et de restauration des musées de France © C2RMF).*

## **D.2. Réacteurs de recherche**

103. Aujourd'hui, plus de 20 États Membres envisagent de construire de nouveaux réacteurs de recherche ; pour nombre d'entre eux, il s'agit de la première étape d'un programme national d'introduction de l'électronucléaire qui accompagne d'autres applications pacifiques des technologies nucléaires. En Jordanie, la mise au point du premier réacteur de recherche polyvalent de 5 MW en est à un stade de conception avancé et sa construction est sur le point de démarrer. Dans le cadre de leur programme de coopération bilatérale, l'Argentine et le Brésil ont conclu un accord concernant la mise au point et la construction, dans chacun des deux pays, de réacteurs de recherche de conception avancée et ayant une capacité de production de radio-isotopes importante.

104. La Base de données sur les réacteurs de recherche de l'Agence<sup>10</sup> dénombrait, à la fin de 2010, 249 réacteurs de recherche dans le monde ; 237 étaient en service et 12 étaient temporairement mis à l'arrêt. Cinq autres sont en cours de construction ou prévus. Seuls 2 réacteurs de recherche ont été mis en service en 2010, à savoir le réacteur de recherche avancé chinois et le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR), tous deux situés à l'Institut chinois de l'énergie atomique, près de Beijing. Le premier a divergé pour la première fois le 13 mai 2010 et le second le 21 juillet 2010.

---

<sup>10</sup> <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.



*Fig. D-2. Réacteur de recherche avancé chinois.*

105. Étant donné que les réacteurs de recherche anciens sont mis à l'arrêt et remplacés par des réacteurs plus polyvalents mais moins nombreux, le nombre de réacteurs de recherche et d'installations critiques en service devrait diminuer pour se situer entre 100 et 150 d'ici à 2020. Il faudra développer la coopération internationale pour permettre un large accès à ces installations ainsi que leur utilisation efficace. Les réseaux de coopération s'avèrent aussi utiles pour moderniser les installations existantes et en établir de nouvelles. Ainsi, outre les cinq associations de réacteurs de recherche qui existent dans les régions d'Europe orientale, des Caraïbes, d'Asie centrale, de la Baltique et de la Méditerranée, des associations et réseaux nouveaux sont envisagés pour accroître l'exploitation et l'utilisation des réacteurs de recherche ainsi que pour les rendre véritablement viables.

106. L'Initiative des États-Unis pour la réduction de la menace mondiale a poursuivi ses efforts sur la conversion de l'UHE en UFE dans le combustible des réacteurs de recherche et dans les cibles utilisées dans les installations de production d'isotopes. En 2009, sa portée initiale a été étendue de 129 à 200 réacteurs de recherche, et à la fin de l'année 2010, après plus de 30 ans de coopération internationale dans le cadre de ces efforts de conversion, 72 réacteurs en service dans le monde qui utilisaient du combustible à l'UHE avaient été convertis au combustible à l'UFE ou avaient été mis à l'arrêt avant cette conversion. Trente-trois de ces réacteurs ont été convertis depuis que ce programme a été intensifié en 2004.

107. L'appui fourni par l'AIEA aux États Membres et aux programmes internationaux pour réexpédier le combustible d'un réacteur de recherche vers son pays d'origine s'est poursuivi. Dans le cadre du programme de renvoi du combustible d'origine russe pour réacteurs de recherche et de contrats mis au point par l'Agence, cinq expéditions représentant environ 109 kg de combustible neuf à l'UHE ont quitté le Bélarus, la République tchèque et l'Ukraine. L'Agence a en outre aidé au rapatriement de quelque 376 kg de combustible usé à l'UHE depuis le Bélarus, la Pologne, la Serbie (13,2 kg de Vinča) et l'Ukraine.

108. Fin 2010, 2 500 kg de combustible usé dégradé de réacteurs de recherche, dont la plupart était de l'UFE, ont été transportés de Vinča (Serbie) en Fédération de Russie. Le succès de ce projet de coopération technique (CT), le plus important en termes de valeur de l'histoire de l'Agence, a été le fruit des efforts de collaboration de l'Agence et d'un grand nombre de donateurs financiers externes et

d'organismes d'appui technique. Les travaux se poursuivront pour appuyer le déclassement complet de l'installation.

109. Toujours numéro un de la conversion (production d'UHE en production d'UFE) de cibles et de l'équipement de transformation chimique servant à la production de molybdène 99 parmi les producteurs à grande échelle, l'Afrique du Sud est devenue le premier grand producteur à fournir des quantités industrielles de cet isotope au moyen de cibles à l'UFE destinées à l'exportation en 2010. L'Institut de recherche des réacteurs atomiques à Dimitrovgrad (Fédération de Russie) a aussi commencé la production à grande échelle de molybdène 99 en 2010 et le premier lot (remplissant toutes les conditions requises) a été expédié à des partenaires à l'étranger en décembre 2010. Les niveaux de production devraient atteindre 800 Curies par semaine d'ici à la fin mai 2011 et 2 500 Curies par semaine, une fois la seconde phase du projet achevée en 2012. Auparavant, en 2002, l'Argentine avait réussi à convertir la production à petite échelle de molybdène 99 et elle a ultérieurement mis au point et exporté cette technologie en Australie et en Égypte. De même, en 2010, l'Australie a fait état de progrès constants dans l'augmentation de la production de molybdène 99 de fission au moyen de cibles à l'UFE.

110. Les difficultés techniques rencontrées ont conduit à des mises à l'arrêt fréquentes, prolongées et souvent parallèles des réacteurs de recherche, ce qui a encore aggravé la crise de l'approvisionnement en molybdène 99 qui avait commencé à la fin de l'année 2007<sup>11</sup>. L'action coordonnée mondiale qui a été déployée pour améliorer l'efficacité du côté de la demande, réduire les problèmes de transport et approuver les réacteurs capables d'irradier des cibles ont grandement contribué à atténuer l'impact de la crise en 2010, jusqu'à la remise en service de réacteurs mis en arrêt de façon planifiée ou non pour de longues périodes. La Commission nationale de l'énergie atomique en Argentine a doublé sa production de molybdène 99, ce qui a permis à l'Argentine d'être autosuffisante et d'aider à répondre aux besoins d'autres pays de la région. En Belgique, le Centre de recherche nucléaire de Mol a augmenté la capacité d'irradiation des cibles d'UHE de son réacteur BR-2 et a exécuté un autre cycle opérationnel tandis que l'Institut national des radioéléments de Fleurus a augmenté sa capacité de traitement des cibles. Néanmoins, un rapport de l'AEN<sup>12</sup> publié en septembre 2010, qui inclut des données de l'AIEA, a conclu que les menaces pesant sur la sécurité de l'approvisionnement en molybdène 99 demeureront tant que tous les problèmes liés aux aspects techniques, au marché et aux politiques n'auront pas été réglés.

