

Conférence générale

GC(53)/INF/3

5 août 2009

Distribution générale

Français

Original : anglais

Cinquante-troisième session ordinaire

Point 18 de l'ordre du jour provisoire
(GC(53)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009

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 2008.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009* couvre les domaines suivants : applications énergétiques, fission et fusion avancées, données atomiques et nucléaires, applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, technologies nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, environnement, ressources en eau, et production et disponibilité des radio-isotopes. On trouvera sur le site web de l'Agence¹, en anglais, des informations complémentaires sur les faits marquants concernant la sélection des plantes par mutations ; les résultats et les tendances en matière d'assurance de la qualité en dosimétrie ; l'utilisation des isotopes pour la gestion des cours d'eau et des aquifères internationaux ; les méthodes avancées de construction de nouvelles centrales nucléaires ; les interfaces entre les centrales nucléaires et le réseau électrique ; et l'intégration des stratégies concernant le climat, les sols, l'énergie et l'eau (CLEW).
- Des informations sur les activités de l'AIEA dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires figurent également dans le Rapport annuel 2008 (GC(53)/7), en particulier dans la partie Technologie, et dans le Rapport sur la coopération technique pour 2008 (GC(53)/INF/5).
- 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.

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

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. L'année 2008 a été une année paradoxale pour l'électronucléaire. Les projections de croissance future ont été revues à la hausse, mais aucun réacteur nouveau n'a été connecté au réseau. C'est la première fois depuis 1955 que pas un seul réacteur n'entre en service. Il y a eu, toutefois, dix mises en chantier, nombre le plus élevé depuis 1985.
2. Au moins jusqu'au début de la crise financière mondiale, les estimations de coûts pour les nouveaux réacteurs nucléaires étaient souvent plus élevées que celles des années précédentes, en particulier dans les régions ayant une expérience moins récente d'une construction nouvelle. Toutefois, les objectifs de croissance de l'électronucléaire ont été relevés en Fédération de Russie et la Chine est actuellement aussi en train d'y réfléchir. L'Inde a négocié un accord de garanties avec l'Agence en août, et le Groupe des fournisseurs nucléaires l'a par la suite exemptée des restrictions précédentes sur le commerce nucléaire, ce qui devrait lui permettre d'accélérer l'expansion prévue de l'électronucléaire.
3. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a reçu des demandes de licence combinée pour 26 nouveaux réacteurs. Le Département de l'énergie (DOE) a reçu 19 « demandes au titre de la partie I » de garanties fédérales de prêts pour la construction de 21 nouveaux réacteurs.
4. Néanmoins, l'expansion actuelle et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie. Sur les dix mises en chantier de 2008, huit étaient en Asie. Vingt-huit des 44 réacteurs en construction à la fin de l'année étaient en Asie, de même que 28 des derniers 39 réacteurs à avoir été connectés au réseau.
5. L'Arménie a rejoint la Fédération de Russie et le Kazakhstan comme participant au Centre international d'enrichissement d'uranium d'Angarsk, en Sibérie. Le gouvernement ukrainien a annoncé que l'Ukraine y participerait aussi. AREVA et USEC ont demandé au DOE des garanties de prêts pour la construction de l'installation d'enrichissement d'Eagle Rock, projet d'AREVA, et de l'Installation américaine de centrifugation d'USEC.
6. La construction d'un dépôt souterrain de déchets de faible ou moyenne activité a commencé à l'ancienne mine de fer de Konrad, en Allemagne. Aux États-Unis, le DOE a présenté une demande officielle pour la construction et l'exploitation du dépôt de déchets de haute activité de Yucca Mountain, au Nevada, planifié depuis longtemps.
7. L'Organisation internationale ITER pour l'énergie de fusion a demandé un permis de construire pour le Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER), réacteur expérimental à fusion, à Cadarache (France).

8. La gestion des ressources en eau, la sécurité alimentaire, la santé humaine, la protection de l'environnement et l'utilisation des radio-isotopes et des rayonnements sont autant de domaines dans lesquels les techniques nucléaires et isotopiques apportent des contributions valables au développement socio-économique dans le monde.

9. Dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture, les techniques nucléaires servent, avec des techniques complémentaires, à augmenter la productivité du bétail et à empêcher la propagation transfrontalière de maladies animales dangereuses, comme la grippe aviaire. Avec l'expansion du commerce international, la nécessité d'assurer la sécurité sanitaire des aliments augmente. Les techniques isotopiques servent à déterminer l'origine des aliments et à surveiller l'infiltration de contaminants pour assurer la qualité des produits alimentaires.

10. L'imagerie nucléaire joue un rôle croissant dans la mise au point de nouveaux médicaments. Les interventions visant à améliorer la nutrition font de plus en plus souvent partie des stratégies de développement ; l'utilisation d'isotopes stables pour évaluer les aspects nutritionnels clés, comme la composition corporelle, peut faire partie de stratégies efficaces de lutte contre l'apparition ultérieure de maladies chroniques. Le « remède miracle » longtemps recherché, une substance vraiment ciblée tuant les cellules cancéreuses sans endommager les tissus sains, devient progressivement, bien que lentement, une réalité en médecine nucléaire thérapeutique.

11. En gestion des ressources naturelles, les techniques nucléaires servent à évaluer les « particules chaudes », type de radionucléide qui peut être libéré dans l'environnement par un certain nombre de sources, dont les essais d'armes et les accidents nucléaires. Les isotopes stables servent à mieux comprendre les réseaux alimentaires complexes et le cycle du carbone dans l'environnement marin. Les radiotraceurs permettent de mesurer les impacts des changements climatiques, comme l'acidification des océans, sur la biodiversité marine. Les méthodes isotopiques contribuent de plus en plus à distinguer facilement les aquifères contenant des eaux anciennes non renouvelées des aquifères contenant des eaux modernes renouvelées, ce qui est une information importante pour une gestion efficace des eaux douces.

12. La demande mondiale de radio-isotopes et de sources de rayonnements augmente du fait de leur utilisation en médecine et dans l'industrie avec une expansion correspondante des centres régionaux de production de radiotraceurs cliniques pour l'imagerie par tomographie à émission de positons. L'an dernier, des interruptions des approvisionnements en molybdène 99, source du technétium 99m largement utilisé pour l'imagerie diagnostique, ont eu un impact négatif sur les services fournis aux patients dans des centres de médecine nucléaire dans le monde entier. L'appui des gouvernements et une coopération plus poussée entre les producteurs d'isotopes, y compris dans le cadre de partenariats entre les secteurs public et privé, seront nécessaires pour faire en sorte que des réacteurs appropriés servent à l'irradiation des cibles d'uranium faiblement enrichi pour la production de molybdène 99 à l'avenir.

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

13. Fin 2008, il y avait 438 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde. Aucun nouveau réacteur n'a été connecté au réseau en 2008, et Bohunice-2 a été mise à l'arrêt à la fin de l'année en application de l'accord d'adhésion de la Slovaquie à l'Union européenne (UE). La capacité nucléaire de production dans le monde est restée inchangée à 372 GWe (voir le tableau A-1).

14. Il y a eu dix mises en chantier en 2008 : Fangjiashan-1, Fuqing-1, Hongyanhe-2, Ningde-1 et -2 et Yangjiang-1 (tous de 1 000 MWe) en Chine, Novovoronezh 2-1 et Leningrad 2-1 (les deux de 1 085 MWe) en Fédération de Russie, et Shin-Wolsong-2 (960 MWe) et Shin-Kori-3 (1 340 MWe) en République de Corée. En 2007, il y avait eu huit mises en chantier et la reprise de la construction active d'un réacteur. En 2006, il y avait eu quatre mises en chantier et la reprise de la construction d'un réacteur.

15. L'expansion actuelle et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie. Sur les dix mises en chantier de 2008, huit étaient en Asie. Comme le montre le tableau A-1, sur les 44 réacteurs qui étaient en construction à la fin de l'année, 28 étaient en Asie, de même que 28 des 39 derniers réacteurs couplés au réseau. La Chine envisage d'augmenter son objectif concernant la part de l'électronucléaire d'ici 2020. L'Inde a négocié un accord de garanties avec l'Agence, et le Groupe des fournisseurs nucléaires l'a par la suite exemptée des restrictions précédentes sur le commerce nucléaire, ce qui devrait lui permettre d'accélérer l'expansion prévue de l'électronucléaire.

16. Les objectifs ont été revus à la hausse en Fédération de Russie et portés à 52-59 GWe de capacité électronucléaire en 2020. La Fédération de Russie a aussi autorisé le prolongement de l'exploitation de Kola-1 jusqu'en juillet 2018, soit une durée de vie autorisée de 45 ans.

17. Toujours en Europe, le Royaume-Uni a publié en janvier 2008 un livre blanc qui souligne qu'il est de l'intérêt du public que l'énergie nucléaire continue de faire partie des sources d'énergie à faible émission de carbone utilisées par le pays afin de contribuer à la réduction de ces émissions et d'assurer la sécurité des approvisionnements énergétiques. Plusieurs producteurs européens s'intéressent à la construction de nouveaux réacteurs au Royaume-Uni. L'Italie a annoncé son intention de rétablir l'infrastructure juridique, réglementaire et technique nécessaire pour relancer son programme électronucléaire, qui avait été arrêté à la suite d'un référendum en 1987. Un projet de loi annulant le moratoire nucléaire a été approuvé par la chambre basse du parlement début novembre. En Roumanie, des partenaires ont signé un accord d'investissement pour financer la construction de Cernavoda--3 et 4. En Bulgarie, des partenaires ont signé des contrats pour la construction de Belene-1 et 2. En Finlande, Teollisuuden Voima Oyj (TVO) a demandé l'approbation de principe du Conseil d'État pour la construction d'Olkiluoto-4, et deux autres demandes sont en cours de préparation par d'autres compagnies. En Suisse, Atel, Axpo et BKW FMB Energie SA ont soumis des demandes pour la construction de centrales nucléaires à Niederaamt, Beznau et Gösgen. En Slovaquie, Slovenské elektrárne a lancé un appel d'offres pour la reprise de la construction de Mochovce-3 et 4.

18. Au Canada, le gouvernement provincial de l'Ontario a choisi Darlington comme site de deux nouvelles tranches à la suite de la demande de licence de préparation de site soumise par

Ontario Power Generation en 2006. Ontario Power Generation a aussi obtenu des licences pour exploiter Darlington et Pickering-B pendant encore cinq ans, jusqu'en 2013.

19. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé dix augmentations de puissance, pour un total de 2 178 MWth. Elle a approuvé trois renouvellements de licence de 20 ans (pour une durée de vie autorisée totale de 60 ans), ce qui a porté à 51 le total des renouvellements de licence approuvés à la fin de 2008. S'agissant des nouvelles constructions, la NRC a reçu des demandes de licence combinée pour 26 réacteurs. Le Département de l'énergie (DOE) a reçu 19 « demandes au titre de la partie I » de garanties fédérales de prêts pour la construction de 21 nouveaux réacteurs. Le montant total demandé était de 122 milliards de dollars, considérablement plus que les 18,5 milliards de dollars proposés.

20. L'intérêt pour le lancement de nouveaux programmes électronucléaires reste élevé. Au cours des deux dernières années, 55 États Membres ont manifesté, en demandant à participer à des projets de coopération technique de l'Agence, leur intérêt pour l'introduction de l'électronucléaire.

21. L'Agence aide les États Membres intéressés à analyser les options énergétiques et à préparer l'introduction de l'électronucléaire et/ou la production d'uranium. Le nombre de projets de coopération technique (CT) approuvés portant sur l'analyse des options énergétiques est passé de 29 à 41 pour le cycle de CT commençant en 2009. Le nombre de projets sur la prospection et l'extraction d'uranium est passé de 4 à 10 et celui de projets sur l'introduction de l'électronucléaire de 13 à 44. L'Agence a introduit un nouveau service fournissant des conseils intégrés aux pays qui envisagent d'introduire l'électronucléaire. En 2007 et 2008, dix missions ont été organisées au Bélarus, en Égypte, en Jordanie, au Nigeria, aux Philippines, au Soudan, en Thaïlande et dans les pays du Conseil de coopération du Golfe (trois fois). L'Agence fournit aussi des documents d'orientation. En 2008, elle a publié *Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development* et *Financing of New Nuclear Power Plants* pour compléter deux publications de base parues en 2007, *Considerations to Launch a Nuclear Power Programme* et *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde
(au 31 décembre 2008)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2008		Expérience d'exploitation totale en 2008	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW·h	% du total	Années	Mois
ARGENTINE	2	935	1	692	6.9	6.2	60	7
ARMÉNIE	1	376			2.2	39.4	34	8
BELGIQUE	7	5 824			43.4	53.8	226	7
BRÉSIL	2	1 766			13.2	3.1	35	3
BULGARIE	2	1 906	2	1 906	14.7	32.9	145	3
CANADA	18	12 577			88.3	14.8	564	2
CHINE	11	8 438	11	10 220	65.3	2.2	88	3
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 634			25.0	32.5	104	10
FINLANDE	4	2 696	1	1 600	22.1	29.7	119	4
FRANCE	59	63 260	1	1 600	419.8	76.2	1 641	2
ALLEMAGNE	17	20 470			140.9	28.8	734	5
HONGRIE	4	1 859			13.9	37.2	94	2
INDE	17	3 782	6	2 910	13.2	2.0	301	4
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE			1	915				
JAPON	55	47 278	2	2 191	241.3	24.9	1 386	8
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	20	17 647	5	5 180	144.3	35.6	319	8
LITUANIE	1	1 185			9.1	72.9	42	6
MEXIQUE	2	1 300			9.4	4.0	33	11
PAYS-BAS	1	482			3.9	3.8	64	0
PAKISTAN	2	425	1	300	1.7	1.9	45	10
ROUMANIE	2	1 300			10.3	17.5	13	11
FÉDÉRATION DE RUSSIE	31	21 743	8	5 809	152.1	16.9	963	4
SLOVAQUIE	4	1 711			15.5	56.4	128	7
SLOVÉNIE	1	666			6.0	41.7	27	3
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			12.8	5.3	48	3
ESPAGNE	8	7 450			56.5	18.3	261	6
SUÈDE	10	8 996			61.3	42.0	362	6
SUISSE	5	3 220			26.3	39.2	168	10
UKRAINE	15	13 107	2	1 900	84.5	47.4	353	6
ROYAUME-UNI	19	10 097			48.2	13.5	1 438	8
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	100 683	1	1 165	806.7	19.7	3 395	9
Total ^{b, c}	438	371 562	44	38 988	2 597.8	14%	13 475	7

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) :

- 6 réacteurs (4 949 MWe) en service ; 2 réacteurs, 2 600 MWe en construction ;
- 39,3 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 17,5 % de l'électricité totale qui y est produite ;
- Expérience d'exploitation : 164 ans et un mois à la fin de 2008.

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

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

22. Chaque année, l'AIEA actualise ses projections haute et basse de la croissance mondiale de l'électronucléaire. En 2008, ces deux projections ont été revues à la hausse. Dans la projection basse actualisée, la capacité nucléaire mondiale atteint 473 GWe en 2030, contre 372 GWe à la fin de 2008. Dans la projection haute actualisée, elle atteint 748 GWe.

23. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a aussi révisé à la hausse d'environ 5 % sa projection de référence pour l'électronucléaire en 2030². Toutefois, avec 433 GWe de capacité nucléaire installée en 2030, le scénario de référence de l'AIE reste inférieur à la projection basse de l'AIEA. L'AIE a aussi publié deux scénarios de politique climatique. Le « scénario 550 », qui correspond à une stabilisation à long terme de la concentration des gaz à effet de serre à 550 parties par million de CO₂, équivaut à une hausse de la température globale d'environ 3 °C. Le « scénario 450 » équivaut à une hausse d'environ 2 °C. Dans le scénario 550, la capacité nucléaire installée en 2030 est de 533 GWe. Dans le scénario 450, elle est de 680 GWe.

24. L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire a publié *Nuclear Energy Outlook* en 2008, qui inclut des projections haute et basse de la capacité nucléaire installée jusqu'en 2050³. Pour 2030, la fourchette projetée est de 404 à 625 GWe, quelque peu inférieure à celle de l'AIEA. Pour 2050, la fourchette projetée est de 580 à 1 400 GWe.

25. L'Agence d'information sur l'énergie des États-Unis a aussi revu en légère hausse sa projection de référence pour l'électronucléaire en 2030 à 498 GWe⁴. Elle est donc légèrement supérieure à la projection basse de l'AIEA.

26. Toutes ces projections avaient été faites avant la crise financière de la fin 2008. Au moment de la rédaction du présent document, aucune projection analysant les conséquences de cette crise sur l'électronucléaire n'avait été publiée.