111. Les combustibles avancés à très haute densité à base d'uranium et de molybdène qui sont actuellement mis au point sont nécessaires pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et à haute performance. À cet égard, des progrès importants ont été faits ces dernières années. Le comportement et la performance du combustible à base d'uranium et de molybdène sont actuellement étudiés en parallèle par le Groupe de travail international sur la mise au point de combustibles. Aux États-Unis d'Amérique, les efforts sont axés sur la mise au point de combustible monolithique à l'uranium-molybdène destiné à être utilisé dans les réacteurs de recherche à haut flux. Des avancées significatives sont réalisées à mesure que se développe la technologie de fabrication. En 2009, une nouvelle initiative européenne a été renforcée pour qualifier le combustible dispersé à très haute densité faiblement enrichi à l'uranium-molybdène pour les réacteurs européens à haut flux convertis au combustible à l'UFE. Bien que des avancées notables aient été enregistrées en 2010 dans la mise au point et la qualification du combustible à l'uranium-molybdène, des progrès supplémentaires et de nombreux essais s'avèrent nécessaires pour pouvoir assurer en temps voulu l'approvisionnement commercial en combustibles à l'UFE qualifiés à très haute densité.

---

<sup>11</sup> Voir aussi la section I.1 sur les radio-isotopes et les radiopharmaceutiques.

<sup>12</sup> <http://www.nea.fr/med-radio/reports/MO-99.pdf>

## **E. Technologies nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture<sup>13</sup>**

### **E.1. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail**

112. La mise au point, les essais, la validation et l'application de techniques nucléaires et apparentées rapides et précises pour le diagnostic précoce des maladies ont joué un rôle majeur dans l'amélioration de la sécurité alimentaire. On peut citer à titre d'exemple l'éradication de la peste bovine dans le monde, qui devrait être déclarée officiellement par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) en 2011. Néanmoins, d'autres maladies animales transfrontalières, dont certaines peuvent aussi toucher l'homme, continuent de poser des problèmes dans le monde. Il est essentiel de pouvoir diagnostiquer ces maladies rapidement, précisément et de préférence sur le terrain, et de mettre en œuvre ensuite les mesures de lutte appropriées. De nouvelles techniques d'irradiation pour l'élaboration de vaccins sûrs et efficaces, le marquage stable et radioactif et des plateformes de traçage utilisées pour l'identification de pathogènes sensibles et spécifiques, ainsi que l'utilisation des isotopes stables pour suivre les migrations animales sont actuellement mis au point.

113. Lorsque les éléments pathogènes du vaccin sont atténués ou non infectants, les vaccins irradiés gardent leur capacité à stimuler une forte réponse immunitaire. Certains États Membres reçoivent un appui pour la mise au point de vaccins de ce type pour plusieurs maladies animales transfrontalières contre lesquelles il n'existe actuellement pas de vaccin efficace. Ainsi, des vaccins sont mis au point contre la brucellose (une zoonose répandue) en Argentine et en Géorgie, les infections dues à des vers parasites (Éthiopie, Soudan et Sri Lanka), la theilériose (Chine et Turquie), la trypanosomose (Inde et Kenya), l'anaplasmose (Thaïlande), et contre les parasites transmis par les poissons (République islamique d'Iran).

114. En vue de connaître les causes des effets secondaires indésirables ou de l'inefficacité du vaccin contre la variole caprine<sup>14</sup>, un séquençage complet du génome de plusieurs souches locales et vaccinales a été entrepris afin de recenser la présence ou l'absence de gènes potentiellement responsables. Des études des génomes ovin et caprin mettant en jeu les technologies des micro-réseaux d'ADN avec application du marquage au phosphore 32 et au soufre 35 permettront de mieux comprendre la résistance aux maladies et le rôle des différents gènes impliqués dans la réponse immunitaire aux maladies animales. Il s'agit d'une étape importante pour comprendre les variations phénotypiques et génotypiques des animaux d'élevage.

115. En 2009 et 2010, des progrès importants ont été accomplis dans la réalisation d'une carte hybride de radiation (RH Maps3) pour les caprins, à l'aide de l'irradiation au cobalt 60, dans le cadre d'une collaboration avec plusieurs établissements à travers le monde [Institut national de la recherche agronomique (INRA) (France), Université Texas A&M (États-Unis d'Amérique), Université d'agronomie de Huazhong (Chine centrale), DNALANDMARK (Canada)]. Cela permettra d'identifier des marqueurs génétiques pour les caractères productifs intéressants qui peuvent être utilisés à des fins de sélection.

---

<sup>13</sup> De plus amples détails figurent dans les documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011* disponibles sur GovAtom.

<sup>14</sup> Virus responsable de la variole ovine et caprine et de la dermatose nodulaire contagieuse.

## E.2. Lutte contre les insectes nuisibles

116. Investir dans les terres, les semences, l'eau, les engrais, la main d'œuvre et d'autres intrants pour voir les produits agricoles partiellement ou totalement détruits par des insectes nuisibles est une façon très inefficace d'utiliser les ressources limitées disponibles pour nourrir une population croissante. Pour augmenter la productivité et assurer la sécurité alimentaire au niveau mondial, il est donc important sur le plan stratégique d'investir davantage dans la lutte contre les ravageurs. Toutefois, le recours actuel aux insecticides empêche de maintenir un équilibre naturel, laisse des résidus dans les aliments et entraîne régulièrement l'apparition d'une résistance des insectes aux insecticides. En conséquence, il existe une demande croissante pour des méthodes de lutte contre les ravageurs plus efficaces, écologiquement rationnelles et durables.

117. Dans le domaine de la lutte contre les insectes nuisibles, la demande relative aux techniques nucléaires était par le passé essentiellement limitée à la stérilisation des insectes dans le cadre de l'application intégrée de la technique de l'insecte stérile (TIS) à l'échelle d'une zone et des méthodes de lutte génétique connexes. Or, l'application des rayonnements présente un grand potentiel en tant que méthode de lutte biologique contre les insectes nuisibles pour améliorer le rapport coût-efficacité et la sûreté de l'introduction et du lâcher d'ennemis naturels (parasitoïdes et prédateurs) et faciliter le commerce de ces ennemis naturels.



*FIG. E-1. Femelles parasitoïdes testant un fruit avec leurs longs ovipositeurs en vue d'y injecter leurs œufs.*

118. Dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée (PRC) FAO/AIEA qui s'est achevé en 2010, 18 équipes de chercheurs de 15 pays ont travaillé sur diverses contraintes liées à différents systèmes de production et de manipulation des agents de lutte biologique, y compris sur la présence potentielle d'organismes nuisibles les accompagnant durant leur expédition. Les résultats indiquent que les rayonnements ionisants tels que les rayons gamma ou les rayons X peuvent ajouter une valeur à la lutte biologique de nombreuses façons innovantes, par exemple en augmentant la durée de vie des ennemis naturels ou des hôtes et en réduisant le coût et la logistique de la conservation et de la séparation des parasitoïdes et des insectes adultes non parasités avant de pouvoir les expédier aux clients.