A.3. Cycle du combustible⁵

27. Le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), lancé en 2007, comptait 25 partenaires en 2008. Le Groupe de travail sur le développement des infrastructures du GNEP a entrepris de constituer une bibliothèque de références, de programmes, d'outils et de ressources mises en commun à l'appui du partage des ressources didactiques, de la promotion des possibilités d'apprentissage technique et de la mise en place de nouveaux programmes de formation théorique et pratique. Il a aussi lancé un certain nombre d'études de faisabilité pour les membres du GNEP qui envisagent pour la première fois de recourir à l'énergie nucléaire. Le Groupe de travail sur la fiabilité des services liés au combustible nucléaire du GNEP a achevé une enquête auprès des membres sur leurs cadres juridiques et

² Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE, *Perspectives énergétiques mondiales 2008*, Paris, 2008.

³ OECD Nuclear Energy Agency, *Nuclear Energy Outlook 2008*, Paris, 2008.

⁴ Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2008*, US Department of Energy, Washington, DC, 2008.

⁵ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le cycle du combustible figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/>) et à l'adresse suivante <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.

institutionnels relatifs au cycle du combustible afin de recenser les enjeux communs. Il s'intéressera ensuite à la partie terminale du cycle du combustible.

A.3.1. Ressources et production d'uranium

28. La 22^e édition du « Livre rouge »⁶ AEN/AIEA fait état d'une augmentation des ressources d'uranium, résultat de l'accroissement récent des activités de prospection dans le monde. Cette augmentation s'inscrit dans une tendance continue. Depuis quatorze ans (sept éditions du Livre rouge), les ressources d'uranium restantes signalées ont augmenté de plus de 2,4 millions de tonnes, bien que plus de 500 000 tonnes aient été extraites.

29. Les ressources répertoriées signalées (5,5 millions de tonnes d'uranium naturel) dureraient 83 ans au rythme de consommation actuel d'environ 70 000 tonnes par an. Ce nombre de 83 ans peut, toutefois, être trompeur car tous les chiffres concernant les ressources minérales varient avec le prix du produit, et l'uranium ne fait pas exception. L'augmentation signalée des ressources de 2005 à 2007 correspond à 11 ans de demande d'uranium de 2006, démonstration puissante de l'impact de la hausse des prix de l'uranium sur le chiffre des ressources totales. De plus, les chiffres donnés dans le Livre rouge pour les ressources d'uranium signalées ne représentent qu'une partie des ressources déjà connues et ne constituent pas un inventaire de la quantité totale d'uranium récupérable. On peut donner comme exemples de pays ayant des ressources connues mais non signalées la Fédération de Russie, les États-Unis et l'Australie.

30. La durée projetée de 83 ans indiquée pour les ressources répertoriées signalées au rythme de consommation actuel soutient favorablement la comparaison avec les 30 à 50 ans prévus pour d'autres produits de base (cuivre, zinc, pétrole et gaz naturel). Cependant, la demande devrait augmenter et il faut encore extraire les ressources. Les installations existantes, préfinancées, planifiées et potentielles de production d'uranium pourraient répondre aux besoins en uranium dans la projection haute de l'AIEA jusqu'aux alentours de 2025, pour autant que les mines existantes soient développées et que de nouvelles soient mises en exploitation comme prévu. Pour répondre à la demande additionnelle d'uranium, il faudrait créer des capacités d'extraction au-delà de ce qui est prévu. Cela devrait se produire si des commandes fermes de nouvelles installations nucléaires (dans la projection haute de l'AIEA) donnent confiance aux producteurs d'uranium quant aux perspectives d'augmentation des ventes à long terme. Il y a une certaine incertitude quant au volume d'uranium nouveau nécessaire pour répondre à la demande du fait de la disponibilité continue, quoique diminuante, de sources secondaires. Aujourd'hui, les sources secondaires fournissent quelque 40 % de la demande.

31. En 2008, le Kazakhstan a lancé plusieurs opérations de lixiviation in situ et en a porté plusieurs autres à leur pleine capacité conformément à son objectif de production de 10 000 tU/an en 2010. De nombreuses opérations de lixiviation in situ ont des capacités inférieures à 1 000 tU/an. Une nouvelle usine de préparation du minerai d'uranium, d'une capacité nominale de 220 tU/an, a été mise en chantier en 2008 à Tummalapalle, dans l'Andhra Pradesh (Inde).

⁶ AEN et AIEA, *Uranium 2007 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris, 2008.

A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible

32. La capacité mondiale de conversion est d'environ 75 000 tonnes d'uranium naturel par an (tU/an) pour l'hexafluorure d'uranium (UF₆) et de 4 500 tU/an pour le dioxyde d'uranium (UO₂). La demande actuelle est d'environ 70 000 tU/an. AREVA envisage de lancer la construction de sa nouvelle installation de conversion COMURHEX II en 2009, dont la capacité initiale prévue pour l'UF₆ serait de 15 000 tU/an en 2012.

33. La capacité mondiale d'enrichissement est actuellement d'environ 50 millions d'unités de travail de séparation par an (UTS/an) pour une demande totale d'environ 45 millions d'UTS/an. Trois installations commerciales d'enrichissement sont en construction : Georges Besse II en France, et l'Installation américaine de centrifugation (ACP) et l'Installation nationale d'enrichissement (NEF) aux États-Unis. Toutes trois utilisent le procédé de la centrifugation et devraient entrer en service en 2009. Georges Besse II et l'ACP doivent permettre de mettre à l'arrêt des installations d'enrichissement par diffusion gazeuse. AREVA et USEC ont demandé au DOE des garanties de prêts pour la construction de l'ACP d'USEC et de l'installation d'enrichissement d'Eagle Rock d'AREVA. L'Arménie a rejoint la Fédération de Russie et le Kazakhstan comme participant au Centre international d'enrichissement d'uranium d'Angarsk, en Sibérie, et le gouvernement ukrainien a annoncé en décembre que l'Ukraine y participerait aussi bientôt.

34. La capacité mondiale de fabrication est actuellement d'environ 11 500 tU/an (uranium enrichi) pour le combustible des réacteurs à eau ordinaire (REO) et d'environ 4 000 tU/an (uranium naturel) pour le combustible des réacteurs à eau lourde (REL). La demande totale est d'environ 12 000 tU/an. Certaines installations existantes sont en cours d'expansion, par exemple en Chine et en République de Corée. Une nouvelle installation de production de combustible à mélange d'oxydes (MOX) est en construction à Rokkasho (Japon) et devrait être achevée en 2012.

A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible

35. D'après les projections, la quantité totale de combustible usé déchargé dans le monde devait atteindre 324 000 tonnes de métaux lourds (tML) fin 2008. Sur ce total, environ 95 000 tML ont déjà été retraitées, 16 000 tML sont en entreposage pour être retraitées et 213 000 tML sont entreposées dans des piscines à combustible usé 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 par l'ajout de modules dans les installations d'entreposage à sec et par la construction de nouvelles installations.

36. La capacité mondiale de retraitement est d'environ 6 000 tML/an. Au Royaume-Uni, l'usine de retraitement de combustible THORP de Sellafield a repris du service commercial en 2007, après trois ans de fermeture suite à une fuite de radioactivité. Les essais de la nouvelle usine de retraitement de Rokkasho ont duré plus longtemps que prévu, et la mise en service commercial a été reportée jusqu'en 2009.

37. La construction d'un dépôt souterrain de déchets de faible ou moyenne activité a commencé à l'ancienne mine de fer de Konrad, en Allemagne. Il devrait commencer à recevoir des déchets dans les premiers mois de 2014.

38. En Hongrie, le dépôt permanent de déchets de faible ou moyenne activité de Bataapati a été inauguré en 2008. Les déchets seront entreposés temporairement dans une zone de réception en attendant que les cavités rocheuses de stockage définitif soient opérationnelles en 2010.

39. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB), qui est responsable de l'entreposage des déchets nucléaires suédois, a reçu une licence d'exploitation pour l'agrandissement de l'installation centrale d'entreposage intérimaire de combustible nucléaire usé d'Oskarshamm, dont la capacité passe de 5 000 à 8 000 tML.

40. Aux États-Unis, le DOE a présenté à la NRC une demande officielle de construction et d'exploitation du dépôt de déchets de haute activité de Yucca Mountain, au Nevada, planifié depuis longtemps. Celui-ci est prévu pour 70 000 tML de combustible nucléaire usé, dont 7 000 tML de déchets militaires.

41. Les statistiques mondiales du déclassé sont restées inchangées en 2008 : dix réacteurs de puissance dans le monde ont été complètement déclassés et leurs sites libérés sans restriction ; 17 réacteurs ont été partiellement démantelés et mis en attente sûre ; 32 réacteurs sont en cours de démantèlement avant une éventuelle libération du site ; et 34 réacteurs font l'objet de mesures de démantèlement minimales avant d'être mis en attente sûre de longue durée.

A.4. Autres facteurs déterminants pour l'avenir de l'électronucléaire

A.4.1. Aspects économiques

42. C'est en 2006 que le *Rapport sur la technologie nucléaire* a pour la dernière fois présenté succinctement des estimations de coûts pour les nouvelles centrales nucléaires. Ce résumé comparait les estimations de sept études publiées entre 2003 et 2005. Les coûts afférents à la construction instantanée d'une centrale étaient estimés entre 1 200 \$/kWe et 2 510 \$/kWe⁷.

43. L'année passée, la fourchette des estimations est passée dans la tranche supérieure. La figure A-1 montre les valeurs minimale et maximale des récentes estimations recueillies par l'Agence auprès de sources librement disponibles.

44. Il n'y a pas de véritable explication à l'aggravation de l'incertitude liée aux estimations de coûts (à savoir la fourchette large) ni à l'escalade de ces dernières (à savoir la fourchette haute), bien que plusieurs facteurs pouvant y avoir contribué aient été suggérés. En outre, les estimations de coûts apparaissant dans la figure A-1 ont été établies avant la crise financière de fin de 2008. À l'heure où le présent rapport est rédigé, l'impact de cette dernière sur les estimations des coûts de l'électronucléaire n'est toujours pas clair. La présente section résume donc les facteurs susceptibles d'avoir contribué à la hausse des estimations de coûts et de l'incertitude, mais, en l'absence d'études rigoureuses, elle ne peut offrir une véritable explication.

⁷ Les « coûts afférents à la construction instantanée d'une centrale » ne comprennent pas les frais des intérêts, les coûts financiers et les frais d'indexation pendant la construction - comme si la centrale était construite du jour au lendemain. Les frais d'indexation tiennent compte des hausses de prix pendant la construction. Il ne faut pas les confondre avec les dépenses imprévues qui ne concernent que les travaux inattendus.

45. La présente section s'intéresse avant tout aux coûts afférents à la construction instantanée d'une centrale, mais les intérêts durant la construction (IDC) sont aussi une composante importante pour les réacteurs nucléaires. Les estimations des IDC sont en général moins facilement communiquées par les financiers, les propriétaires et les parties prenantes et sont plus liées à des projets que les coûts afférents à la construction instantanée d'une centrale. Il est donc difficile d'établir un graphique significatif de l'ensemble des coûts (incluant les IDC) comparable à la figure A-1 sur les coûts afférents à la construction instantanée. Toutefois, l'incorporation des IDC peut jusqu'à doubler le coût total d'un projet, en particulier si des facteurs comme le délai de construction, le taux d'intérêt, ou les conditions du marché se détériorent pendant sa mise en œuvre. Leur importance ne devrait donc pas être éclipsée par l'accent mis sur les coûts afférents à la construction instantanée dans la présente section.

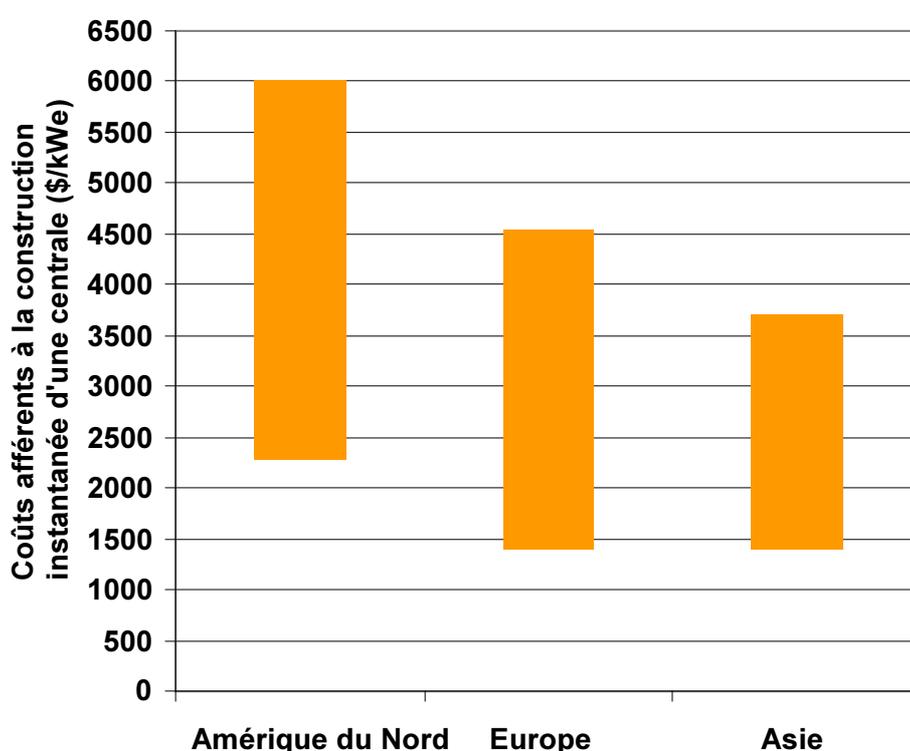


FIG. A-1. Valeurs minimale et maximale des estimations des coûts afférents à la construction instantanée de nouveaux réacteurs nucléaires, par région : 2007–2008.

Incertitudes des estimations de coûts

46. Le fait que différentes personnes emploient différentes définitions explique en partie les variations des estimations de coûts. Les éléments qui sont parfois inclus dans celles-ci et sont parfois exclus sont les coûts associés à l'évaluation des soumissions, à la sélection et à la préparation du site, à la délivrance des autorisations, les dépenses du propriétaire et les dépenses imprévues et certains frais de financement.

47. Certaines variations sont dues à des différences locales. Construire sur un site vierge est en général plus onéreux que construire sur un site déjà doté de réacteurs. Construire sur une zone plus active sismiquement est plus onéreux. Les frais de main-d'œuvre et de matériel varient et leur impact fluctue en fonction du degré de localisation, c'est-à-dire le pourcentage de composants de la centrale fabriqués ou achetés sur le marché local. Les subventions et les

garanties financières pour les investissements dans l'électronucléaire sont différents d'un pays et d'une région à l'autre. Les prescriptions réglementaires peuvent varier tout comme leur prévisibilité. L'incertitude diminue habituellement avec l'expérience — un fait que semble refléter la figure A.1. Les estimations de coûts et l'incertitude sont moins élevées en Asie, région ayant l'expérience la plus récente en matière de construction de nouveaux réacteurs. L'inverse est vrai pour l'Amérique du Nord, dont l'expérience est la plus ancienne.

48. Les dispositions contractuelles ont aussi un impact sur les estimations de coûts. Un contrat clés en main pourrait être plus onéreux qu'un contrat à prix coûtant majoré si le vendeur y inclut les risques inhérents à l'achèvement du projet. Les taux de change, les risques d'inflation, et leurs effets différentiels sur divers éléments de coûts ajoutent à la variabilité.

49. Des technologies différentes ont des coûts différents. Des modèles qui ont fait leurs preuves peuvent être moins onéreux que de nouveaux modèles, et la construction d'un réacteur de conception nouvelle coûtera certainement plus que celle des réacteurs suivants de même conception. Les estimations incorporent aussi différents rythmes d'apprentissage en anticipant la baisse des coûts avec l'expérience.

50. Les estimations peuvent aussi varier selon les perspectives. Dans un rapport de 2006, la Commission du développement durable du Royaume-Uni a déclaré que les vendeurs de systèmes de réacteur avaient un intérêt commercial évident, en particulier avant la signature d'un contrat, à sous-estimer les coûts⁸. Les compagnies d'électricité ont peut-être tendance à être plus prudentes.

Augmentations des estimations de coûts

51. Parmi les facteurs ayant vraisemblablement contribué à l'augmentation des estimations des coûts des nouveaux réacteurs, on peut citer un resserrement des marchés des produits de base et de fortes augmentations des prix internationaux de l'acier, du ciment, de l'énergie et d'autres éléments entrant dans la construction pendant une bonne partie de 2008. Si les estimations de coûts d'autres types de centrales ont également été affectées par ces augmentations, celles-ci ont été plus fortes dans le nucléaire du fait des coûts d'investissements initiaux élevés⁹. À la fin de 2008, le cours de la plupart des produits de base s'est inversé¹⁰, en partie pour des raisons cycliques (les prix élevés pratiqués précédemment ayant favorisé une augmentation de la capacité de production et une baisse de la demande), et en partie en raison de la crise financière.

52. La volatilité des prix des produits de base a probablement en soi également contribué à l'augmentation des provisions pour imprévus et donc des estimations des coûts. La crise financière a pu avoir un effet similaire.