119. En outre, les rayonnements peuvent servir à stériliser partiellement ou complètement les hôtes ou les proies destinés à être lâchés sur le terrain, de manière non seulement à améliorer la survie initiale et le développement des agents de lutte biologique naturels ou introduits avant la constitution saisonnière des colonies de ravageurs, mais aussi à utiliser des hôtes rendus impropres à la reproduction comme sentinelles sur le terrain. L'application des rayonnements peut également permettre de réduire les risques associés à l'introduction d'agents de lutte biologique exotiques, qui peuvent s'attaquer à des organismes non ciblés s'ils ne sont pas soigneusement triés dans des conditions semi-naturelles ou naturelles. La spécificité d'hôte des agents de lutte biologique stérilisés peut être testée dans les conditions de terrain sans risque d'établissement de ces agents.

120. Les rayonnements sont également un outil très utile pour étudier les interactions physiologiques entre hôtes et parasitoïdes, comme par exemple les réponses immunologiques de l'hôte, en supprimant les réactions de défense d'hôtes naturels ou factices. Enfin, la possibilité de cohabitation d'ennemis naturels et d'insectes stériles lâchés dans le cadre de programmes de lutte intégrée à l'échelle d'une zone a été démontrée.



*FIG. E-2. Femelles parasitoïdes en train de pondre dans des aliments artificiels contenant des larves d'hôte dans le cadre du processus d'élevage en masse.*

121. Certaines de ces applications nucléaires sont déjà employées à grande échelle, par exemple au Pakistan, où des agents de lutte biologique sont introduits pour combattre les principaux ravageurs des cultures de coton et de canne à sucre<sup>15</sup>.

### **E.3. Amélioration des cultures**

122. La Banque mondiale a estimé en 2009 que les pays en développement supporteront de 70 à 80 % des coûts des dommages liés au changement climatique, et que l'agriculture sera le secteur le plus touché. Les principaux effets du changement climatique sur l'agriculture seront probablement dus aux plus grandes variations de température, aux modifications du régime pluviométrique, avec notamment une intensité et une fréquence accrues des événements extrêmes (inondations et sécheresses), ainsi

---

<sup>15</sup> Toutes ces applications ont été publiées dans une édition spéciale de 362 pages de la revue à comité de lecture *Biocontrol Science and Technology*. Voir : [http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/crp/Biocontrol\\_final.pdf](http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/crp/Biocontrol_final.pdf)

qu'à l'augmentation du niveau de la mer affectant des régions côtières où se trouvent de vastes zones de cultures (où les terres peuvent être sérieusement dégradées par l'intrusion d'eaux salées).

123. L'amélioration génétique des cultures est une réponse possible à ce problème. Les mutations ou modifications naturelles héréditaires du matériel génétique des plantes ont toujours été utilisées avec succès pour déterminer et sélectionner les caractères importants pour l'amélioration des cultures. Les techniques nucléaires d'induction de mutations peuvent permettre d'accroître les taux de modification génétique et partant l'adaptabilité des cultures au changement et à la variabilité climatiques par :

- l'exploitation de la diversité génétique des populations mutantes existantes pour évaluer la tolérance aux stress associés au changement climatique en termes de rendement et de composantes du rendement ;
- l'utilisation des outils existants pour caractériser les réponses physiologiques et biochimiques à ces stress à l'aide des techniques d'isotopes stables ;
- l'analyse et l'exploitation des mutations avec divers outils moléculaires, et l'utilisation d'outils bioinformatiques connexes pour évaluer de grandes séries de données et visualiser les voies métaboliques touchées par les stress et/ou les génotypes.



*FIG. E-3. Exploitation de mutations radio-induites pour améliorer les cultures et mieux comprendre la fonction des gènes. Les différentes couleurs correspondent à différentes mutations. Il s'agit de mutants avancés qui sont conservés et seront soumis ultérieurement à un stress particulier en vue de sélectionner les mutants résistants [photo : D. Shu (Chine)].*

124. Plusieurs États Membres ont des populations de mutants des principales cultures vivrières prêtes pour le phénotypage et la caractérisation moléculaire. Pour renforcer l'efficacité des techniques nucléaires d'induction de mutations, il faudra à l'avenir adapter les technologies les plus avancées, et caractériser les populations de mutants existantes et ce faisant, élargir l'adaptation des cultures au changement et à la variabilité climatiques. Ces nouvelles technologies propres à améliorer l'efficacité sont notamment le pyroséquençage à haut débit ou le séquençage direct profond de génomes pour lesquels la séquence d'un parent proche est déjà disponible et l'analyse de fusion à haute résolution, qui recourt à l'amplification génique et à des colorants intercalants fluorescents pour détecter les mutations rares dans des gènes à grands introns. Les mésappariements de bases simples peuvent être détectés à l'aide de systèmes de contrôle par fluorescence, ce qui pourrait être considéré comme un prolongement de la détection de polymorphismes d'un seul nucléotide (SNP) dans les plantes. Ces méthodes sont également favorisées par la forte baisse des coûts du séquençage de l'ADN, qui permet de multiplier les études des régions du génome, d'éliminer les erreurs et d'accélérer la détection de mutations dans des espèces polyploïdes telles que le blé avec des populations de mutants groupées. Le changement climatique pourrait bien conduire à des pertes importantes de la diversité génétique des

espèces cultivées. Il existe à présent des modèles sophistiqués de prévision et de simulation des effets du changement climatique, qui pourraient être adaptés à certaines cultures de régions ciblées. C'est ce qu'on appelle la bioinformatique. L'accès aux bases de données sur le génome et au matériel génétique végétal de banques de gènes du monde entier grâce à des instruments multilatéraux fournit des outils précieux pour relever ces défis majeurs dans les domaines de l'alimentation et de l'agriculture.

125. Des ensembles de techniques nucléaires basées sur l'induction de mutations et les biotechnologies propres à améliorer l'efficacité peuvent aider à identifier et à exploiter des caractères essentiels pour l'adaptation au changement et à la variabilité climatiques. Ces techniques peuvent également être étendues aux forêts, qui jouent un rôle crucial dans la stabilisation du climat.

## **E.4. Gestion des sols et de l'eau**

### **E.4.1. Nouvelles voies pour l'évaluation de la fixation du carbone dans les terres agricoles**

126. Le carbone organique du sol (COS) est un composant important de la matière organique du sol qui apporte des éléments nutritifs essentiels pour la croissance des plantes, accroît la résilience face à l'érosion du sol et améliore la conservation de l'eau. L'augmentation du carbone du sol, également appelé fixation du carbone, permet de compenser les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux activités agricoles telles que les cultures et l'élevage, tout en améliorant la qualité des sols et la rétention d'eau et en réduisant les pertes de nutriments. La fixation du carbone dans le sol est la différence entre les apports en carbone à travers la biomasse végétale et les rejets de carbone sous forme de CO<sub>2</sub> à travers l'activité microbienne et la décomposition des résidus organiques. La mesure de la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée par les sols et la détermination de sa source peuvent aider à connaître les facteurs de gestion dont dépendent les processus pédologiques qui influencent les rejets de CO<sub>2</sub>.

127. Les isotopes stables du carbone (carbone 13 et carbone 12) présents dans le CO<sub>2</sub> rejeté par le sol sont utilisés pour évaluer la dynamique des matières organiques, la capacité de fixation du carbone et la stabilisation du carbone dans le sol. Toutefois, des études menées en 2010 (Phillips et al., 2010)<sup>16</sup> ont montré que des mesures ponctuelles du carbone 13 étaient influencées par les caractéristiques des sols et les conditions atmosphériques au lieu et au moment précis de la mesure. On peut éliminer les incertitudes liées aux variations des valeurs du carbone 13 en fonction du lieu et du moment par des mesures continues et en temps réel du carbone 13. Des analyseurs de gaz faisant appel à des lasers infrarouge proche dotés d'une haute sensibilité d'analyse ont été mis au point (Nickerson et Risk, 2009)<sup>17</sup> pour mesurer le carbone 13 et le carbone 12 dans le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Ces analyseurs portatifs n'ont pas besoin d'étalonnage fréquent et peuvent être utilisés sur le terrain. Grâce à leur précision et leur solidité, ils permettent de quantifier plus précisément les processus du carbone du sol dans différents paysages agricoles et à différentes échelles spatiales et temporelles, et ainsi d'ouvrir de nouvelles frontières pour l'évaluation de la fixation du carbone dans les terres agricoles.

---

<sup>16</sup> Phillips, C.L., Nickerson, N., Risk, D., Kayler, Z.E., Andersen, C., Mix, A., Bond, B., 2010, *Soil moisture effects on the carbon isotope composition of soil respiration. Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 24, 1271-1280.

<sup>17</sup> Nickerson, N. et Risk, D., 2009, *Physical controls on the isotopic composition of soil respired and CO<sub>2</sub>. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 114, G01016, doi:10.1029/2008JG000844.



*FIG. E-4. Amélioration de la qualité des sols et renforcement de la fixation du carbone du sol : culture du soja dans le cadre d'une agriculture de conservation au Brésil (avec l'aimable autorisation de Bruno Alves, Embrapa, Brésil).*

#### **E.4.2. Utilisation des isotopes de l'oxygène présents dans le phosphate pour suivre les sources et le cycle du phosphore dans le sol**

128. Le phosphore est un élément essentiel en nutrition végétale, humaine et animale. Étant donné que de nombreuses régions du monde possèdent des sols à faible teneur en phosphore et que les carences en phosphore limitent la croissance des plantes et réduisent la production des cultures et la qualité des aliments, il est essentiel de mieux comprendre la dynamique du phosphore. Le phosphore a un isotope stable (le phosphore 31) et plusieurs radio-isotopes (du phosphore 26 au phosphore 30 et du phosphore 32 au phosphore 38), mais les deux seuls isotopes appropriés pour des études agronomiques (le phosphore 32 et le phosphore 33) ont des périodes très courtes (14,3 et 25,3 jours respectivement), ce qui rend difficiles des recherches de longue durée. Du fait que le phosphore n'a qu'un seul isotope stable, les chercheurs ont commencé à étudier les possibilités qu'offrent les isotopes de l'oxygène présents dans les composés organiques et inorganiques du phosphore pour l'étude et la compréhension de la dynamique du phosphore dans les systèmes de culture et d'élevage en vue d'améliorer la fertilité des sols et la productivité agricole. Ces informations sont très importantes pour la gestion future du phosphore en vue de l'intensification durable de la production agricole et de l'atténuation des inconvénients de l'excès de phosphore dans l'environnement.

129. Pour analyser l'oxygène 18 du sol à partir de différentes fractions de phosphore du sol, le phosphate doit être extrait du sol, purifié et transformé en orthophosphate d'argent. Un groupe de scientifiques<sup>18</sup> a récemment mis au point des protocoles permettant d'estimer l'oxygène 18 pour des sols ayant différentes teneurs en phosphore et de disponibilités différentes pour les plantes dans divers pays. Des sols soumis à des pratiques de gestion agricole différentes (par exemple, applications d'engrais ou de fumier) ont révélé des signatures de l'oxygène 18 variables du phosphore du sol, ce qui montre qu'on pourrait utiliser l'oxygène 18 comme traceur isotopique pour étudier le cycle du

---

<sup>18</sup> Tamburini, F., Bernasconi, S.M., Angert, A., Weiner, T. et Frossard, E., 2010, *A method for the analysis of the  $\delta^{18}O$  of inorganic phosphate extracted from soils with HCl*. European Journal of Soil Science, 61, 6, 1025-1032.

phosphore du sol, déterminer ses sources et, en définitive, mieux comprendre sa dynamique dans les agro-écosystèmes.

## **F. Santé humaine**

### **F.1. Nutrition**

130. Les techniques d'isotopes stables basées sur la dilution du deutérium sont des outils importants pour l'évaluation de la composition corporelle et de l'absorption de lait maternel des enfants allaités. Alors qu'elles n'étaient que des outils de recherche disponibles uniquement dans quelques centres d'excellence, principalement dans les pays industrialisés, elles ont évolué ces dernières années grâce à l'appui de l'Agence pour devenir des outils d'évaluation des interventions nutritionnelles dans le domaine de la santé publique dans les pays en développement. Ce changement a été facilité par l'accent mis sur l'introduction de techniques spectroscopiques conviviales pour l'analyse de l'enrichissement en deutérium dans des spécimens contenant de l'eau. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est une technique facile à apprendre et relativement abordable, et les instruments nécessitent peu de maintenance. Elle est donc particulièrement indiquée pour les pays en développement ayant des ressources limitées. Avec l'appui de l'Agence, une importante capacité a été mise en place au cours des deux dernières années en Afrique et en Amérique latine, et les techniques d'isotopes stables utilisant l'IRTF pour l'analyse du deutérium dans la salive sont actuellement utilisées dans l'évaluation des interventions nutritionnelles en vue de fournir aux professionnels de la santé et aux décideurs des éléments de preuve pour ces interventions dans le cadre des efforts visant à assurer une croissance saine aux nourrissons et aux enfants.

### **F.2. Progrès dans les applications en radio-oncologie<sup>19</sup>**

131. La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RTC-3D) est utilisée pour décrire la conception et la mise en œuvre de plans de traitements radiothérapeutiques basés sur des données d'images en 3D, les zones de traitement étant bien délimitées pour permettre de se concentrer uniquement sur le tissu cible. Utilisée avec ou sans modulation de l'intensité, elle permet désormais de faire correspondre la dose de rayonnements prescrite à la forme de la tumeur et de mieux protéger ainsi les tissus sains voisins.