53. Les estimations de coûts peuvent aussi avoir augmenté du fait de la transformation, au cours des dernières années, du marché nucléaire mondial, auparavant un marché de fournisseurs, en marché d'acheteurs, tendance qui en général exerce une pression à la hausse sur les prix. Le carnet de commandes des vendeurs est rempli à un niveau jamais vu depuis la

⁸ Commission du développement durable du Royaume-Uni, *The role of nuclear power in a low carbon economy — Paper 4: The economics of nuclear power*, établi par Science and Technology Policy Research (SPRU, Université du Sussex) et NERA Economic Consulting, mars 2006.

⁹ Toutefois, sur un cycle de vie et en termes de coûts de production, les centrales nucléaires sont les moins touchées puisque leurs besoins en matières spécifiques par KWh produit sont les plus faibles.

¹⁰ En novembre 2008, le prix de référence du cuivre avait diminué de moitié depuis septembre 2008 et le cours de l'acier à l'échelle mondiale avait chuté d'environ 80 % depuis juillet 2008.

fin des années 70. La capacité de forger des grosses pièces est limitée, et des délais d'exécution de plus de 50 mois sont monnaie courante.

54. Un autre facteur pouvant avoir contribué à l'augmentation globale des estimations est le fait que la majeure partie de ces estimations viennent d'Europe, et plus particulièrement d'Amérique du Nord, où l'absence d'expérience récente en matière de construction par rapport à l'Asie et de nouveaux modèles de réacteurs a vraisemblablement contribué à l'augmentation des estimations présentées dans la figure A-1.

55. Enfin, à mesure que les projets s'acheminent vers la phase d'exécution, il est possible qu'un plus grand pourcentage des estimations de coûts récentes reflète davantage la prudence des producteurs d'électricité que l'optimisme des vendeurs au stade de l'examen préalable et l'optimisme technologique de certains gouvernements et études théoriques.

A.4.2. Sûreté¹¹

56. Les indicateurs de sûreté, tels que ceux publiés par l'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO) et reproduits dans les figures A-2 et A-3, se sont nettement améliorés dans les années 90. Ces dernières années, la situation s'est stabilisée dans certains domaines. Toutefois, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant de vastes possibilités d'amélioration.

57. Des informations et les évolutions récentes concernant la sûreté pour l'ensemble des applications nucléaires sont présentées plus en détail dans le *Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour l'année 2008* (GC(53)/INF/2) de l'Agence.

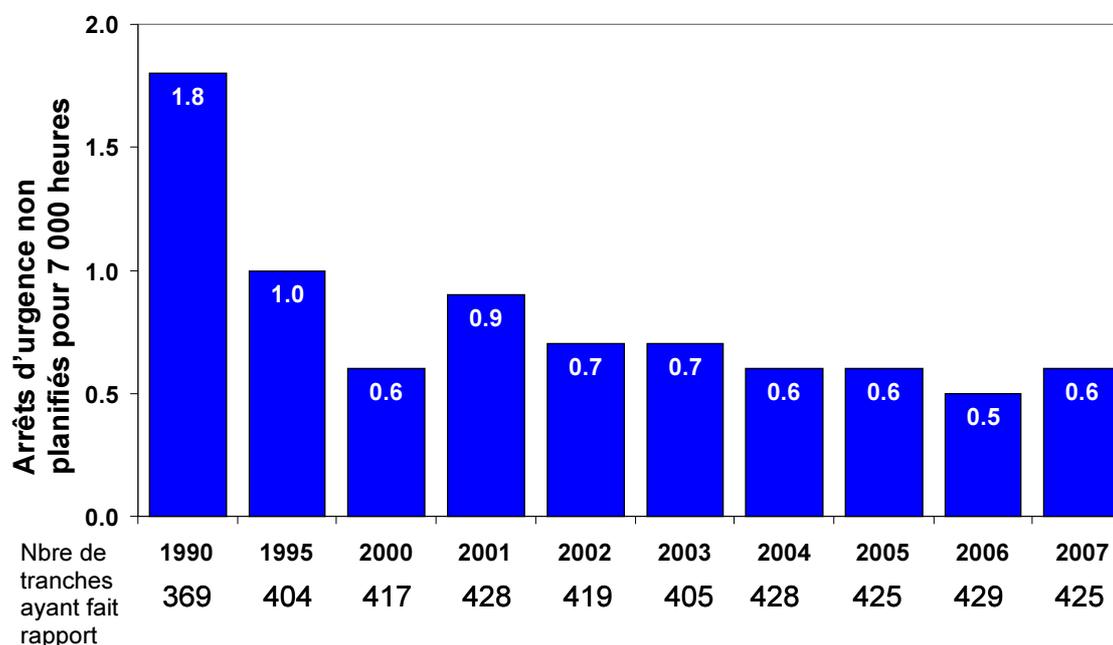


FIG. A-2. Arrêts d'urgence non planifiés pour 7 000 heures de criticité. Source : indicateurs de performance WANO en 2007.

¹¹ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2007/>) et sur le site : <http://www-ns.iaea.org/>.

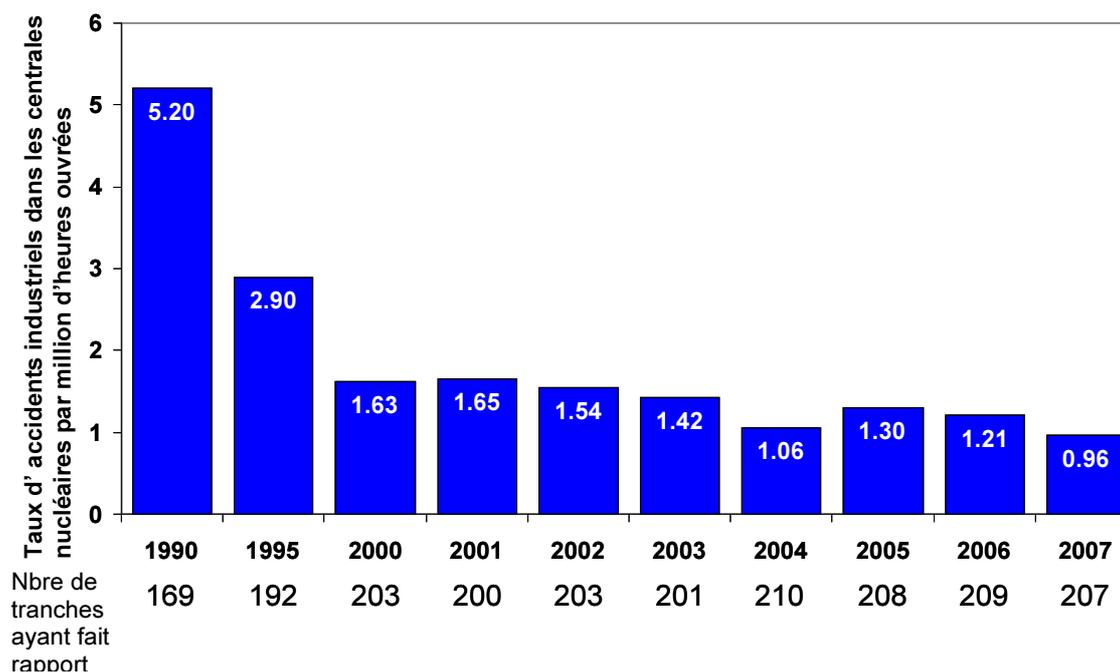


FIG. A-3. Taux d'accidents industriels dans les centrales nucléaires par million d'heures ouvrées. Source : indicateurs de performance WANO en 2007.

A.4.3. Mise en valeur des ressources humaines

58. Les estimations des besoins en ressources humaines associés à l'une des projections examinées dans la section A.2 ne sont pas facilement disponibles. En outre, rares sont les données sur le nombre de personnes ayant aujourd'hui les diverses compétences nécessaires à l'industrie nucléaire et sur le nombre de programmes de formation théorique et pratique pertinents.

59. Plusieurs pays ont exprimé des craintes quant à d'éventuelles pénuries de spécialistes ayant les compétences requises par l'industrie électronucléaire. Dans un rapport publié en 2000, l'AEN/OCDE quantifie pour la première fois la situation de la formation nucléaire dans ses pays membres, notant que dans la plupart des cas celle-ci a décliné dans la mesure où il a été de plus en plus difficile d'entretenir le savoir-faire et les compétences dans des technologies nucléaires clés¹². Toutefois, elle a aussi noté que les pertes globales de compétences et de savoir-faire variaient d'un pays à l'autre selon la vigueur du programme électronucléaire¹³. Paradoxalement, les craintes exprimées quant à des pénuries de main-d'oeuvre semblent être moins nombreuses dans les pays ayant un programme à croissance rapide.

60. Ces préoccupations ont incité les pouvoirs publics et l'industrie à prendre l'initiative d'attirer les étudiants et de développer la formation théorique et pratique dans les domaines liés au nucléaire. Selon les données disponibles, ces initiatives semblent être couronnées de

¹² Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?, Paris (2000).

¹³ OECD Nuclear Energy Agency, *Nuclear Energy Outlook 2008*, Paris, 2008.

succès. La figure A-4 montre l'augmentation du nombre de diplômés en génie nucléaire aux États-Unis, essentiellement à la suite du programme universitaire sur l'infrastructure des réacteurs et l'assistance à la formation.

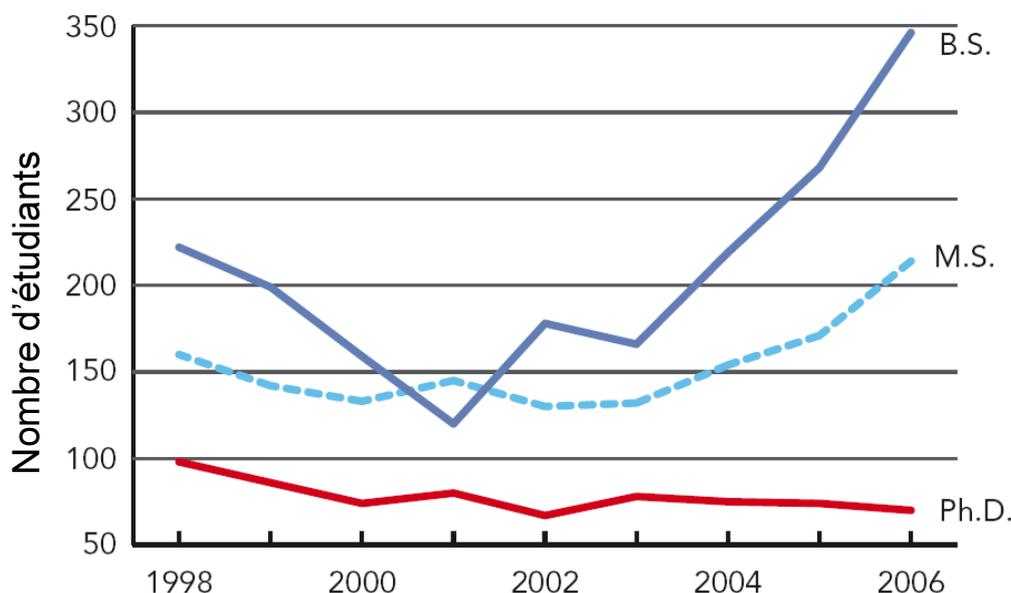


FIG. A-4. Diplômés en génie nucléaire dans des universités américaines (B.S. = licence ès sciences, M.S. = maîtrise ès sciences, Ph.D. = doctorat ès philosophie). (Source : OECD Nuclear Energy Agency, *Nuclear Energy Outlook 2008*, Paris, 2008).

61. Si les projections hautes concernant l'électronucléaire décrites dans la section A.2 se réalisent, il faudra que les bons résultats dont fait état la figure A-4 se répètent plusieurs fois. Ce défi sera important, mais pas sans précédent. Par exemple, la projection haute de l'Agence supposerait le raccordement au réseau de 17 nouveaux réacteurs en moyenne chaque année, essentiellement le même nombre que la moyenne annuelle de 16 nouveaux réacteurs durant les années 70. En outre, dans la projection haute, la part de l'électronucléaire dans la production mondiale d'électricité demeure pratiquement constante jusqu'en 2030, ce qui implique que d'autres sources d'électricité — et leurs besoins en main-d'œuvre — croîtront au même rythme que l'électronucléaire. Le défi à relever par l'électronucléaire n'est pas exceptionnel.

A.4.4. Acceptation de l'énergie nucléaire par le public

62. La première question abordée dans les guides de l'Agence à l'intention des pays envisageant d'introduire l'électronucléaire¹⁴ est intitulée « position nationale » : « Le gouvernement devrait exprimer clairement son intention de développer un programme électronucléaire et en faire part aux échelons local, national, régional et international ». Un avis comparable pourrait aussi être donné aux pays qui se sont déjà dotés de l'électronucléaire, et tous les gouvernements en faveur de l'électronucléaire devraient s'efforcer d'obtenir un large appui national.

63. La façon la plus courante de chercher à savoir si l'électronucléaire bénéficie d'un large appui national pour répondre aux attentes croissantes dont il est fait état dans la section A.2

¹⁴ AIEA, *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*, collection Énergie nucléaire, NG-G-3.1, Vienne (Autriche), 2007.

est de mener des enquêtes d'opinion. Toutefois, celles-ci ont leurs imperfections. Les réponses peuvent dépendre de la formulation de la question, et même des experts peuvent avoir des avis divergents sur l'interprétation de certaines réponses. Quoiqu'il en soit, il existe des techniques connues pour éliminer les biais lors de la sélection de l'échantillon, de la formulation des questions et de l'interprétation des résultats.

64. Les figures A-5 et A-6 présentent les tendances récentes ou, en l'absence de données chronologiques, un aperçu de l'acceptation de l'énergie nucléaire par le public dans les pays recourant déjà à l'électronucléaire (figure A-5) et dans quelques autres n'ayant pas de programme électronucléaire (figure A-6). La valeur sur l'échelle verticale, l'indice d'acceptation du public (IAP), correspond à la moyenne des enquêtes étudiées pour un pays et une année donnée, sur une échelle allant de zéro (rejet total) à 100 (acceptation totale).

65. L'IAP dans les pays qui ont déjà un programme électronucléaire (figure A-5) est en général plus élevé que dans les pays qui en sont dépourvus (figure A-6).

66. Dans les douze pays ayant un programme électronucléaire apparaissant dans la figure A-5, l'acceptation du nucléaire par le public s'est améliorée en 2008 dans la plupart des cas. Les deux exceptions sont l'Espagne et l'Allemagne qui toutes deux suivent une politique d'abandon progressif du nucléaire. Dans le troisième pays ayant une telle politique qui apparaît dans la figure A-5, la Suède, l'appui à l'électronucléaire est plus vigoureux, plus stable et en légère augmentation.

67. Sur les sept pays n'ayant pas de programme électronucléaire apparaissant dans la figure A-6, cinq envisagent d'en démarrer ou d'en redémarrer un : Égypte, Indonésie, Italie, Pologne et Thaïlande. Dans ces cinq pays, l'IAP est supérieur ou quasiment équivalent à 50 %.

68. Les détails des enquêtes reflétées dans les figures A-5 et A-6 contiennent des enseignements autres que ceux révélés dans les résultats globaux des figures qui peuvent aider à concevoir des programmes d'information du public pour des situations particulières. Par exemple, les résultats pour la Hongrie montrent une remontée plutôt rapide de l'acceptation du public après une chute consécutive à un accident d'épuration du combustible en 2003. Ceci suggère l'importance pour l'acceptation du public d'une exploitation sûre et exempte d'incident de toutes les installations nucléaires

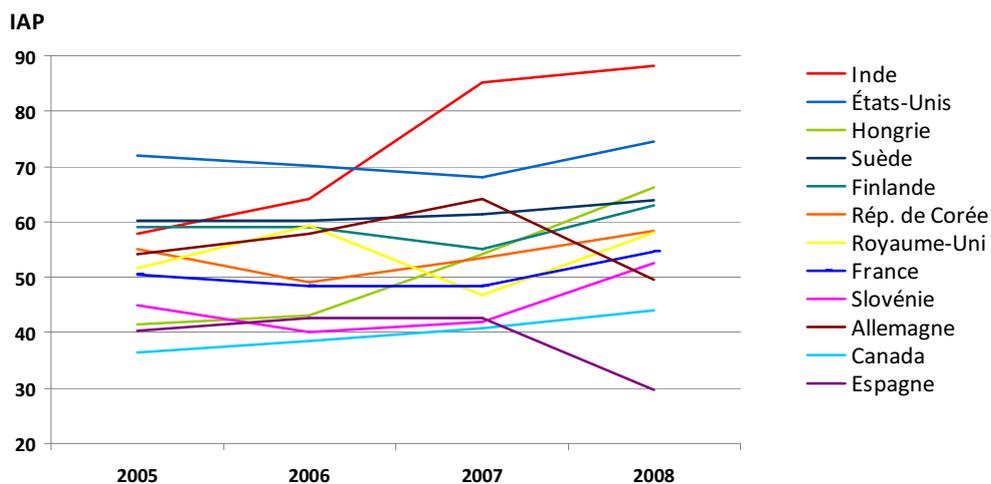


FIG. A-5. Acceptation du public dans plusieurs pays recourant à l'électronucléaire.