132. Les radio-oncologues sont confrontés à des problèmes particuliers dans les régions du corps où les organes et les tumeurs bougent pendant le traitement. À mesure que la dose de rayonnements administrée devient plus précise, les mouvements des organes et des tumeurs deviennent un facteur important qui influence la précision de cette dose. Cela est particulièrement sérieux pour les tumeurs situées dans la poitrine, qui bougent pendant la respiration. Il en est de même des tumeurs situées dans le larynx, l'abdomen (foie), la prostate et la vessie, ainsi que le pelvis en général, qui bougent tous pendant et entre les applications du traitement.

133. Grâce au développement de la radiothérapie asservie à la respiration, le mouvement des tumeurs peut désormais être pris en compte de manière très précise. En radiothérapie informatisée asservie à la respiration, une petite boîte en plastique avec des marqueurs réfléchissants est placée sur l'abdomen du patient. Ces marqueurs bougent pendant la respiration, et une caméra numérique connectée à une unité centrale de traitement suit ces mouvements en temps réel. Un programme informatique les

---

<sup>19</sup> De plus amples détails figurent dans les documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011* disponibles sur GovAtom.

analyse et déclenche le faisceau de traitement au même moment que le cycle de respiration. Avec cette technique, on peut aussi choisir la phase respiratoire. En fonction du site de la tumeur, celle-ci sera irradiée au cours de l'inspiration ou de l'expiration. Elle sera donc toujours touchée par le faisceau de rayonnements sans que des organes vitaux soient exposés.

### **F.3. Faits nouveaux en médecine nucléaire dans le domaine de la cardiologie**

134. Au cours des trois dernières années, il y a eu des avancées majeures en médecine nucléaire, en particulier dans le domaine de la cardiologie. On a assisté à une réduction du temps de balayage et de la dose de rayonnements administrée aux patients, accompagnée d'une amélioration de la qualité générale des images, ce qui permet donc des diagnostics plus fiables et plus efficaces des maladies cardiovasculaires et améliore le processus.

135. Le concept technologique des systèmes traditionnels de gamma-caméra d'Anger utilisés en imagerie SPECT n'a pas changé au cours des cinquante dernières années. Il est basé sur des cristaux d'iodure de sodium dopés au thallium qui scintillent en réponse à des photons gamma, en produisant un faible flash de lumière, couplé à une série de tubes photomultiplicateurs qui détectent le flash fluorescent. Toutefois, une nouvelle technologie combine de nouveaux matériaux détecteurs comme le tellure de zinc et de cadmium, le collimateur sténopé ciblé, la reconstruction tridimensionnelle, et les modèles d'acquisition de données. Dans une caméra d'Anger traditionnelle, un rayon gamma frappe un cristal de scintillation d'iodure de sodium en produisant un flash de lumière ; un tube photomultiplicateur transforme alors le photon de la lumière en charge électrique, achevant un processus en deux étapes. Avec un détecteur d'état solide, le rayon gamma frappe un type différent de cristal, comme le tellure de cadmium-zinc, qui est un semi-conducteur qui convertit le photon directement en signal électronique numérique, un processus en une étape.

136. Le nouveau système à grande vitesse est caractérisé par une augmentation de l'efficacité, ce qui permet de réduire le temps de balayage et la dose de rayonnements administrée sans compromettre la qualité des études et les capacités de diagnostic. Avec les nouveaux systèmes, la dose efficace de rayonnements est de l'ordre de 1/10 de celle administrée avec la technique traditionnelle de médecine nucléaire.

137. Le temps de balayage est réduit à quatre minutes de stress/deux minutes de repos et d'acquisition d'images avec la caméra grande vitesse, et on obtient des images de meilleure résolution et un nombre similaire d'anomalies que pour les images obtenues par perfusion myocardique SPECT traditionnelle (Figure F-1.)<sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> Tali Sharir, MD, Piotr J. Slomka and Daniel S. Berman, MD, *Solid-State SPECT technology: fast and furious*. J Nucl Med 2010; 51:890-6.

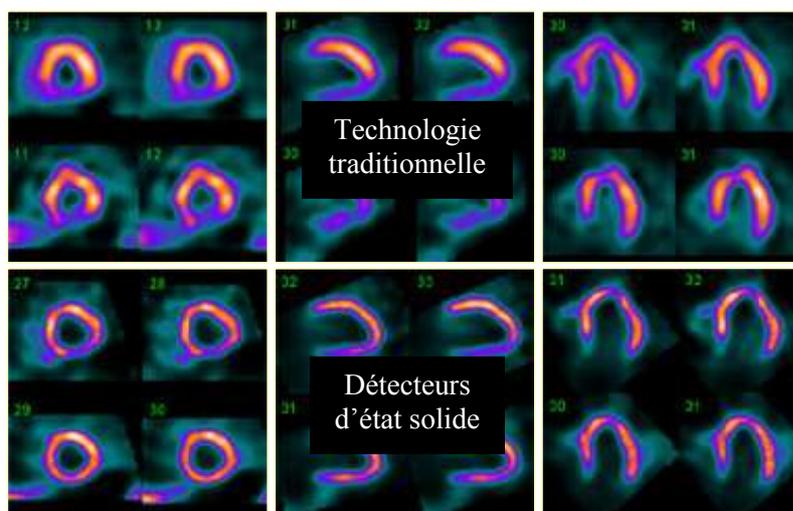


FIG. F-1. Images de perfusion myocardique avec la technologie SPECT traditionnelle (rangée du haut) et une nouvelle caméra cardiaque dédiée équipée de détecteurs d'état solide au tellure de cadmium-zinc (rangée du bas). Les études ont été effectuées consécutivement sur le même patient. La différence de résolution des images peut être facilement appréciée (avec l'aimable autorisation des professeurs B. Hutton et S. Ben-Haim, UCL Hospitals, Londres, R-U).

138. Les nouveaux systèmes permettent de combiner les images de médecine nucléaire moléculaire et les détails atomiques fournis par les appareils de tomographie informatisée. Les deux différents types d'équipement, combinés en « systèmes hybrides », permettent d'évaluer simultanément la fonction et la structure dans le cadre d'une procédure diagnostique unique pour tirer le maximum de chaque modalité. Il s'agit d'une énorme amélioration des soins au patient qui est actuellement appliquée en cardiologie nucléaire et sera certainement plus largement utilisée dans l'avenir dans d'autres domaines cliniques comme l'oncologie.

## G. Environnement

### G.1. Recours à la technologie nucléaire pour une alerte rapide concernant la prolifération d'algues marines nuisibles

139. La prolifération d'algues marines nuisibles est causée par la croissance et l'accumulation d'algues microscopiques, dues principalement à des activités humaines. Le phytoplancton toxique est filtré de l'eau de mer comme aliment par les fruits de mer qui accumulent alors les algues toxiques jusqu'à des niveaux qui peuvent être mortels pour l'homme et les autres consommateurs. En plus des cas de décès et d'empoisonnement ainsi que des effets toxiques mentionnés par des pays, en 2002, le Programme d'action mondial des Nations Unies pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres du Programme des Nations Unies pour l'environnement rapporte que les proliférations d'algues nuisibles occasionnent des pertes économiques considérables estimées à des centaines de millions de dollars.

140. Aux États-Unis d'Amérique et dans l'UE, tous les conteneurs et toutes les expéditions de produits de mer doivent être accompagnés d'une étiquette et d'un certificat médical précisant l'origine des produits, le producteur et la date de récolte. Ces informations doivent accompagner ceux-ci au cours du transport, du traitement et de la distribution jusqu'à la vente au détail, pour permettre leur traçage au cas où un problème de santé surviendrait. En 2010, l'Union européenne (UE) et les

États-Unis d'Amérique ont commencé à examiner la possibilité d'exiger un certificat de non contamination par des toxines d'algues nuisibles et cette possibilité est encore à l'étude. Si la législation est adoptée, toutes les importations de produits de mer chers dépourvus d'un tel certificat seront interdites à l'avenir. En 2009, le groupe CONTAM sur la contamination de la chaîne alimentaire de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a noté que « la méthode actuelle de dosage biologique sur souris n'est pas considérée comme un outil approprié pour les besoins du contrôle ». La méthode du dosage récepteur-ligand, une technique nucléaire basée sur l'utilisation de toxines radiomarquées, a été définie en 2010 par AOAC International (The Scientific Association Dedicated to Analytical Excellence) comme une des deux autres méthodes mises au point possibles qui ont été testées avec succès dans des études de prévalidation et qui seront importantes pour les organismes nationaux de réglementation en ce qui concerne l'exportation des produits de mer.

141. La méthode du dosage récepteur-ligand est aussi un puissant outil de recherche pour mieux évaluer la dynamique des toxines des algues en tant que fonction des changements physico-chimiques dans la colonne d'eau, qui peut aider à déterminer les facteurs qui régulent la toxicité et faciliter l'élaboration de modèles prédictifs de la toxicité des proliférations d'algues. Des études scientifiques sont actuellement menées dans un centre collaborateur de l'Agence aux Philippines avec cette technique, pour évaluer la capacité d'accumulation des toxines des proliférations d'algues nuisibles dans des espèces de produits de mer tels que les moules et les huîtres.

142. Les demandes de mise en œuvre de cette technique émanant des États Membres sont de plus en plus nombreuses comme le montre la figure G-1. Son utilisation devrait donc continuer d'augmenter au cours de la prochaine décennie.

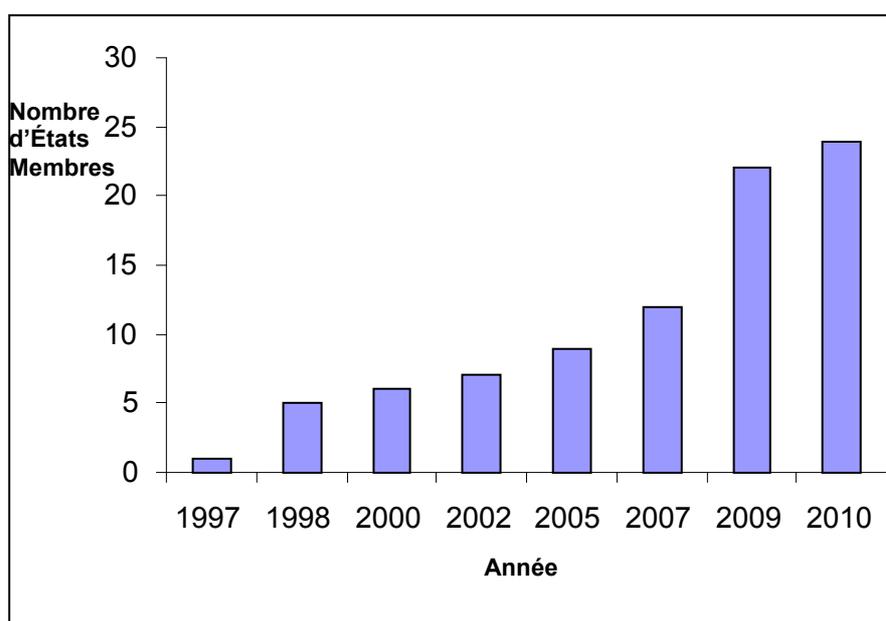


FIG. G-1. Nombre total d'États Membres qui ont demandé le transfert de la méthode du dosage récepteur-ligand à travers des programmes de coopération technique.

## **G.2. Recours aux radionucléides à longue période pour la compréhension des processus environnementaux**

143. Compte tenu de leur grande variabilité et de leurs différentes propriétés physiques et chimiques, les radionucléides à longue période ont été utilisés pour étudier les processus biogéochimiques (par exemple les migrations, les processus océanographiques ou la sédimentation). Les caractéristiques radioactives de ces nucléides et la variation du ratio nucléide précurseur – produits de filiation en fonction du temps sont utilisées pour les mesures de datation (par exemple la datation au carbone 14 ou à l'uranium-plomb) et pour l'étude des processus naturels temporels comme les migrations et la sédimentation.

144. Ces nucléides à longue période peuvent servir de traceurs naturels et artificiels et d'horloges radioactives dans l'environnement, ce qui permet aux chercheurs de dater et d'étudier des processus environnementaux à grande échelle, et de recueillir des données autrement impossibles à obtenir. En outre, avec les incertitudes qui entourent les scénarios climatiques futurs et les réponses possibles de l'environnement, la recherche se tourne de plus en plus vers les traceurs et les méthodologies de datation basés sur les radionucléides pour améliorer la compréhension des processus environnementaux et des changements du milieu marin, des ressources en eau douce et de l'environnement terrestre.

145. Les radionucléides permettent d'étudier les ressources et les processus océanographiques ainsi que la contamination marine d'un point de vue quantitatif et peuvent, dans le même temps, servir à examiner les problèmes de gestion des zones côtières. Étant donné qu'ils renferment une « horloge » compte tenu de leur décroissance au cours du temps, ils peuvent servir à étudier les processus biogéochimiques temporels de l'environnement marin.