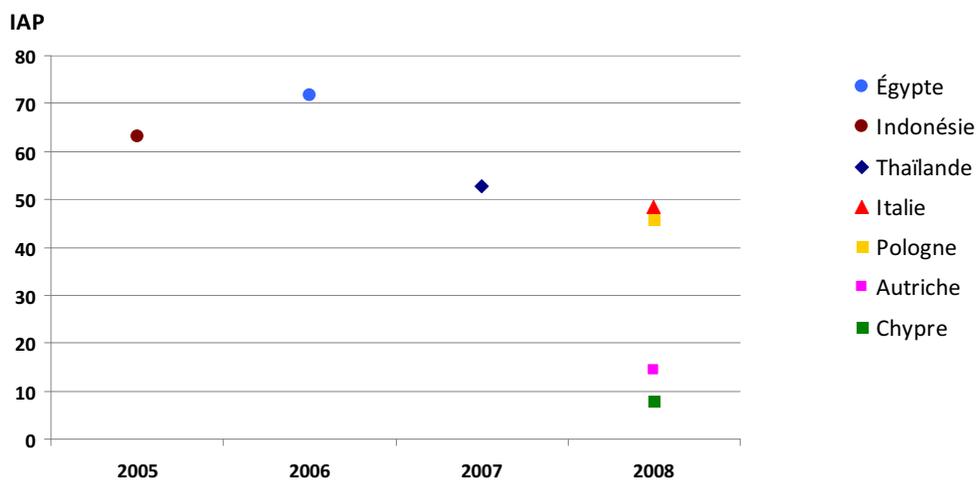


FIG. A-6. Acceptation du public dans plusieurs pays n'ayant pas de programme électronucléaire.

B. Fission et fusion avancées

B.1. Fission avancée¹⁵

B.1.1. Réacteurs refroidis par eau

69. Les six réacteurs dont la Chine a entamé la construction en 2008 sont des REP de 1 000 MWe, modèle évolutif inspiré de la technologie de la génération II légèrement modifiée. Le premier projet de REP de la génération III, basé sur la technologie des AP-1000 progresse sans encombre, et les travaux de construction ont commencé en 2009.

70. Au Japon, Mitsubishi Heavy Industries a mis au point pour le marché des États-Unis une version de 1 700 MWe du réacteur avancé à eau sous pression (RAEP), pour laquelle le processus de certification de la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a été engagé en 2008. La version européenne du RAEP a aussi été présentée en 2008 afin de pouvoir être évaluée en fonction des exigences des producteurs d'électricité européens.

71. En République de Corée, les travaux de construction du premier réacteur de puissance avancé, APR-1400, Shin-Kori 3, ont commencé en 2008.

72. En Fédération de Russie, la construction des premières tranches VVER-1200, Novovoronezh 2-1 et Leningrad 2-1, a commencé en 2008. En ce qui concerne le premier des réacteurs KLT-40S flottants (deux réacteurs de 35 MWe chacun), dont la construction a commencé en 2007, l'entrepreneur des travaux et le site ont changé, repoussant la date de leur implantation de 2010 à 2012.

73. En 2008, le processus de certification de la conception de la NRC des États-Unis a été engagé pour la version américaine du réacteur européen à eau sous pression (EPR), et une demande d'amendement de la certification de la conception du AP-1000 a été déposée. De nouveaux documents ont été soumis dans le cadre de la demande d'agrément préalable pour le REP intégral de Westinghouse de 335 MWe appelé IRIS, qui a été déposée auprès de la NRC.

74. Au Canada, l'Énergie atomique du Canada limitée (EACL) met au point un réacteur CANDU avancé (ACR) qui est caractérisé par une normalisation très poussée des composants et qui fonctionne à l'uranium légèrement enrichi pour compenser l'utilisation d'eau ordinaire comme caloporteur primaire. En 2008, la Commission canadienne de sûreté nucléaire a commencé l'examen de la conception de l'ACR-1000.

75. L'Inde a deux réacteurs à eau lourde (REL) de 540 MWe en exploitation. Elle dresse les plans d'un REL évolutif de 700 MWe et d'un réacteur avancé à eau lourde (RAEL) 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.

¹⁵ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les réacteurs à fission avancés figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2007/>).

B.1.2. Systèmes à neutrons rapides

76. En 2008, les travaux d'installation des composants du réacteur rapide expérimental chinois de type piscine de 65 MWth (20 MWe) se sont achevés. Des activités de débogage sont en cours. Deux cent cinquante tonnes de sodium de pureté nucléaire ont été expédiées à l'installation, et le remplissage des boucles primaire et secondaire a eu lieu en avril 2009.

77. La voûte d'isolement du prototype indien de surgénérateur à neutrons rapides de 500 MWe à Kalpakkam a été achevée en 2008, et la cuve de sécurité y a été installée. Les travaux de génie civil pour les bâtiments de l'installation qui font partie de l'îlot nucléaire sont en voie d'être terminés. L'écran thermique, les panneaux d'isolement thermique, les réservoirs de stockage du sodium, les réservoirs tampons d'argon, le dispositif de récupération du cœur et la structure de support du cœur sont en place, tandis que la cuve principale est en cours d'achèvement.

78. Le Japon a mené à terme les travaux de modernisation du réacteur MONJU et les essais de composants. La plupart des essais complets du système ont également été achevés. Néanmoins, le redémarrage prévu a été reporté de 2008 à 2009. Le Japon a aussi entrepris un projet national de développement de la technologie d'un cycle pour réacteurs rapides afin de commercialiser la technologie de ces réacteurs.

79. En Fédération de Russie, la construction des dalles d'assises du compartiment du réacteur à neutrons rapides BN-800 de Beloyarsk et du bâtiment des turbines est achevée. La mise en service de l'installation est prévue pour 2012.

80. La Belgique a poursuivi les travaux de conception du circuit primaire, du cœur et de l'aménagement de MYRRHA, réacteur expérimental à neutrons rapides sous-critique, afin qu'il soit compatible avec le projet de la CE consacré à un système expérimental piloté par accélérateur (XT-ADS). Pour tester le suivi de la sous-criticité, une installation expérimentale, GUINEVERE, qui couple un accélérateur aux deutérons en mode continu à une cible titane-tritium placée dans un système multiplicateur sous-critique rapide refroidi au plomb, est en train d'être construite. Cette installation devrait être opérationnelle en mars 2010.

B.1.3. Réacteurs refroidis par gaz

81. L'installation expérimentale à l'hélium, mise en service en 2007 pour le réacteur modulaire sud-africain à lit de boulets (PBMR), a permis de procéder aux premiers essais de fonctionnement à grande échelle de composants critiques du système de commande de la réactivité, du système de mise à l'arrêt de secours et du système de manutention du combustible. En 2008, l'Autorité nationale sud-africaine de réglementation nucléaire a délivré une autorisation de mise en service à chaud pour l'installation avancée de revêtement de Pelindaba, ce qui a permis de commencer la fabrication de boulets.

82. Au Japon, des essais plus rigoureux du réacteur d'essais techniques à haute température d'une durée de 90 jours au total, dont 50 à 950°C, sont prévus avant la fin de 2009. En 2007, un premier essai à pleine puissance de 30 jours à une température de sortie du caloporteur de 850°C avait été mené à bien, confirmant les améliorations apportées à la fabrication de particules combustibles enrobées.

83. Aux États-Unis, le projet de centrale nucléaire de la prochaine génération a passé un cap majeur en 2008 du fait qu'il n'y a eu aucune défaillance du combustible pendant de longues périodes d'irradiation (taux de combustion de 9 %) dans le réacteur d'essai avancé du

Laboratoire national de l'Idaho. Ceci démontre avantageusement la sûreté du combustible isotrope à triple revêtement (TRISO). La prochaine étape est un taux de combustion de 16-18 % avant septembre 2009.

84. En Chine, le plan de mise en service du réacteur de démonstration à haute température refroidi par gaz a été approuvé par le Conseil d'Etat. La licence du projet est en cours d'examen, et les travaux de construction devraient démarrer à la fin de l'année prochaine.

B.1.4. INPRO et GIF

85. Dans le cadre du Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'Agence, un manuel détaillé sur les méthodes permettant d'évaluer des systèmes d'énergie nucléaire innovants, *Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems*, a été publié au début de 2009 sous forme de document technique de l'AIEA (IAEA-TECDOC-1575). Une étude conjointe et six études nationales d'évaluation faisant appel aux méthodes de l'INPRO pour identifier les maillons faibles de la chaîne de développement, c'est-à-dire dans chaque cas les questions devant bénéficier en priorité de travaux de recherche-développement plus poussés, ont été achevées. Un rapport INPRO intitulé *Common User Considerations by Developing Countries for Future Nuclear Power Plants*, dont la rédaction a nécessité la participation de 26 pays autres que les 30 membres actuels de l'INPRO, a été publié au début de 2009. Le gouvernement russe a décidé de fournir pour la première fois un appui à l'INPRO pour 2008-2012.

86. À travers un système de contrats et d'accords, le Forum international Génération IV (GIF) coordonne les activités de recherche sur les six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems* : réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz, réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, réacteurs à sels fondus, réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, réacteurs refroidis par eau supercritique et réacteurs à très haute température (RTHT). En 2008, la Chine a signé un arrangement pour intégrer les travaux de collaboration sur les RTHT. La France, le Japon et les États-Unis sont en train d'harmoniser leurs travaux sur les prototypes de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, et notamment les objectifs de conception, les principes de sûreté, la configuration des systèmes, le niveau de puissance, le type de combustible, les réductions de coûts grâce aux innovations, les calendriers et les dates butoir pour ces prototypes et les infrastructures connexes. Des projets spécifiques sur l'intégration des systèmes, la sûreté et l'exploitation, le combustible avancé, le bilan de la centrale et la « démonstration internationale du cycle global des actinides » sont en cours.

B.2. Fusion

87. En février 2008, l'Organisation internationale ITER pour l'énergie de fusion (Organisation internationale ITER) a demandé un permis de construire pour le Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER), réacteur expérimental à fusion, à Cadarache (France).

88. En octobre 2008, 50 ans de recherche internationale sur la fusion ont été commémorés durant la 22^e conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, à Genève (Suisse). Cette conférence s'est déroulée selon les mêmes postulats que la deuxième Conférence internationale des Nations Unies sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques

en 1958, lorsque la fusion a été déclassifiée pour la première fois et rendue accessible au public. Un nombre record de plus de 500 mémoires scientifiques y a été présenté.

89. À cette même conférence, l'Agence et l'Organisation internationale ITER ont signé un accord de coopération. Celui-ci porte notamment sur l'échange d'informations, l'analyse de la contribution de la fusion aux futurs scénarios électronucléaires, la formation, les publications, l'organisation de conférences scientifiques, la recherche sur la physique des plasmas et la modélisation, ainsi que sur la sûreté et la sécurité de la fusion. Il est destiné à faciliter les interactions entre les parties à ITER et d'autres États Membres de l'Agence qui s'intéressent aux recherches sur la fusion mais ne sont pas membres d'ITER.

90. Outre les progrès enregistrés dans le cadre d'ITER, des laboratoires de recherche sur la fusion en Belgique, au Brésil, au Canada, en Chine, en Fédération de Russie, au Portugal, en République islamique d'Iran, en République tchèque, au Royaume-Uni et en Thaïlande mettent au point un réseau de recherche pour les utilisateurs de petits dispositifs à fusion. L'Agence participe et, entre autres, coordonne des recherches sur de petits tokamaks dans le cadre d'expériences conjointes qui visent à promouvoir la collaboration internationale, la planification de réseaux et la formation de jeunes scientifiques.

C. Données atomiques et nucléaires

91. En raison des attentes croissantes suscitées par l'électronucléaire, des progrès enregistrés dans le domaine de la fusion et d'une nouvelle génération de réacteurs à fission, plusieurs mémoires et débats à la Conférence internationale sur la physique des réacteurs (PHYSOR'08) ont mis en avant les initiatives en cours, y compris à l'Agence, pour répondre aux besoins en données nouvelles et actualisées sur la fission et les sections efficaces de capture pour les actinides, à la nécessité de réduire les incertitudes et aux besoins en données nécessaires pour mettre en œuvre le recyclage du combustible usé.

92. Des questions relatives aux interactions paroi-plasma dans les réacteurs à fusion entraînant la formation de particules de poussière et les questions de sûreté connexes liées à la rétention du tritium, au comportement, à la manutention et à l'inhalation des matières pyrophoriques ont été examinées en 2008 au cours d'une réunion du Sous-Comité sur les données atomiques et moléculaires pour la fusion du Conseil international de la recherche sur la fusion (CIRF). Il a été recommandé que l'Agence entreprenne des projets multinationaux de recherche coordonnée pour étudier la taille, la composition et l'origine des poussières ainsi que les données d'études spectroscopiques et sur les collisions et la pulvérisation concernant le tungstène en tant que matériau possible pour les dispositifs à fusion (voir la figure C-1 pour un exemple de l'utilisation de telles données). En outre, pour quantifier les dommages radiologiques aux composants structurels de nouveaux dispositifs à fusion et l'activation de ces composants, il faut mettre à jour et enrichir la Bibliothèque de données neutroniques sur l'énergie de fusion (FENDL) qui sert à des études de conception et à comparer les caractéristiques de matériaux pour ITER.

93. Dans le cadre de l'appui de la superinformatique à la modélisation de dispositifs à fusion qui se met en place dans le cadre de l'Accord européen pour le développement de la fusion,

un centre informatique de haute performance pour la fusion a été inauguré en mai 2009 au Centre de calcul intensif de Juliers (Allemagne).

94. L'irradiation directe de tumeurs chez les patients, à l'aide de particules chargées produites en accélérateur, permet d'administrer une dose très précise à la tumeur tout en limitant celle administrée aux tissus sains environnants. Deux nouveaux centres d'hadronthérapie seront bientôt mis en service à Heidelberg (Allemagne) et à Pavie (Italie). Comme on a besoin de données précises pour concevoir et planifier les installations de traitement des patients, on accorde la priorité au lancement d'initiatives internationales coordonnées pour quantifier et recommander des données actualisées sur les interactions avec les particules chargées aux fins des applications médicales.

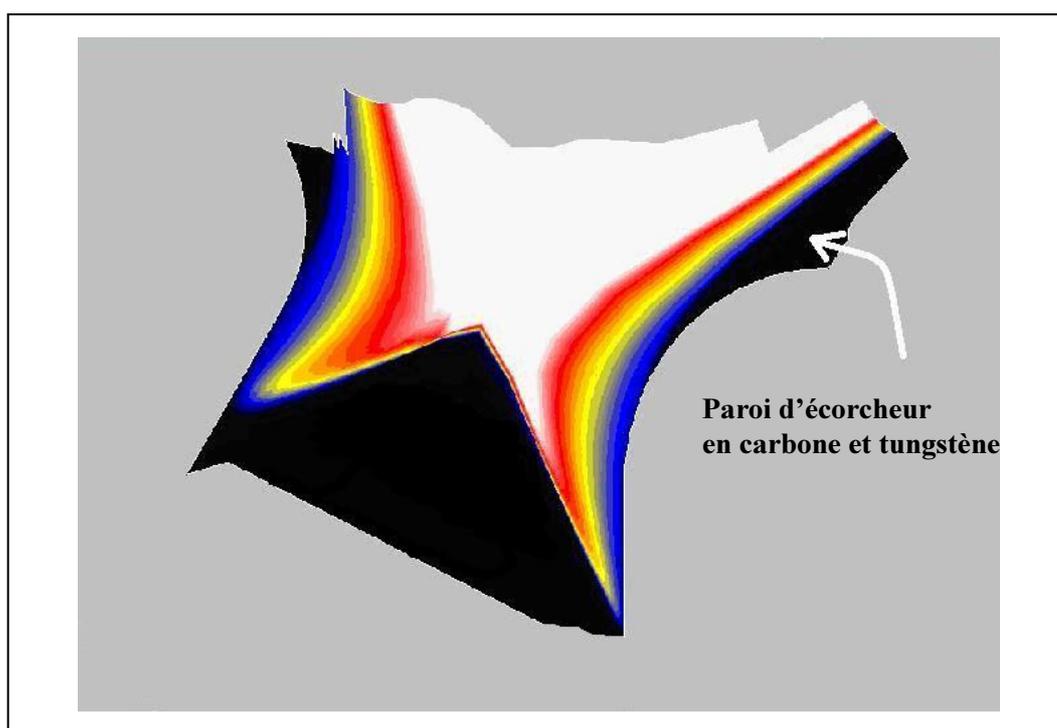


FIG. C-1. Simulation informatique du profil de températures de l'écorcheur d'un dispositif à fusion. Les températures varient entre ~ 200 000 (bleu) et 1 000 000 (rouge) Kelvin, niveau proche de celle atteinte au centre du soleil. Effectuée avec le modèle informatique B2-IRENE du Centre de recherche de Juliers, cette étude nécessite une multitude de données atomiques et moléculaires fiables, dont un grand nombre ont été calculées et assemblées à partir d'une série de récents projets de recherche coordonnée de l'Agence.