146. Ces deux dernières décennies, compte tenu du développement rapide de l'analyse d'éléments inorganiques par des instruments de spectrométrie de masse, l'utilisation de spectromètres de masse à source plasma à couplage inductif (ICP-MS), notamment de spectromètres de masse à secteur magnétique couplé à une torche plasma équipés d'analyseurs à secteurs magnétiques à double focalisation, est devenue un outil complémentaire et de remplacement des méthodes radioanalytiques traditionnelles (par exemple la spectrométrie alpha et la scintillation liquide) pour l'analyse des radionucléides à longue période. La prédominance des techniques de spectrométrie de masse dans le domaine des analyses isotopiques est due au fait qu'elles demandent moins de temps, peuvent avoir une limite de détection plus basse, et sont très précises et très exactes. L'ICP-MS est parfois la seule technique permettant de déterminer une « empreinte » isotopique, en particulier pour les isotopes mineurs d'un élément.

147. Les sources de contamination de l'environnement peuvent être déterminées par une abondance isotopique et/ou une analyse des rapports isotopiques qu'on utilise comme une sorte d'« empreinte » de la contamination. Les substances chimiques produites de diverses sources par des processus essentiellement différents sont censées avoir des compositions isotopiques spécifiques qui peuvent servir à déterminer ces sources.

148. Une fois les différentes sources (par exemple anthropique ou géogénique naturel) déterminées, l'abondance isotopique et les rapports isotopiques peuvent être utilisés pour quantifier leurs contributions respectives. Les signatures isotopiques sont la base de l'étude des changements historiques et environnementaux des sites d'échantillonnage choisis.

## H. Ressources en eau<sup>21</sup>

149. Les études faisant appel aux isotopes stables et radioactifs viennent appuyer la gestion globale des ressources en eaux souterraines à mesure que la rapidité et la rentabilité de ces techniques gagnent en reconnaissance. Cela a été le cas à plusieurs reprises récemment. Par exemple, pour l'aquifère de Guarani (Amérique du Sud), le bassin du Tadla (Maroc) et l'aquifère des grès de Nubie (Afrique du Nord), l'interprétation des données isotopiques a servi non seulement à confirmer les résultats d'études hydrologiques classiques mais aussi à donner des indications sur l'écoulement des eaux souterraines et la dynamique des aquifères. Des isotopes ont été en particulier utilisés dans ces domaines pour définir les sources et les mécanismes de réalimentation des eaux souterraines, pour déterminer l'âge et la vitesse de mouvement de ces dernières, et pour quantifier le mélange des eaux souterraines entre aquifères. L'application des techniques isotopiques aux études hydrologiques en général et à la gestion globale des ressources en eaux souterraines en particulier devrait se développer de manière significative dans les prochaines années.

## I. Production de radio-isotopes et technologie des rayonnements

### I.1. Radio-isotopes et radiopharmaceutiques

#### I.1.1. Agents de ciblage moléculaire pour l'imagerie et la thérapie

150. Les modalités d'imagerie s'appuyant sur les radio-isotopes telles que la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT) et la tomographie à émission de positons (PET) nécessitent constamment de nouveaux radiopharmaceutiques (composés chimiques ou substances biologiques marqués par un radio-isotope) pour faire face aux problèmes de diagnostic. Les radiopharmaceutiques très spécifiques utilisés comme marqueurs biologiques des processus moléculaires qui sont à l'origine d'une maladie, approche appelée « imagerie moléculaire », servent soit d'indicateur précoce d'une maladie, soit de paramètre objectif pour mesurer l'efficacité d'un traitement, tout particulièrement dans les cas de cancers. Un certain nombre de composés marqués ont été mis au point pour cibler des processus biologiques auparavant inexplorés. Il a fallu, pour leur préparation, établir des procédures très efficaces, après quoi de nouvelles méthodes ont été élaborées. Dans le domaine de la PET, de nouveaux systèmes générateurs et cyclotrons compacts de production de gallium 68, de fluor 18 et de carbone 11, ainsi que de nouveaux modules de synthèse automatique basés sur la microfluidique, font l'objet d'études intensives.

151. L'élaboration de nouvelles méthodes efficaces de traitement du cancer est l'un des défis les plus urgents à relever en médecine radiologique. La technique d'imagerie moléculaire diagnostique a été développée avec succès et utilisée pour appliquer une dose radioactive thérapeutique à une tumeur afin de détruire les cellules cancéreuses (radiothérapie). On incorpore à cette fin le radionucléide thérapeutique approprié dans un vecteur moléculaire qui, après avoir été administré *in vivo*, se concentre rapidement au niveau de la tumeur en raison de son affinité particulière avec une cible moléculaire émise de manière sélective par les cellules cancéreuses. Ainsi, la radioactivité se fixe solidement à l'endroit exact de la tumeur, et les particules émises lors de la décroissance des

---

<sup>21</sup> De plus amples détails figurent dans les documents ayant trait au *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2011* disponibles sur GovAtom.

radionucléides interagissent étroitement avec les cellules cancéreuses sans barrière biologique. Les tumeurs neuroendocrines sont notamment celles qui se prêtent le mieux à la radiothérapie basée sur les peptides marqués à l'yttrium 90 ou au lutécium 177, appelés respectivement DOATATOC et DOTATAE. Un autre avantage de la radiothérapie est la disponibilité d'un nombre important de nucléides radioactifs ayant des caractéristiques adaptées aux applications thérapeutiques (comme l'yttrium 90, le lutécium 177, le cuivre 67, le cuivre 64, le rhénium 188 et le bismuth 213), qui peuvent être chimiquement liés à diverses biomolécules porteuses servant au ciblage sélectif de différents types de cellules cancéreuses.

### **I.1.2. Sécurité des approvisionnements en molybdène 99 et en technétium 99m<sup>22</sup>**

152. Les graves ruptures d'approvisionnement en molybdène 99 produit par fission, et par conséquent les pénuries de générateurs de technétium 99m, qui se sont produites à partir de la fin de l'année 2007 jusqu'au troisième trimestre 2010, ont beaucoup stimulé l'intérêt pour l'étude et la mise au point de technologies de substitution<sup>23</sup>. Recourir à des technologies n'utilisant pas d'uranium hautement enrichi et résoudre les questions de développement qui y sont liées, et employer des méthodes basées sur les accélérateurs, contribueraient à réduire la dépendance vis-à-vis des réacteurs anciens utilisés pour la production de molybdène 99 par fission. Par exemple, des travaux de recherche sont menés sur la production de molybdène 99 par réaction photonucléaire à partir de cibles de molybdène 100 très hautement enrichies [molybdène 100 (gamma, neutron) molybdène 99] dans des accélérateurs d'électrons de 15–20 MeV<sup>24</sup>.

153. Des chercheurs canadiens proposent de produire directement du technétium 99m en cyclotron comme mesure de substitution pratique pour atténuer, au moins partiellement, les pénuries dans les pays ayant à proximité des cyclotrons de faible ou moyenne énergie. Les aspects économiques de la production directe quotidienne des quantités requises de technétium 99m doivent être examinés plus avant. La méthode de production directe de technétium 99m par réaction molybdène 100 (p,2n) technétium 99m s'appuie sur l'utilisation de quelque 40 cyclotrons capables d'accélérer les protons dans la gamme d'énergie 20-30 MeV (Fig. I-1.). Des cibles de molybdène 100 hautement enrichi sont nécessaires pour suivre cette méthode afin de garantir la pureté radionucléidique du technétium 99m requis pour les applications médicales.