D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

D.1. Accélérateurs

95. Dans les pays en développement, un moyen décisif de mettre en place les compétences en sciences nucléaires est de créer une installation dotée d'un accélérateur, et de l'utiliser

concrètement pour la formation théorique et pratique au nucléaire et d'encourager l'expérience pratique dans toutes les applications connexes. Pour élargir encore plus les possibilités de formation dans les régions en développement, l'Agence encourage une coopération internationale pour tirer parti du savoir-faire et des installations en place, par exemple ceux d'Afrique du Sud, et en faire profiter d'éventuels partenaires régionaux, par exemple le Ghana et le Nigeria.

96. Des méthodes d'analyse mises au point dans des sources de rayonnement synchrotron permettent de mieux connaître des matières nouvelles et biologiques. De nouvelles techniques élaborées à l'aide de petites sources de radiographie classiques sont maintenant appliquées dans des synchrotrons comme ANKA en Allemagne et seront aussi utilisées à l'installation Elettra en Italie. Cette approche, qui tire parti des caractéristiques supérieures des rayons X synchrotron, permettra d'améliorer la sensibilité et la fiabilité des analyses.

97. Les progrès de la technologie et de l'instrumentation des faisceaux d'ions permettent de plus en plus d'utiliser des faisceaux de protons focalisés pour les recherches biomédicales, en particulier celles consacrées aux effets des rayonnements sur les cellules vivantes. Le premier nanofaisceau focalisé vertical de balayage au monde destiné à la recherche fondamentale est entré en service au Royaume-Uni en novembre 2008. Il permettra d'obtenir de nouvelles données sur la sensibilité aux rayonnements des tumeurs cancéreuses, sur les processus susceptibles d'induire un cancer et sur les risques d'une faible exposition aux rayonnements. Pour la première fois, des chercheurs pourront ainsi disposer de faisceaux focalisés de protons de quelques nanomètres pour cibler et irradier avec une grande précision des zones spécifiques de cellules humaines. Les interactions entre médicaments chimiothérapeutiques et rayonnements pourront être clarifiées, aidant les cliniciens à tester l'efficacité de différentes stratégies de traitement du cancer.

D.2. Réacteurs de recherche

98. Une des principales utilisations des réacteurs de recherche est la production de radio-isotopes. En 2008, l'indisponibilité des quelques grands réacteurs vieillissants utilisés à cette fin a posé problème et suscité des craintes quant à la sécurité des approvisionnements (particulièrement en molybdène 99) pour des applications médicales et industrielles cruciales. Le nouveau réacteur australien OPAL, qui a atteint sa pleine puissance pour la première fois en 2006, est le seul à pouvoir dans l'immédiat augmenter la capacité existante. Plusieurs centres nationaux dotés de réacteurs étudient avec l'Agence la possibilité d'augmenter celle-ci grâce à l'utilisation accrue de réacteurs actuellement sous-utilisés. De plus amples informations figurent dans la section I sur les radio-isotopes.

99. Le premier réacteur nucléaire de recherche marocain, un TRIGA Mark-II (2 MW), situé au Centre d'études nucléaires de la Maâmora (CENM), à environ 25 km au nord de Rabat, qui a divergé pour la première fois en mai 2007, a atteint sa pleine puissance en juin et a achevé tous les essais nécessaires en septembre de la même année. Il utilise du combustible à l'UFE et est conçu de façon à augmenter sa puissance à 3 MW. Il servira à la formation et à la production d'isotopes, fournira des services d'analyse notamment pour l'analyse par activation neutronique et les essais non destructifs, et permettra de mener des recherches fondamentales sur la physique de l'état solide et la physique des réacteurs.

100. Compte tenu de la diminution prévue du nombre de réacteurs de recherche qui passerait de 245 actuellement à 100-150 en 2020, il faudra développer la coopération internationale pour assurer un large accès à ces installations et rentabiliser leur utilisation. À cette fin,

l'Agence a commencé à créer plusieurs réseaux régionaux : l'initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale (EERRI), l'association des réacteurs de recherche de la région des Caraïbes (CRRC), le réseau d'utilisation des réacteurs de recherche de la Méditerranée (M-RRUN) et le réseau d'utilisation des réacteurs de recherche des pays Baltes (B-RRUN). Un autre réseau, STRAINET, sur l'analyse des contraintes résiduelles et des textures destinée aux partenaires industriels, se concentre sur une application particulière plutôt que sur une région. Ces réseaux contribueront également à la modernisation des installations existantes et à la création de nouvelles ainsi qu'à l'amélioration de l'accès des pays ne possédant pas de réacteurs de recherche. Le nouveau réacteur marocain sera ouvert à la communauté nationale et internationale d'utilisateurs sur la base du partage du temps, et facilitera davantage la collaboration régionale, le travail en réseau et les associations de réacteurs de recherche.

101. Le programme sur la réduction de l'enrichissement pour les réacteurs de recherche et d'essai (RERTR), sous les auspices de l'Initiative pour la réduction de la menace mondiale, vise à convertir les réacteurs de recherche pour remplacer le combustible à l'uranium hautement enrichi (UHE) par du combustible à l'UFE. À la fin de 2008, 62 réacteurs de recherche dans le monde qui utilisaient du combustible à l'UHE ont été mis à l'arrêt ou convertis au combustible à l'UFE, et 39 autres devraient être convertis à des combustibles qualifiés existants. Le programme RERTR a fêté son 30^e anniversaire lors de sa réunion annuelle organisée en octobre 2008, à Washington DC.

102. Pour convertir 28 autres réacteurs de recherche, il faut encore mettre au point et qualifier des combustibles avancés à très haute densité basés sur des alliages uranium-molybdène. Les travaux commencés à cette fin au début des années 90 se sont heurtés à des problèmes en raison du gonflement de la couche de réaction qui se forme entre le combustible et la matrice d'aluminium pendant l'irradiation. Ces problèmes sont étudiés en collaboration par un groupe de travail international sur la mise au point de combustibles comprenant l'Allemagne, l'Argentine, la Belgique, le Canada, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et la République de Corée. Si des progrès substantiels sont faits sur plusieurs fronts, d'autres avancées ainsi que des essais déterminants sont encore nécessaires pour atteindre l'objectif du programme RERTR qui est de fournir un combustible qualifié d'ici la fin de 2011.

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

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

103. Les technologies nucléaires et connexes contribuent à améliorer la productivité du bétail. Les isotopes du carbone, de l'hydrogène, du soufre, du phosphore ou de l'azote servent à étudier la conversion et l'absorption des nutriments et à évaluer le rôle des microbes du rumen dans l'assimilation des aliments. Les ruminants dépendent des micro-organismes qui vivent dans leur tube digestif pour convertir les composants des aliments en sources utilisables d'énergie et de protéines.

104. L'identification et la sélection des caractéristiques génétiques souhaitables, comme une viande moins grasse, une production accrue de lait ou la tolérance aux maladies, peuvent être

faites par le marquage direct de l'ADN. Les marqueurs isotopiques servent à déterminer la filiation ou à retracer l'origine des produits, et contribuent à aider les pays en développement à avoir accès aux marchés d'exportation.

105. Les isotopes stables, « enregistreurs écologiques » de la nature, sont utiles pour étudier les déplacements des animaux. Les profils de carbone 13 et d'azote 15 peuvent indiquer l'origine et la zone de reproduction d'oiseaux migrateurs, ce qui permet d'évaluer le risque et de prévoir la propagation d'une maladie (comme la grippe aviaire). Actuellement, les traceurs les plus efficaces sont les isotopes de l'hydrogène se trouvant dans les tissus renouvelés à chaque saison et métaboliquement inertes, comme les plumes et les griffes. Une fois établi le profil isotopique d'une population d'oiseaux donnée ou d'un écosystème particulier, tout individu fournit des informations sur la migration globale de cette espèce ou à partir de ce lieu de référence. On établit des grilles mondiales des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène dans l'eau grâce à la base de données du Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations (GNIP) de l'Agence et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), et on les compare avec les profils des plumes d'oiseaux migrateurs en différents emplacements pour déterminer où a eu lieu la pousse des plumes et retracer ainsi l'origine des oiseaux¹⁶.

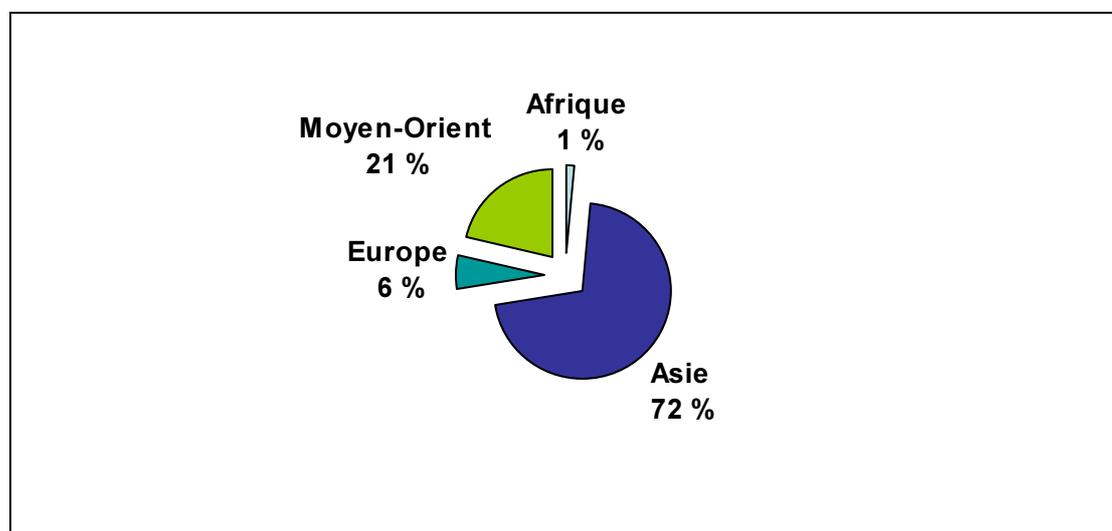


FIG. E-1. Répartition géographique des cas de grippe aviaire (sous-type H5N1) chez la volaille de 2003 à 2008 ; source : Organisation mondiale de la santé animale (OIE).

E.2. Recherche vaccinale

106. L'inactivation des pathogènes par irradiation est en train de révolutionner la recherche vaccinale. Les vaccins ainsi traités stimulent une réponse immunitaire similaire à celle provoquée par les pathogènes vivants et sont supérieurs à ce que l'on obtient avec un traitement thermique ou chimique. L'irradiation ouvre de nouvelles possibilités pour la prévention de maladies comme le nagana, la fièvre aphteuse, la fasciolose hépatique et la néosporose chez les bovins, pour lesquelles les vaccins mis au point par génie génétique n'ont guère donné de résultats. Des études récentes montrent que des doses d'irradiation

¹⁶ Pour de plus amples informations sur les travaux de l'AIEA dans ce domaine, voir le site <http://www-naweb.iaea.org/nafa/aph/index.html>.

soigneusement administrées pour altérer l'expression des gènes chez les pathogènes accroissent la protection.

107. Des preuves solides de différences génétiques collectives et individuelles dans la résistance à des maladies infectieuses sont un autre moyen de s'attaquer aux maladies animales en identifiant les marqueurs génétiques associés à cette résistance. Ces méthodes comportent l'emploi de nucléotides radiomarqués en hybridation ADN comme la caractérisation de l'ADN, et les procédures de cartographie par hybrides d'irradiation (RH). Il est essentiel de disposer d'informations génétiques sur les différentes espèces de bétail pour tirer parti des variations génétiques pour des caractéristiques économiquement importantes. Ce processus est grandement facilité par l'ordonnement des marqueurs moléculaires le long des chromosomes choisis.

108. Les cartes RH obtenues par fragmentation des chromosomes par irradiation dans des lignées de cellules hybrides peuvent être analysées pour déterminer la présence de marqueurs ADN ou par cartographie génétique comparative pour repérer les gènes susceptibles de correspondre à des caractères spécifiques. Le séquençage du génome des bovins a considérablement progressé, mais on ne peut pas en dire autant pour les ovins et les caprins. Il est urgent de procéder à la cartographie RH des loci contrôlant les caractères qualitatifs (QTL) corrélés avec la résistance à la maladie et la productivité (production de lait, et qualité de la carcasse et de la laine). En menant des recherches sur ces technologies, et en procédant à des dosages avec le phosphore 32, le soufre 35, la méthionine marquée au soufre 35 et l'iode 125 pour suivre la productivité et la reproduction, il sera possible d'améliorer la performance.

E.3. Lutte contre les insectes nuisibles

E.3.1. Irradiation par rayons X pour la stérilisation des insectes

109. Les difficultés persistantes d'obtention et de transport d'irradiateurs isotopiques ont incité à évaluer le rayonnement X comme solution de remplacement du rayonnement gamma. Les travaux d'adaptation d'un irradiateur RS2400 pour la stérilisation des insectes ont avancé avec la mise au point d'un carrousel amélioré et de nouveaux absorbeurs en résine renforcée par fibres de carbone avec filtration acier, produisant un facteur d'hétérogénéité de dose acceptable de moins de 1,3. En outre, réviser le programme de contrôle permet de sélectionner une quantité prédéterminée d'énergie administrée aux insectes.

110. Des biodosages ont permis d'évaluer l'influence relative de l'irradiation X et de l'irradiation gamma sur la qualité des insectes pour lesquels on utilise la technique de l'insecte stérile (TIS). Des pupes de mouches des fruits du même âge ont été irradiées aux mêmes doses nominales dans l'appareil à rayons X ou l'irradiateur gamma, puis évaluées dans les mêmes conditions pour comparer l'émergence des adultes et les taux de survie et de stérilité. On a aussi procédé à des essais en cages portant sur la compétition entre les mâles irradiés par rayons X ou gamma en matière d'accouplement pour évaluer les différences de traitement dans des conditions de terrain simulées. Les doses effectivement reçues par les pupes ont été déterminées par des procédures dosimétriques après le traitement¹⁷. Les données préliminaires pour *Bactrocera cucurbitae* (mouche du melon), *Ceratitidis capitata* (mouche

¹⁷ Pour obtenir des informations et un accès à la base de données sur la stérilisation des insectes, voir le site <http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/index.html>.

méditerranéenne des fruits) et *Anastrepha fraterculus* (mouche sud-américaine des fruits), ravageurs importants des fruits en Asie, en Afrique et en Amérique, sur le niveau de fertilité résiduelle et l'émergence et le comportement d'adultes normaux donnent à penser qu'il n'y a pas de différences entre les rayons gamma et X dans chacune de ces trois espèces.

E.3.2. La TIS contre les mouches tsé-tsé

111. L'assistance aux États Membres africains pour le transfert de la TIS pour la lutte contre les mouches tsé-tsé se poursuit dans les zones prioritaires. Il s'agit de l'Éthiopie (*Glossina pallidipes*), du KwaZulu-Natal en Afrique du Sud et du Mozambique (*G. austeni* et *G. brevipalpis*) et du Sénégal, où le gouvernement a un programme qui vise à éliminer *G. palpalis* de la région des Niayes, au nord-est de Dakar, où la densité du bétail est élevée.

112. Au Sénégal, la collecte de données entomologiques de référence, qui a permis d'établir des cartes précises de la répartition de la tsé-tsé à l'aide d'outils spatiaux modernes, de la modélisation mathématique et de la génétique des populations, a montré que la population de tsé-tsé des Niayes est totalement isolée des autres populations de tsé-tsé. C'est là une occasion de créer une zone durablement exempte de mouches tsé-tsé. Les enquêtes montrent que la TIS sera un élément essentiel d'une approche intégrée ; des lâchers expérimentaux avec des mouches stériles provenant du Burkina Faso sont prévus début 2009.

E.4. Qualité et sécurité sanitaire des aliments

E.4.1. La traçabilité comme approche du contrôle des contaminants alimentaires et de l'amélioration de la sécurité sanitaire des aliments

113. L'utilisation de produits agrochimiques comme les pesticides et de médicaments vétérinaires est vitale pour la production agricole, compte tenu notamment de la nécessité d'accroître la productivité pour faire face à la crise alimentaire mondiale actuelle. Cependant, les résidus de ces substances dans les aliments et d'autres contaminants naturels et environnementaux, comme les mycotoxines et les polluants organiques persistants, présentent des risques pour la santé humaine et peuvent créer des obstacles au commerce agricole. Des facteurs mondiaux comme les changements climatiques et l'évolution des pratiques de culture et d'élevage aggravent les problèmes de contamination des aliments.

114. La maîtrise de ces risques exige une approche holistique portant sur l'ensemble de la chaîne de production alimentaire, qui dépend de l'application d'orientations pour réduire les risques le plus possible et de mécanismes d'information en retour pour assurer l'efficacité des contrôles. Un élément essentiel de cette approche est la capacité de retrouver l'origine des produits alimentaires – la traçabilité – afin de faciliter la prise de mesures correctives si une contamination est découverte. Les techniques isotopiques offrent de nets avantages dans ce domaine et – lorsqu'elles sont combinées à des techniques classiques – elles fournissent à la fois de solides mécanismes de traçabilité et des méthodes de suivi des contaminants dans les aliments. Même si la sécurité sanitaire des aliments n'est pas un problème majeur, la capacité d'établir l'origine et l'authenticité d'un aliment par l'application des techniques basées sur le rapport des isotopes stables peut être importante pour les pays exportateurs car elle permet d'ajouter une valeur considérable aux produits de régions particulières. Les techniques isotopiques sont un outil sans pareil pour étudier les facteurs environnementaux à l'origine de la contamination des produits alimentaires, ce qui est d'une importance croissante compte tenu du rythme prévu des changements climatiques.

115. Les techniques de mesure comparative d'isotopes stables comme le strontium se sont avérées être d'excellents outils pour déterminer l'origine de divers produits alimentaires. Les abondances relatives des isotopes du strontium dans les plantes dépendent de la composition isotopique du strontium dans l'environnement dans lequel la plante pousse. Les rapports des isotopes du strontium mesurés dans la plante constituent une « empreinte » du lieu d'origine. Cela a été démontré à la fois pour les plantes (par exemple l'asperge) et les produits animaux, où le profil isotopique du strontium dans le lait dépend du lieu de pâture. D'autres rapports isotopiques, par exemple hydrogène/deutérium/tritium, azote 14/azote 15, carbone 13/carbone 12 et oxygène 18/oxygène 16, peuvent être utilisés de la même façon ou fournir des données complémentaires.

E.5. Amélioration des cultures

116. Les mutants induits ayant les caractères recherchés peuvent jouer un rôle important pour stimuler la production de diverses cultures vivrières¹⁸. Ces dernières années, les progrès rapides de la biologie moléculaire ont eu pour conséquence que des informations sur la constitution génétique d'organismes vivants sont devenues du domaine public. En cette « ère de la génomique », les scientifiques déchiffrent le code génétique d'un nombre toujours plus grand d'organismes, dont des plantes.

117. L'application de méthodes qui avancent la mutation naturelle pour renforcer ou supprimer un caractère générique et produire des variétés améliorées est particulièrement utile. En mutagenèse, on s'intéresse moins au traditionnel élargissement de la base génétique des cultures aux fins de la sélection et davantage à la recherche en biologie moléculaire, ce qui a eu pour résultat une augmentation considérable des travaux scientifiques sur les mutations induites.

118. Pour accroître l'efficacité de la sélection par induction de mutations, la tendance actuelle consiste à intégrer stratégiquement dans le processus les aspects pertinents des biotechnologies novatrices. Deux stratégies de ce type, l'une concernant l'identification rapide des parties mutées du génome pour des recherches en amont, l'autre l'intégration des biotechnologies pour la production et l'identification de mutants, sont examinées ci-après.

E.5.1. Identification des gènes et élucidation de fonctions à partir de mutants induits

119. La stratégie traditionnelle de l'induction de mutations pour l'amélioration des plantes, dite « génétique classique », consiste à reconstruire le rôle des gènes sur la base de l'observation des caractères modifiés des mutants. Avec les informations fournies par la biologie moléculaire, il est devenu commun de travailler vers l'arrière, en commençant par l'étude des modifications au niveau moléculaire et en établissant le rapport entre ces modifications et les caractères altérés des plantes.

120. Cette nouvelle stratégie, dite « génétique inverse », dépend de l'existence de populations de mutants bien caractérisés des principales cultures (riz, maïs, orge et blé). Des protocoles ont été élaborés qui permettent de développer les procédures pour l'interrogation simultanée de milliers de mutants afin de localiser les mutations dans les régions cibles du

¹⁸ De plus amples informations figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>), ou sur le site <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/Agenda/index.html>

génomique. La génétique inverse est devenue un outil essentiel dans la découverte des gènes et l'élucidation des fonctions.

E.5.2. Intégration des technologies pour l'amélioration de l'induction de mutations

121. L'obtention de grands nombres de mutants et l'identification la plus rapide possible des mutations recherchées comptent parmi les principaux objectifs du renforcement de l'efficacité dans l'application de routine de l'induction de mutations. Les progrès de la biologie cellulaire et tissulaire, notamment ceux qui reposent sur la capacité de chaque cellule de donner la plante entière (phénomène appelé « totipotence »), permettent la production rapide d'un grand nombre de mutants.

122. Des dizaines de milliers de mutants peuvent être élevés dans un milieu aseptisé dans des tubes à essai de laboratoire et, une fois l'ADN extrait, soit être testés en fonction de certains caractères (résistance à une toxine, tolérance au sel) dans le tube à essai, soit faire l'objet de recherches de mutations dans des parties prédéterminées du génome à l'aide d'outils neutres de biologie moléculaire. Dans les deux cas, la taille de la population évaluée sur le terrain est considérablement réduite, ce qui économise du temps et des ressources humaines et financières. La tendance actuelle de la recherche est de rassembler ces outils en des ensembles technologiques pour les principales cultures, ce qui accroît l'efficacité de la sélection par mutations induites.

E.6. Gestion durable des sols et de l'eau

E.6.1. Comprendre le rôle des micro-organismes dans la qualité et la fertilité des sols avec des conditions climatiques changeantes¹⁹

123. Les communautés microbiennes jouent un rôle majeur dans la fertilité des sols en décomposant les résidus végétaux, le fumier et la matière organique du sol. Ces microbes sont souvent affectés par les variations des précipitations et des températures dues aux changements climatiques. Les progrès récents de l'utilisation d'isotopes stables tels que le carbone 13, l'azote 15 et l'oxygène 18 comme biomarqueurs pour caractériser les communautés microbiennes et leurs interactions avec les processus concernant les nutriments et la matière organique du sol, technique dite du sondage aux isotopes stables (SIP), sont importants pour la gestion des sols, de l'eau et des nutriments.

124. Le SIP permet de comprendre les interactions entre les communautés microbiennes du sol, et leurs fonctions spécifiques en ce qui concerne la fixation du carbone, la stabilisation de la matière organique, et la fertilité et la résilience du sol, ainsi que la capacité de production du sol pour l'intensification durable des cultures et de l'élevage.

125. Le SIP consiste à introduire un substrat marqué par un isotope stable dans une communauté microbienne du sol pour étudier le devenir du substrat. Ceci permet une observation directe de l'assimilation du substrat dans des communautés de micro-organismes avec une perturbation minimale. Les micro-organismes qui participent activement à des processus métaboliques spécifiques peuvent être identifiés dans des conditions qui se rapprochent de celles du terrain.

¹⁹ Voir le site <http://www.naweb.iaea.org/nafa/swmn/index.html> consacré aux travaux sur la gestion des sols et de l'eau.

E.6.2. Utilisation d'isotopes stables comme traceurs pour la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre à partir des terres agricoles

126. Les pertes d'azote à partir des engrais chimiques, des eaux usées d'irrigation et du fumier peuvent entraîner une pollution de l'eau. On peut les réduire en améliorant la gestion des exploitations, notamment l'utilisation des engrais azotés, et en se servant des rives ou des baissières permanentes dans les ravines au pied des pentes cultivées pour éliminer les nitrates des écoulements superficiels et souterrains. Les nitrates qui se déplacent à travers les rives et les baissières sont soumis à un processus microbien qui les transforme en oxyde nitreux (N_2O) et en diazote (N_2). L'oxyde nitreux est un gaz à effet de serre de longue durée et susceptible d'appauvrir la couche d'ozone. Récemment, on a utilisé avec succès des nitrates enrichis en azote 15 pour quantifier non seulement l'élimination des nitrates, mais aussi les taux de production de N_2O et de N_2 dans les baissières permanentes des bassins agricoles. Avec l'azote 15, on a constaté que les baissières sont une source de N_2O lorsque les concentrations en NO_3 sont illimitées, mais peuvent faire efficacement office de puits à N_2O lorsque la teneur en NO_3 est faible. Ces résultats laissent entrevoir une solution équilibrée pour l'utilisation des baissières permanentes, entre les objectifs de qualité de l'eau (élimination de NO_3) et la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (réduction au plus bas des émissions de N_2O) par le recours à des dérivations pour diriger les eaux chargées en nitrates vers les baissières permanentes en cas de crue. Ceci rallonge le temps de rétention et renforce l'effet de limitation des nitrates sans donner lieu à des émissions de N_2O . Sans l'azote 15, les planificateurs agricoles et les gestionnaires de ressources ne pourraient pas différencier les émissions de N_2O et de N_2 de l'élimination de NO_3 .

F. Santé humaine

F.1. Rapports entre l'imagerie nucléaire et l'industrie pharmaceutique

127. L'imagerie est de plus en plus utilisée comme biomarqueur pour évaluer les nouveaux médicaments. Les essais cliniques de nouveaux médicaments étant de plus en plus souvent réalisés dans des pays en développement, il est essentiel d'élaborer des approches innovantes pour la mise au point des nouveaux produits pharmaceutiques.

128. L'imagerie joue un rôle fondamental dans la découverte des médicaments et la mise au point rapide d'applications cliniques. À cet égard, le fluorodésoxyglucose (FDG), de même que la tomographie à émission de positons (PET) combinée à la tomodensitométrie (TDM), sont efficaces non seulement pour le diagnostic et la stadification des maladies, mais aussi pour le suivi et la quantification des effets du traitement. Dans la mise au point de médicaments, cela pourrait servir à identifier et stratifier les patients susceptibles de participer à un essai clinique, puis à quantifier les résultats du traitement. La convergence de la stratification et du diagnostic ou la quantification des effets du traitement en recherche comme lors du traitement clinique sont un fait nouveau important qui a des avantages potentiels considérables pour l'industrie pharmaceutique et en dernier ressort pour les patients²⁰.

F.2. Application des techniques nucléaires en nutrition

129. La prévalence croissante de maladies non transmissibles entraîne des problèmes de santé majeurs. Les pays industrialisés et les pays en transition sont confrontés à une constellation toujours plus grande de maladies dont le diabète de type 2 et les maladies cardiovasculaires. Par contre, les pays en développement doivent faire face à la simultanéité de la sous-alimentation et de la suralimentation. On peut avancer que c'est le problème de santé le plus important au niveau mondial, qui est aggravé par la crise du SIDA dans de nombreux pays.

130. Les groupes de la population les plus exposés sont les femmes enceintes et allaitantes et les nourrissons. Les avancées techniques récentes concernent un aspect inexploré de la nutrition et de la santé infantiles, à savoir l'évaluation de la composition corporelle pour mieux comprendre la qualité de la croissance pendant la petite enfance et ses rapports avec l'apparition ultérieure de maladies chroniques. Les techniques nucléaires offrent les outils dont on a besoin pour évaluer la composition corporelle, en particulier pour évaluer l'eau corporelle totale grâce aux techniques faisant appel aux isotopes stables et la masse osseuse par absorptiométrie à rayons X en double énergie. Ces techniques sont les plus performantes en matière d'évaluation de la composition corporelle et servent donc à valider d'autres techniques comme l'analyse de l'impédance bioélectrique.

²⁰ Pour consulter la foire aux questions sur la PET et les technologies associées, voir le site <http://www-naweb.iaea.org/nahu/nm/faqanswers.asp#pet>.

131. Au début de la vie, la structure et le fonctionnement de l'organisme déterminent les effets sanitaires à court et long termes. Les époques pendant lesquelles la biologie de la croissance physique et l'état de santé peuvent être influencés par la nutrition (positivement ou négativement) comprennent les périodes cruciales de croissance rapide et le développement du fœtus, ainsi que les deux premières années de vie du nourrisson. Les interventions nutritionnelles à ces moments-là sont la meilleure façon de prévenir des conséquences à long terme d'une sous-alimentation précoce, y compris celles qui résultent d'un retard de croissance intra-utérin et l'arrêt de croissance prématuré. Il est urgent d'élaborer des stratégies efficaces d'intervention pendant ces périodes cruciales pour empêcher l'apparition ultérieure de maladies chroniques²¹.

F.3. Progrès de l'imagerie quantitative et dosimétrie interne pour la médecine nucléaire

132. Le « remède miracle » longtemps recherché, une substance vraiment ciblée tuant les cellules cancéreuses sans endommager les tissus sains, devient progressivement, bien que lentement, une réalité en médecine nucléaire thérapeutique. Le principe en a été démontré il y a plus de 50 ans en utilisant l'iode 131, isotope radioactif, pour traiter diverses maladies thyroïdiennes. Actuellement, des substances plus complexes ont été mises au point par génie biologique contre une plus vaste gamme de maladies. L'utilisation clinique de quelques-unes d'entre elles est autorisée, mais un beaucoup plus grand nombre font l'objet d'essais cliniques, certains avec une participation directe de l'Agence. Un moyen essentiel pour évaluer l'efficacité de ces nouveaux composés radiomarqués est de mesurer la distribution et la quantité de la dose de rayonnements reçue par le site malade, mais aussi par le tissu sain critique.

133. En médecine nucléaire, les images servent habituellement soit pour des tâches de détection, comme le repérage des défauts de perfusion, soit pour des tâches quantitatives, comme le calcul de la fraction d'éjection du ventricule gauche, des valeurs d'incorporation standardisées ou de la dose reçue par les organes²². Au cours des 15 dernières années, l'élaboration de méthodes permettant de quantifier précisément l'imagerie nucléaire a beaucoup progressé. Toutefois, la diffusion de ces méthodes dans les hôpitaux a été lente et il n'existe pas encore de méthode standardisée pour quantifier les données de tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT) ou de PET.

134. Obtenir des images qui conviennent pour des tâches quantitatives exige souvent un traitement additionnel s'ajoutant à ceux qui sont nécessaires pour l'interprétation visuelle. Ce traitement additionnel améliore souvent la résolution et le contraste et réduit les artéfacts (figure F-1). Ces améliorations de l'image peuvent souvent, mais pas toujours, se traduire directement par l'amélioration des tâches de détection. Un autre avantage de ces images est qu'elles peuvent permettre d'améliorer la cohérence des mesures sur le terrain, en réduisant la variabilité entre les centres d'imagerie, les équipements, les protocoles et les patients.

²¹ Pour aider les Etats Membres à déterminer les niveaux nutritionnels, l'AIEA, l'USAID, HarvestPlus et l'ILSI ont créé une équipe spéciale sur les traceurs de vitamine A en la chargeant d'élaborer des documents sur l'utilisation appropriée d'une méthodologie faisant appel à de tels traceurs (isotopes stables) ainsi qu'un manuel sur les méthodes de dilution de ces traceurs pour évaluer l'état nutritionnel et les programmes d'intervention.

²² D'autres informations sont disponibles sur le site <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/Agenda/index.html>.

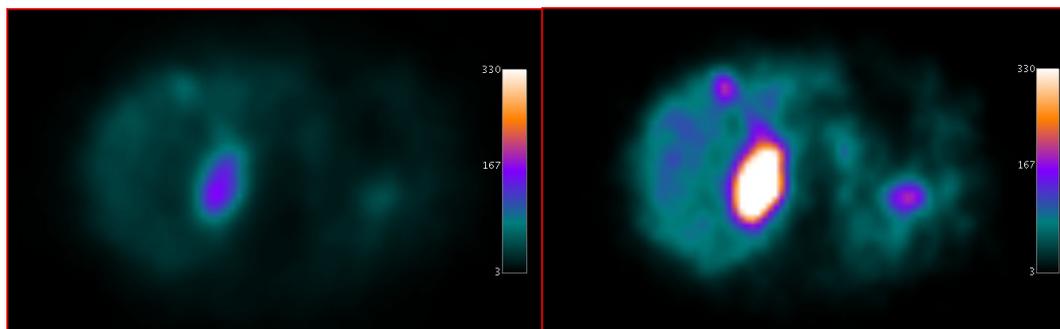


FIG. F-1. Méta-iodo-benzyl-guanidine marquée à l'iode 123 (^{123}I -mIBG) : section transaxiale de l'abdomen supérieur d'un patient atteint de phéochromocytome récurrent. L'image de gauche est l'image SPECT originale. L'image de droite est la même corrigée en fonction de données sur la densité des tissus obtenues par TDM. Ce type de correction d'images SPECT permet d'obtenir de meilleures informations diagnostiques et de quantifier plus précisément l'incorporation du radiopharmaceutique. (École de médecine de l'Université de Pise, Italie)

F.4. Amélioration des applications en radio-oncologie

135. La combinaison de modalités thérapeutiques (chirurgie, radiothérapie, chimiothérapie, traitement médicamenteux ciblé) améliore la survie avec la plupart des cancers. Les progrès de la radiothérapie par faisceau externe ont accru les exigences de précision s'agissant des doses reçues par les patients. La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RTC-3D) est considérée comme la norme dans la plupart des indications de la radiothérapie curative, et dans beaucoup de centres un nombre important de patients sont traités par radiothérapie à intensité modulée (IMRT).