154. Par conséquent, pour les deux méthodes susmentionnées, la technologie de récupération et de recyclage des cibles de molybdène 100 enrichi serait une condition essentielle, et des protocoles et méthodes adaptés doivent encore être élaborés.

---

<sup>22</sup> Voir également la section D.2. intitulée « Réacteurs de recherche »

<sup>23</sup> De plus amples informations sont disponibles dans l'annexe VII du Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2010

<sup>24</sup> NEA/OECD Report 2010 on 'The Supply of Medical Radioisotopes – Review of Potential Molybdenum-99. Technetium-99m Production Technologies

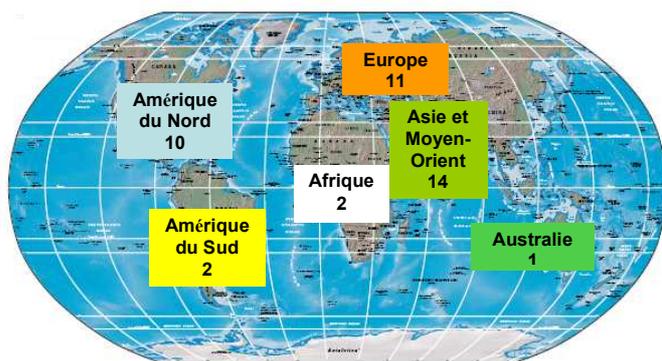


FIG. I.1. Répartition des cyclotrons d'une énergie supérieure à 20 MeV pour la production d'isotopes médicaux [source : Dr. D. Schlyer, Laboratoire national de Brookhaven (États-Unis d'Amérique), d'après les données de quatre grands fabricants de cyclotrons]

## I.2. Application de la technologie des rayonnements

### I.2.1. Méthodes intégrées de gestion des sédiments basées sur les radiotraceurs et la simulation par ordinateur

155. Ces dernières années, on a appliqué de plus en plus souvent une méthode intégrée basée sur la modélisation et les traceurs pour faire face au problème complexe du mouvement des sédiments dans les zones côtières et les fonds marins. Les techniques s'appuyant sur les radiotraceurs donnent des informations quantitatives comme la vitesse, l'épaisseur et le débit solide, qui peuvent être utilisées pour valider des modèles mathématiques. De nouveaux systèmes avancés ont été mis au point (Fig. I-2.) comme les systèmes compacts d'acquisition de données intégrés au système mondial de localisation (GPS) pour surveiller les concentrations de radiotraceurs en fonction de la latitude et de la longitude ; les systèmes d'injection améliorés pour permettre une injection sûre et facile des radiotraceurs ; et de nouveaux logiciels pour le traitement et l'interprétation appropriés des données. Par exemple, en 2009 et 2010, des études basées sur les radiotraceurs ont été menées en Inde, où de la poudre de verre marquée au scandium 46 a été utilisée comme traceur dans une décharge située dans le port de Visakhapatnam et dans deux zones proposées à cette fin dans le port de Kolkata. Selon les résultats, la zone existante et l'une des zones proposées étaient appropriées pour l'immersion des sédiments de dragage ; en revanche, dans l'autre zone proposée, on a observé le mouvement d'une grande quantité de sédiments vers un chenal de navigation.

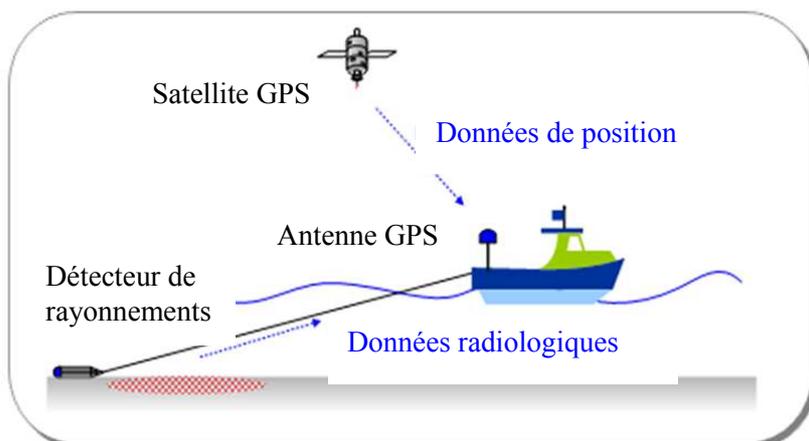


FIG. I-2. Schéma d'un système de comptage gamma intégré au GPS pour les études de traçage des sédiments dans une zone côtière

### I.2.2. Accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie

156. En 2010, la croissance la plus rapide relevée sur le marché des accélérateurs industriels d'électrons ([www.Radtech.org](http://www.Radtech.org)) a été celle des appareils d'une énergie allant de moins de 100 keV à quelques centaines de keV, soit une énergie suffisamment faible pour qu'ils puissent être équipés d'une protection en métal à haute densité – très souvent en plomb mais aussi plus récemment en acier. La plupart des accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie peuvent être intégrés dans des processus industriels continus comme dans ceux des industries graphiques et du revêtement.

157. Le traitement des encres, des revêtements et adhésifs par faisceaux d'électrons évite d'avoir à recourir à des composés organiques volatiles, ce qui permet aux fabricants d'atteindre de hauts niveaux de production tout en réduisant au minimum la consommation d'énergie et en limitant l'impact sur l'environnement. Dans ces applications, la technologie des faisceaux d'électrons contribue pour 90 % à la réduction de la consommation d'électricité par rapport aux méthodes traditionnelles de séchage et de traitement thermiques. Des accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie compacts sont disponibles à un coût modéré auprès de plusieurs fabricants ; ils sont utilisés en laboratoire et intégrés dans les procédés de revêtement, d'impression et de traitement des surfaces à grande vitesse. La figure I-3. donne un exemple de ce type d'appareil, d'une énergie comprise entre 80 et 120 keV.

158. Les accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie servent aussi pour la réticulation des films thermorétractables et nanocomposites utilisés, par exemple, dans le conditionnement des produits alimentaires. Ces films prolongent la durée de conservation de la viande, des volailles et des produits laitiers et sont utilisés pour mettre au point des emballages résistants à la fraude. Le recours au traitement par faisceaux d'électrons des matériaux d'emballage et aux applications connexes a augmenté au cours des deux dernières années en réponse à l'évolution des exigences du marché et aux demandes d'innovations.



FIG. I-3. Unité autoblindée AEB de faible énergie pour le développement des applications des faisceaux d'électrons (source : <http://www.aeb.com/>)