136. L'arthérapie volumétrique modulée, combinée aux innovations en tomographie et thérapie, la radiothérapie stéréotaxique et la radiothérapie assistée par l'image (IGRT) en quatre dimensions (qui élargit le volume cible pour englober l'ensemble des mouvements de la tumeur) sont introduites dans la pratique clinique. Elles permettent d'assurer une conformité maximale et d'épargner au mieux les structures critiques lorsque la dose aux tissus normaux adjacents est réduite au minimum. Le perfectionnement des logiciels d'enregistrement et de vérification des systèmes de qualité a permis d'améliorer les processus en radiothérapie clinique.

137. De plus en plus, des centres de protonthérapie sont créés pour développer les applications de haute précision épargnant les tissus sains. Dans la plupart des cas, il faut davantage d'éléments pour prouver la supériorité de ces approches par rapport à la radiothérapie classique.

138. En outre, la technologie de l'information a fait évoluer les méthodes de travail en radio-oncologie. Dans le monde, l'introduction de registres nationaux des cas et de dossiers électroniques des patients au niveau des hôpitaux progresse rapidement²³.

²³ Lors d'une Conférence internationale sur les progrès en radio-oncologie parrainée par l'AIEA en avril 2009, cette dernière a encouragé les principaux fabricants de matériel de radio-oncologie à produire des appareils portables plus solides et moins coûteux à l'intention des lieux de soins pauvres et ruraux.

G. Environnement

G.1. « Particules chaudes » dans l'environnement

139. Lorsque l'on évalue les doses de rayonnements et l'impact des rayonnements sur l'environnement, les particules radioactives libérées occupent une place importante. Les « particules chaudes » sont de petits objets radioactifs contenant un nombre important de radionucléides qui sont parfois de très haute activité. Provenant de plusieurs sources possibles (essais d'armes nucléaires, rejets du cycle du combustible nucléaire, accidents mettant en jeu des matières nucléaires), les particules chaudes sont d'une activité considérablement plus élevée que les matières brutes ou d'autres particules provenant des mêmes sources.

140. Les propriétés et le comportement environnemental des radionucléides liés aux particules sont régis par leur composition et la structure de la matrice, les deux facteurs étant liés au terme source et dépendant du scénario de rejet (figures G-1 et G-2). La mobilité, le comportement environnemental, la biodisponibilité et les effets écologiques et sanitaires des radionucléides sont essentiellement déterminés par les propriétés des particules comme la microstructure, la composition chimique et la spéciation. Bien que l'on dispose actuellement de peu d'informations sur l'impact des particules chaudes sur l'environnement, la question gagnera en importance à mesure que de nouvelles techniques permettront de les caractériser.

141. Du fait de leur petite taille, souvent de l'ordre de quelques micromètres ou moins, les particules chaudes en suspension dans l'air sont difficiles à isoler. Une nouvelle méthode simple a été mise au point pour la manipulation manuelle et l'isolement de particules individuelles de l'ordre de 1 μm et plus à l'aide d'un microscope optique et pour des particules encore plus petites directement avec un microscope électronique à balayage (figure G-1). Une fois isolée, la particule peut être observée grâce à diverses techniques applicables à l'échelle microscopique, comme la microscopie électronique à balayage, la détection de particules alpha, le couplage de l'ablation laser et de la spectrométrie de masse à source plasma (ICP-MS) et d'autres techniques de spectrométrie de masse, ainsi que la microtomographie X.

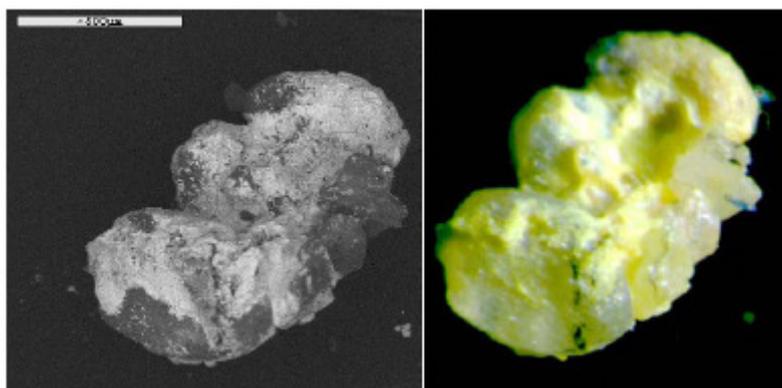


FIG. G-1. Micrographies, par microscopie électronique à balayage (à gauche) et microscopie optique (à droite), d'un grain de sable illustrant la forme de la particule recouverte d'uranium appauvri provenant de l'incendie d'un entrepôt de munitions à Al-Doha (Koweït). Échelle : 500 μm (Lind).

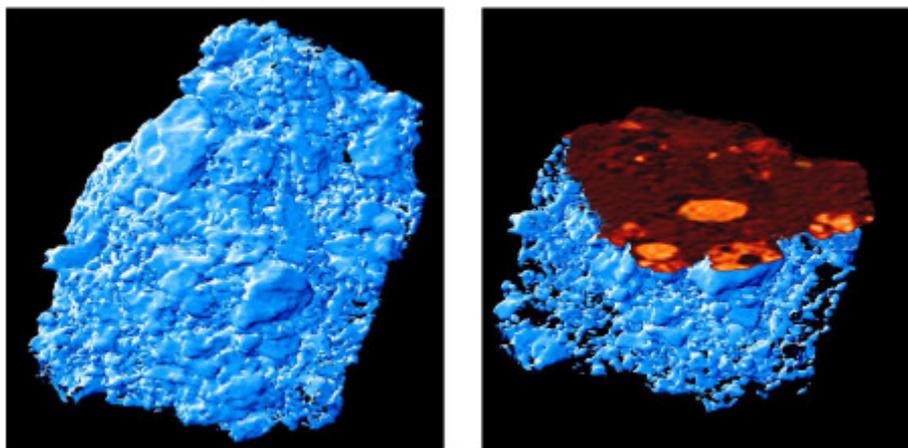


FIG. G-2. Tomographie microscopique d'absorption X d'une particule de combustible oxydée libérée durant l'incendie qui a suivi l'explosion du réacteur de Tchernobyl. Rendu tridimensionnel des coupes tomographiques montrant la surface de la particule (à gauche) et coupe informatisée (virtuelle) de l'image tridimensionnelle, faisant apparaître la structure interne hétérogène (à droite). Largeur de la particule : environ 300 μm (Salbu et al., 2000).

G.2. Accès en ligne aux données sur la radioactivité marine mondiale

142. Avec plus de 110 000 entrées, le principal objectif du Système d'information sur l'environnement marin (MARIS) (<http://maris.iaea.org>) est de faciliter l'accès aux données sur la radioactivité marine. En outre, le MARIS est une source internationale de référence sur les niveaux de radionucléides dans l'environnement marin et leur évolution, permettant d'évaluer les contributions de rejets éventuels. Il fournit aux responsables des régions côtières des données améliorées pour la prise de décisions.

143. Le MARIS contient des données sur la radioactivité passée et actuelle pour les radionucléides naturels et artificiels les plus importants dans les océans et les mers du monde, les fosses sous-marines, les zones côtières et l'eau de mer, ainsi que dans les particules, les sédiments et le biote marin. Ces données proviennent de documents et rapports scientifiques publiés et des bases de données constituées par les organismes ou les programmes scientifiques d'États Membres.

144. Les données du MARIS sont utilisées pour des études de référence pour l'évaluation de l'intensité, de la quantité et de l'évolution des radionucléides dans l'environnement marin, pour l'évaluation de l'impact environnemental et pour l'évaluation des doses dues aux voies d'exposition marines. Associées aux données océanographiques, les données du MARIS servent à mieux caractériser les courants océaniques, les processus intervenant dans la colonne d'eau et la dynamique des sédiments, et à étudier le devenir des contaminants dans l'environnement marin en utilisant les radionucléides comme analogues. Elles servent aussi à valider les modèles de la circulation et de la dispersion aux échelles régionale et mondiale qui sont utiles, par exemple, pour la prévision des changements climatiques et de l'acidification des océans.

G.3. Marquage aux isotopes stables pour l'étude des réseaux alimentaires marins

145. Les teneurs en isotopes stables du carbone sont largement utilisées pour étudier les sources du carbone organique dans les écosystèmes et leur utilisation dans le réseau alimentaire. Comprendre le transfert du carbone et des nutriments entre l'environnement et les

organismes marins est essentiel pour accroître les connaissances sur les cycles biogéochimiques et le fonctionnement des écosystèmes. On obtient des informations précieuses en ajoutant un traceur tel un composé marqué au carbone 13 dans des conditions contrôlées et en le suivant à travers les divers compartiments. Cela peut révéler des voies qui sont essentielles pour déterminer le rôle d'organismes importants de l'écosystème. La figure G-3 schématise la répartition du delta carbone 13 ($\delta^{13}\text{C}$) dans l'environnement. Par l'analyse des biomarqueurs lipidiques caractéristiques de certains groupes d'organismes et des signatures isotopiques présentes dans ces substances, on peut désormais élucider des interactions spécifiques d'espèces en utilisant des isotopes stables au niveau moléculaire. Associées à la modélisation mathématique, ces données peuvent aussi servir à estimer la génération et le renouvellement des produits photosynthétiques de différents organismes marins. L'Agence aide les États Membres à suivre le transfert de composés marqués ou non au carbone 13 à travers les chaînes alimentaires marines, comme les coraux, le plancton et les bactéries sur la base de l'analyse des rapports isotopiques de composés spécifiques par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse isotopique (CPG-SMI). L'application de cette nouvelle technologie nucléaire contribuerait à mieux comprendre les interactions du réseau alimentaire et le cycle du carbone dans l'environnement marin.

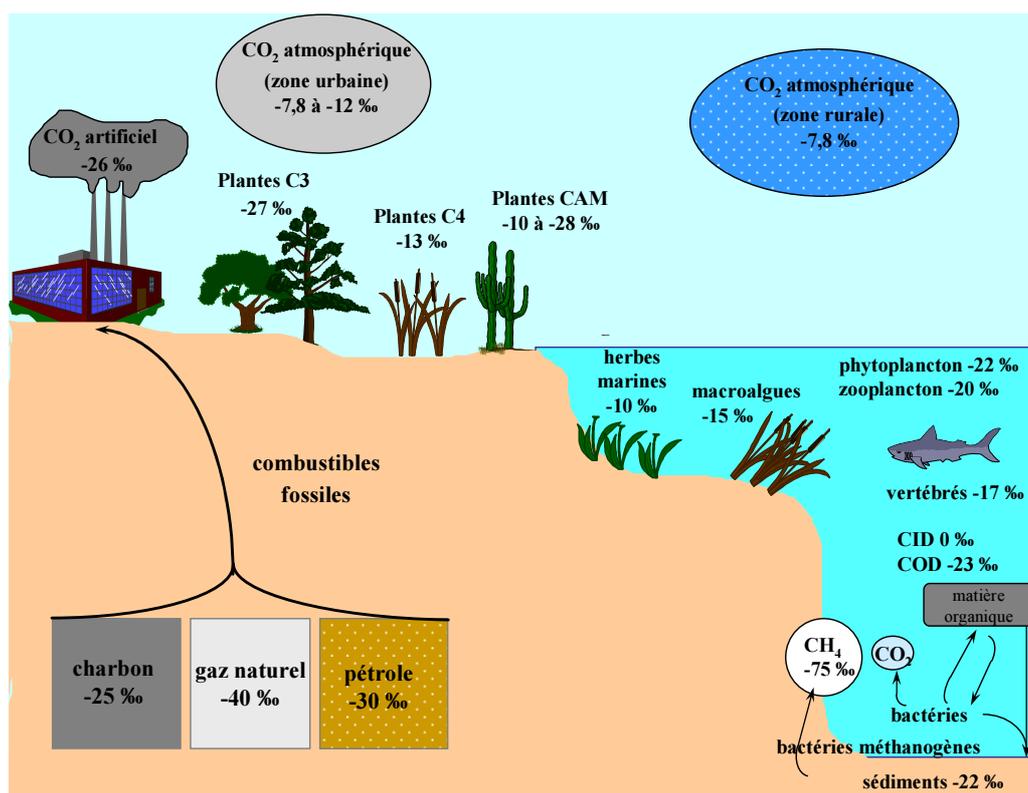


FIG. G-3. Schéma de la distribution de $\delta^{13}\text{C}$ dans l'environnement (modifié d'après Tolosa, *Oceanis*, vol. 30, n° 2, 2004, pp 239 à 259) (CAM = métabolisme acide des Crassulacées ; CID = carbone inorganique dissous ; COD = carbone organique dissous).

G.4. Utilisation des radiotraceurs pour mesurer l'impact de l'acidification des eaux sur la biodiversité marine dans l'Arctique et la Méditerranée

146. Les études de modélisation ont clairement montré que les régions polaires sont particulièrement sensibles aux effets combinés des changements climatiques, à savoir l'élévation de la température et l'acidification des eaux. Pour mieux prévoir leur impact sur la biodiversité marine, l'Agence a mis au point des installations expérimentales portatives pour étudier l'acidification des eaux marines. Elles sont utilisées avec le calcium 45 pour mesurer les taux de calcification des ptéropodes et des coques de l'Arctique dont se nourrissent les baleines, les morses et les oiseaux de mer. Dans des conditions expérimentales avec l'acidité prévue pour les eaux de l'Arctique à l'avenir, l'Agence a aidé des États Membres à déterminer des réductions importantes des taux de calcification des ptéropodes d'une ampleur similaire à celle que l'on mesure déjà chez les coraux bâtisseurs de récifs.

147. L'Agence aide des États Membres à mener des études à l'aide de radiotraceurs sur les poissons commerciaux, la seiche et le poulpe en Méditerranée pour déterminer l'impact de l'acidification des eaux sur leurs stades précoces. Cela contribuera par ailleurs à comprendre et à prévoir la mesure dans laquelle l'acidification des eaux modifiera les ressources marines, et l'impact socio-économique de ces modifications.

H. Ressources en eau

148. Outre la croissance démographique et économique, la variabilité et les changements climatiques exercent des pressions considérables sur les ressources en eaux douces. Près d'un tiers de la population terrestre dépend de cours d'eau alimentés par les glaciers et la fonte des neiges. L'augmentation de la variabilité et de la vulnérabilité des débits des cours d'eau dans un climat plus chaud (du fait de l'accroissement des débits de fonte et des modifications des précipitations) nécessitera des changements de l'utilisation et des pratiques de gestion des eaux. Le développement appelant un accroissement de la production d'énergie à partir de sources renouvelables ou non, l'utilisation de l'eau à cette fin sera une considération importante dans la planification des ressources en eau. Il est probable que pour répondre à l'augmentation de la demande en eau douce, on recourra davantage à des ressources en eaux souterraines déjà très sollicitées.

149. Pourtant, la connaissance de la répartition et du renouvellement des aquifères souffre d'importantes lacunes. Le Programme mondial d'évaluation et de cartographie hydrogéologiques (WHYMAP) (<http://www.whymap.org/>) est un effort notable pour améliorer les connaissances sur les eaux souterraines. Collaboration entre le programme de l'Agence sur les ressources en eau, le Programme hydrologique international (PHI) de l'UNESCO, l'Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles (BGR) allemand, l'Association internationale des hydrogéologues et d'autres partenaires, ce programme, lancé en 1999, a pour objectif de recueillir, rassembler et visualiser des informations hydrogéologiques à l'échelle mondiale. La carte des eaux souterraines (figure H-1) présentée en 2008 au 33^e Congrès international de géologie, à Oslo, décrit les trois principaux types d'eaux souterraines : grands bassins avec des aquifères régionaux (tons de bleu) ; zones de structure hydrogéologique complexe (tons de vert) ; et zones d'aquifères locaux et peu

profonds (tons de brun). Les tons de chaque couleur correspondent aux taux de renouvellement (recharge) des eaux souterraines. Une carte régionale des eaux souterraines en Asie du Sud est reproduite à la figure H-2.

150. Les méthodes isotopiques permettent d'identifier facilement les aquifères qui contiennent des eaux anciennes (et peu ou pas renouvelées) et ceux qui contiennent des eaux modernes (avec une recharge importante)²⁴. L'utilisation d'eaux anciennes pour l'irrigation ou les usages domestiques ou industriels est considérée comme une « exploitation minière » car l'eau souterraine prélevée ne sera pas remplacée naturellement dans les conditions climatiques actuelles. Les aquifères en question doivent être gérés avec beaucoup plus de soin que ceux qui sont actuellement rechargés. Cette « exploitation minière » des aquifères se rencontre dans de nombreux pays.

151. L'existence de bonnes évaluations des ressources en eau, y compris les eaux souterraines, contribuera à augmenter considérablement la disponibilité de l'eau. Les évaluations nationales renforceront la capacité des pays de mieux utiliser les ressources régionales communes dans le cadre de programmes d'action stratégiques améliorés. L'Agence envisage de lancer un partenariat pour tirer parti de ses compétences techniques et compléter les mandats et l'action d'autres organismes, comme la Banque mondiale, le PNUD et l'OMM, afin d'élaborer une approche scientifique modèle pour l'évaluation des ressources en eau qui puisse être répliquée dans de nombreux États Membres. Ce partenariat, appelé I-WAVE (pour IAEA-Water Availability Enhancement ou AIEA – accroissement de la disponibilité d'eau) visera à établir une approche globale de l'évaluation des ressources en eau, de surface et souterraines, et à élaborer de meilleures stratégies pour l'adaptation aux changements climatiques.

²⁴ De plus amples informations figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>

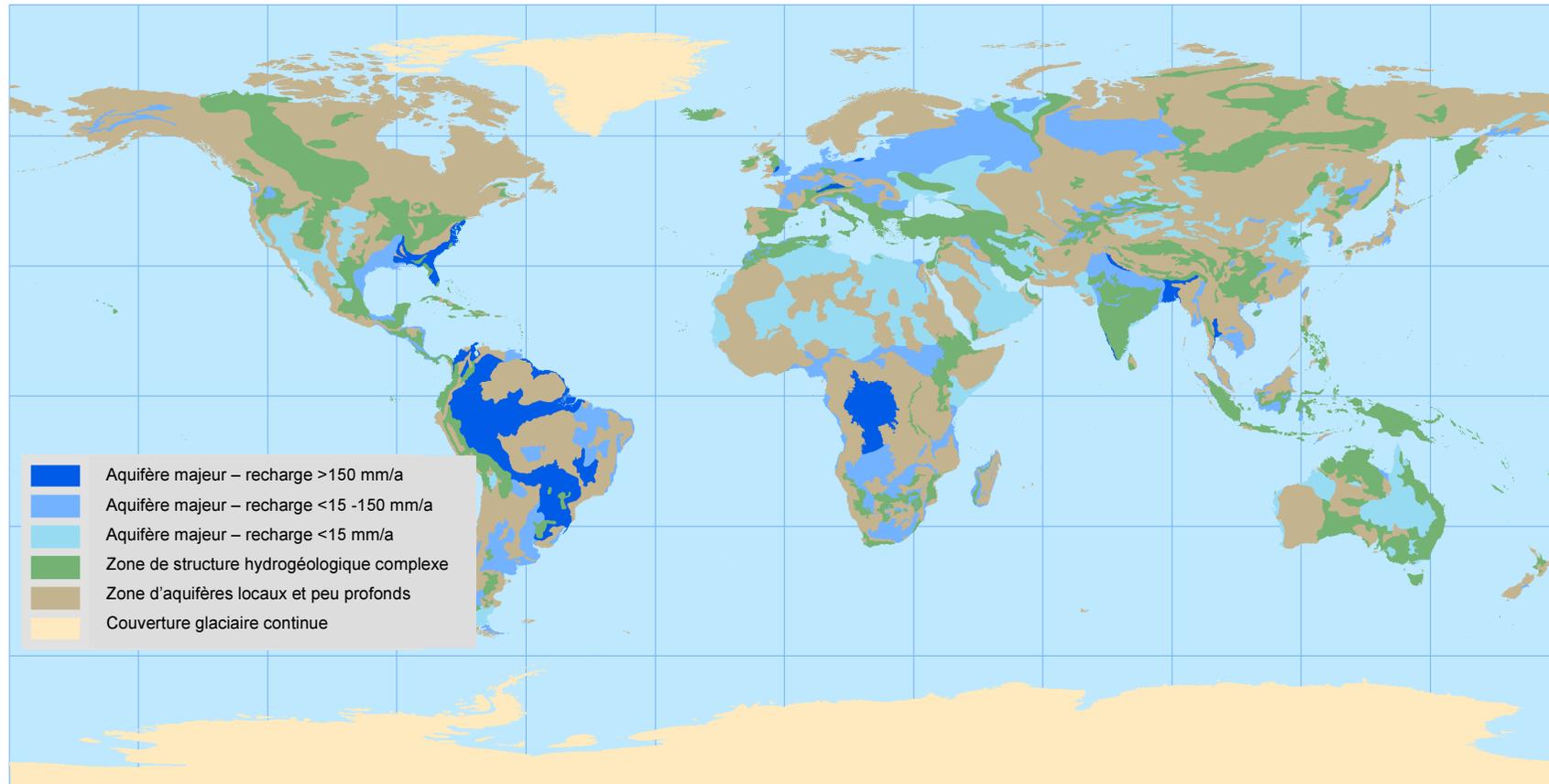


FIG. H-1. Ressources mondiales en eaux souterraines, WHYMAP (1:50 000 000^e). Les zones en bleu représentent les systèmes aquifères des grands bassins ; les zones en vert les systèmes aquifères de structure hydrogéologique complexe ; les zones en brun les systèmes aquifères locaux et peu profonds. Les tons des trois couleurs correspondent aux taux de renouvellement (recharge) des eaux souterraines.

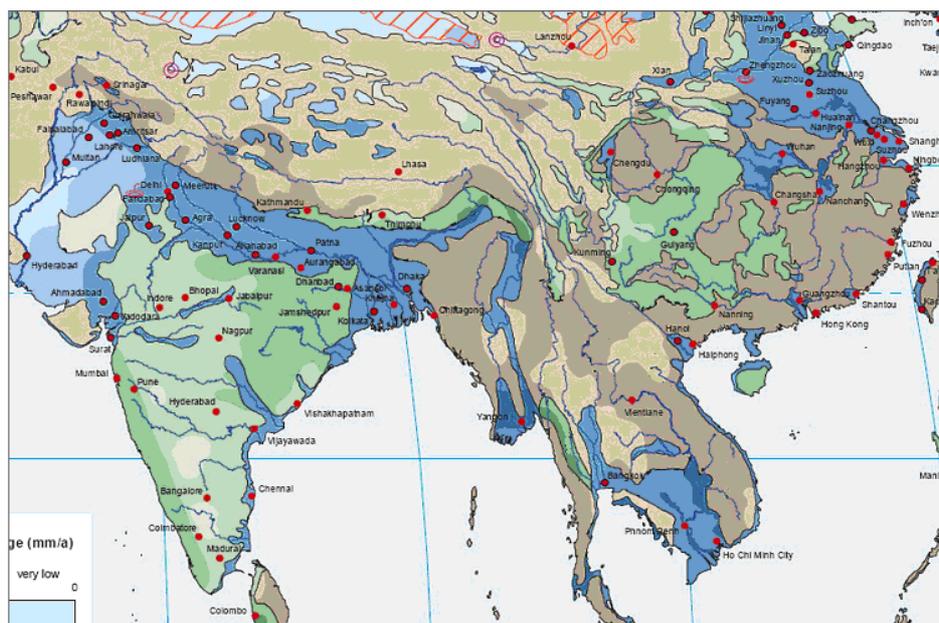


FIG. H-2. Détail de la carte au 1:25 000 000^e des ressources hydrogéologiques de l'Asie du Sud. Les zones en bleu représentent les systèmes aquifères des grands bassins ; les zones en vert les systèmes aquifères de structure hydrogéologique complexe ; les zones en brun les systèmes aquifères locaux et peu profonds. Les tons des trois couleurs correspondent aux taux de renouvellement (recharge) des eaux souterraines.

I. Production et disponibilité de radio-isotopes

152. La demande mondiale de radio-isotopes et de sources de rayonnements augmente du fait de leur utilisation en médecine et dans l'industrie. La 6^e Conférence internationale sur les isotopes, tenue en mai 2008 à Séoul (République de Corée), a souligné la forte demande de nouveaux développements et de coopération internationale. Un conseil mondial des isotopes est en train d'être mis en place en tant qu'instance facilitant à toutes les parties prenantes la production et l'application durables et sûres des isotopes.

153. La capacité de production de radio-isotopes en cyclotron a augmenté. Le nombre de centres régionaux de production de radiotraceurs cliniques pour l'imagerie PET augmente lui aussi. Pour faire face à la demande croissante de fluorodésoxyglucose (FDG), des cyclotrons compacts (~7,5 MeV) avec modules avancés de synthèse de radiotraceurs basés sur la microfluidique sont en cours de mise au point et devraient être adoptés par les principaux hôpitaux dans le monde. En outre, comme certains traceurs PET ont une spécificité plus élevée pour l'imagerie du cancer, on les préfère de plus en plus au FDG qui s'accumule aussi dans les sièges d'infection.

154. L'augmentation du nombre des centres de PET et PET-TDM a accru l'utilité des traceurs PET à base de générateurs pour une qualité supérieure d'imagerie. Par exemple, le

gallium 68, préparé à partir du germanium 68, est utilisé en imagerie diagnostique du cancer, et le rubidium 82, préparé à partir du strontium 82, en imagerie de perfusion myocardique.

155. La thérapie aux radionucléides connaît une croissance due aux progrès du ciblage basé sur les principes de la médecine nucléaire moléculaire. En conséquence, la demande de radionucléides thérapeutiques devrait augmenter considérablement. Une méthodologie à base de générateur électrochimique mise au point pour la préparation d'yttrium 90 de grande pureté (dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée de l'Agence) devrait accroître la disponibilité d'yttrium 90 préparé grâce à un procédé se prêtant à une manipulation sûre à distance en module. Le lutécium 177 devrait devenir aussi important que l'iode 131 et plusieurs pays ont déjà commencé ou envisagent une production de moyenne à grande échelle de ce radio-isotope.

I.1. Sécurité des approvisionnements en molybdène 99

156. L'an dernier, des interruptions des approvisionnements en molybdène 99, source du technétium 99m largement utilisé pour l'imagerie diagnostique, ont entraîné des retards dans les services fournis aux patients dans des centres de médecine nucléaire dans le monde entier. Les besoins en molybdène 99 (environ 450 000 GBq par semaine) sont normalement couverts par cinq réacteurs d'irradiation en Afrique du Sud, en Belgique, au Canada, en France et aux Pays-Bas, et par quatre installations industrielles de traitement. Plus de 95 % de tout le molybdène 99 est produit avec des cibles à l'uranium hautement enrichi (UHE). En janvier 2009, l'Académie nationale des sciences des États-Unis, sur mandat du Congrès, a publié le rapport d'une étude de faisabilité sur l'utilisation de cibles à l'uranium faiblement enrichi (UFE)²⁵.

157. Les quelques réacteurs qui produisent du molybdène 99 sont tous anciens et doivent être mis à l'arrêt pour maintenance, ce qui a créé des problèmes sur plusieurs sites de production. En août 2008, le redémarrage d'un réacteur (à Petten, aux Pays-Bas) après un arrêt pour maintenance a été reporté à cause d'un problème technique. Cela s'est produit en même temps que l'arrêt pour maintenance programmé de deux autres réacteurs en Europe, et qu'un incident radiologique dans une installation de retraitement, ce qui a entraîné une pénurie importante de molybdène 99 en Europe et dans d'autres régions. Les préoccupations quant à la sécurité des approvisionnements en molybdène 99 et autres radio-isotopes produits en réacteur ont été aggravées par la fin du projet de réacteur MAPLE au Canada en mai 2008, et le fait qu'il est probable qu'aucun réacteur n'entrera en service avant au moins 2015.

158. La première source supplémentaire à grande échelle de molybdène 99 sera probablement l'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (ANSTO). Aux États-Unis, le réacteur de recherche de l'Université du Missouri (MURR) a considérablement progressé dans la planification et l'exploration des ressources pour devenir un producteur national avec pour objectif de couvrir de 30 à 50 % de la demande, mais il faudra de 3 à 4 ans après l'obtention des autorisations pour que ces plans se concrétisent. Deux autres installations sont en construction en Égypte (fournie par la société argentine INVAP) et au Pakistan (fournie par la société allemande Isotope Technologies) pour la production de molybdène 99 mais les plans exacts de production n'ont pas encore été annoncés.

²⁵ http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12569

159. Il est urgent de développer une capacité d'irradiation en réacteur bien répartie géographiquement et d'augmenter le nombre des installations de traitement pour la production de molybdène 99. L'appui des gouvernements et une coopération plus poussée entre les producteurs d'isotopes, y compris dans le cadre de partenariats entre les secteurs public et privé, seront nécessaires pour faire en sorte que des réacteurs appropriés servent à l'irradiation des cibles à l'UFE pour la production de molybdène 99 à l'avenir.

I.2. Traitement par faisceau d'électrons

160. Les accélérateurs de faisceaux d'électrons de haute intensité sont utilisés par divers secteurs industriels pour améliorer les propriétés physiques et chimiques des matériaux (figure I-1) et réduire les contaminants indésirables. Il existe plus de 1 400 accélérateurs de faisceaux d'électrons de haute intensité en service commercial, qui représentent des milliards d'euros de valeur ajoutée pour de nombreux produits. En outre, près d'un millier d'accélérateurs de faible intensité sont utilisés pour la recherche.

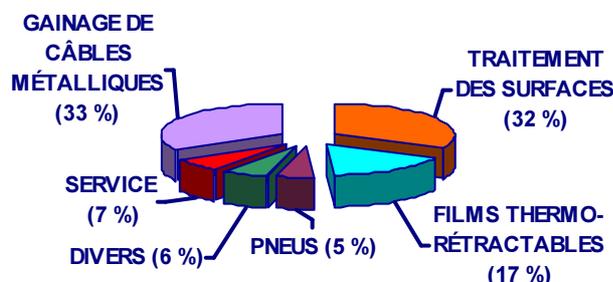


FIG. I-1. Structure type des marchés des accélérateurs de faisceaux d'électrons industriels. L'essentiel des utilisations concernent les câbles, les films thermorétractables et le traitement des surfaces (plus de 80 %), tandis que les applications pour les appareils médicaux et les produits alimentaires devraient augmenter à l'avenir.

161. Avec l'apparition d'accélérateurs de faisceaux d'électrons de haute énergie (5 à 10 MeV) et de forte puissance (jusqu'à environ 700 kW), la conversion de la puissance des faisceaux en rayonnement X est désormais une solution commercialement viable pour remplacer les rayons gamma dans les utilisations industrielles. La figure I-2 montre des conteneurs pouvant contenir des produits alimentaires, comme des emballages de viande de bœuf hachée, ou des boîtes de fournitures médicales jetables sur le point de passer devant des cibles au tantale refroidies par eau de deux mètres de haut.



FIG. I-2. Conteneurs renfermant des matières (fournitures médicales jetables, produits alimentaires) sur le point d'être traitées par rayons X produits par des faisceaux d'électrons de 5 à 7,5 MeV.

162. Comme l'utilisation d'accélérateurs de faisceaux d'électrons de basse énergie (moins de 500 keV) pour le traitement des encres, des revêtements et des adhésifs afin d'éliminer les composés organiques volatils se développe, il est nécessaire de mettre au point des installations mobiles pour des applications telles que le traitement des eaux usées industrielles, la désinfection des semences et la désodorisation de l'air. Un champ d'application nouveau des accélérateurs de faisceaux d'électrons de basse énergie est la décontamination des surfaces, par exemple des récipients PET et des emballages aseptiques.

I.3. Le radiotraitement en nanosciences

163. La technologie des rayonnements peut être utilisée pour la création et la caractérisation de nouveaux nanomatériaux. Elle est essentielle pour la nanotechnologie car le faisceau peut être focalisé sur quelques nanomètres et balayer à grande vitesse. La démonstration d'une nouvelle technologie a été faite aux Pays-Bas : la lithographie sans masque par faisceaux d'électrons multiples, qui utilise jusqu'à 13 000 faisceaux parallèles pour graver directement des structures de circuits électroniques, ce qui élimine le besoin de masques. Cette technique allie la très haute résolution et la très grande profondeur de champ du faisceau d'électrons avec un fort débit, ce qui donne un bon rapport coût-efficacité pour la production de la prochaine génération de puces.

164. La lithographie par faisceau d'ions de basse énergie fonctionne de façon similaire à la lithographie par faisceau d'électrons, avec l'avantage d'une diffusion minimale et d'une perte d'énergie quasi-uniforme le long de la trajectoire. Une nouvelle méthode mise au point

récemment utilise un collimateur de taille variable pour façonner le faisceau sur l'échantillon. En combinant les différentes tailles d'ouverture avec les différentes positions de l'échantillon, on peut exposer des structures complexes en peu de temps. Un faisceau d'ions lourds d'une énergie de plus de 1 MeV peut être utilisé pour la fabrication de membranes ioniques à partir de polymères et servir de gabarit pour la synthèse de microstructures et de nanostructures sous forme de fils. Des nanofils et des nanotubes magnétiques, conducteurs et supraconducteurs, isolés ou en réseau, ont été fabriqués de cette façon. Outre l'industrie électronique, les faisceaux d'électrons et d'ions sont utilisés comme outils pour l'étude de phénomènes physiques à l'échelle nanométrique à l'appui de recherches en physique, nanophotonique, nanobiotechnologie et nanomédecine.