

Conférence générale

GC(54)/INF/3

16 août 2010

Distribution générale

Français

Original : anglais

Cinquante-quatrième session ordinaire

Point 16 de l'ordre du jour provisoire

(GC(54)/1)

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2010

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 2009.
- Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2010* passe en revue les domaines suivants : applications énergétiques, fission et fusion avancées, données atomiques et nucléaires, applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche, techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, santé humaine, environnement, ressources en eau, production et disponibilité de radio-isotopes et technologie des rayonnements. On trouvera sur le site web¹ de l'Agence en anglais des informations complémentaires sur les faits marquants concernant la médecine nucléaire pour la prise en charge du cancer, les techniques nucléaires appliquées à la lutte contre les maladies animales transfrontières, celles utilisées pour la surveillance de la pollution des mers, le déclassement des installations nucléaires, les ressources humaines pour l'expansion de l'électronucléaire, l'infrastructure pour les nouveaux programmes électronucléaires, et enfin la production et la fourniture de molybdène-99.
- Des informations sur les activités de l'AIEA dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires figurent également dans le Rapport annuel 2009 (GC(54)/4) de l'AIEA, en particulier dans la partie Technologie, et dans le Rapport sur la coopération technique pour 2009 (GC(54)/INF/4).
- 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/GC54/Agenda/index.html>

Table des matières

Synthèse	1
A. Applications énergétiques	3
A.1. L'électronucléaire aujourd'hui	3
A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire	6
A.3. Cycle du combustible	7
A.3.1. Ressources et production d'uranium	7
A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible	9
A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible	11
A.4. Autres facteurs déterminants pour la croissance de l'électronucléaire	11
A.4.1. Aspects économiques	11
A.4.2. Sécurité	13
A.4.3. Mise en valeur des ressources humaines	14
B. Fission et fusion avancées	16
B.1. Fission avancée	16
B.1.1. INPRO et GIF	16
B.1.2. Cadre international pour la coopération en matière d'énergie nucléaire (CICEN)	17
B.1.3. Autres développements concernant la fission avancée	17
B.2. Fusion	18
C. Données atomiques et nucléaires	19
D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche	20
D.1. Accélérateurs	20
D.2. Réacteurs de recherche	20
E. Technologies nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture	22
E.1. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail	22
E.2. Lutte contre les insectes nuisibles	23
E.3. Qualité et sécurité sanitaire des aliments	26
E.4. Amélioration des cultures	27
E.5. Gestion durable des sols et de l'eau	28
E.5.1. Recours aux méthodes isotopiques pour améliorer la gestion de l'eau en agriculture	28
E.5.2. Fixation de carbone organique du sol et atténuation des changements climatiques	29
F. Santé humaine	30
F.1. Recours aux techniques nucléaires dans la lutte contre la malnutrition	30
F.2. L'imagerie hybride SPECT/TDM et PET/TDM	31
F.3. Progrès dans les applications en radio-oncologie	33
F.4. Impact de la technologie numérique sur l'imagerie radiologique X	33
G. Environnement	34
G.1. Recours aux techniques nucléaires pour quantifier les écoulements sous-marins d'eaux souterraines	34
G.2. Compréhension du cycle de carbone : application des techniques nucléaires pour évaluer les flux de particules de la surface au fond des océans	36
H. Ressources en eau	37
H.1. L'information avant l'action	40
H.2. Recours aux isotopes stables pour connaître la disponibilité et la qualité des eaux souterraines	40
I. Production de radio-isotopes et technologie des rayonnements	41
I.1. Radio-isotopes et radiopharmaceutiques	41
I.1.1. Production et disponibilité de radio-isotopes	41
I.1.2. Sécurité des approvisionnements en molybdène 99	43
I.2. Applications de la technologie des rayonnements	44
I.2.1. Recours aux faisceaux d'électrons pour stériliser les matériaux d'emballage et les conteneurs	44
I.2.2. Radiosynthèse de nanostructures à base de carbone	45

Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2010

Rapport du Directeur général

Synthèse

1. En 2009, 12 nouveaux réacteurs nucléaires de puissance ont été mis en chantier, soit le nombre le plus élevé depuis 1985, et les projections de la croissance de l'électronucléaire ont été une fois de plus révisées à la hausse. Toutefois, seuls deux nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau, et, avec trois réacteurs déconnectés pendant l'année, la capacité électronucléaire totale dans le monde a légèrement baissé pour la deuxième année consécutive.
2. L'expansion actuelle et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie. Dix des 12 chantiers ouverts se trouvaient en Asie, de même que les deux nouveaux réacteurs couplés au réseau. Si la crise financière mondiale qui a éclaté durant le deuxième semestre de 2008 n'a pas pesé sur les projections globales concernant l'électronucléaire, elle a été invoquée comme un facteur ayant contribué à des retards ou à des reports provisoires enregistrés dans des projets nucléaires de certaines régions du monde.
3. Dans certains pays européens qui imposaient précédemment des restrictions sur l'utilisation future de l'électronucléaire, on a noté une tendance à reconsidérer ces politiques.
4. L'intérêt pour le lancement de nouveaux programmes électronucléaires est resté élevé. Plus de 60 États Membres ont manifesté auprès de l'Agence le désir d'envisager de recourir à l'électronucléaire, et, en 2009, celle-ci a exécuté une première mission d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire en Jordanie, en Indonésie et au Vietnam.
5. Les estimations des ressources classiques répertoriées d'uranium (à moins de 130 \$/kg U) ont légèrement progressé, essentiellement en raison d'augmentations déclarées par l'Australie, le Canada et la Namibie. Les prix de l'uranium au comptant ont baissé, et les dernières données pour 2009 devraient montrer une baisse substantielle des activités de prospection et de mise en valeur de cette ressource.
6. Le Conseil des gouverneurs a autorisé le Directeur général de l'Agence à signer un accord avec la Fédération de Russie en vue de la création d'une réserve internationale d'uranium faiblement enrichi (UFE). Celle-ci serait constituée par 120 tonnes d'UFE qui pourraient être mises à la disposition d'un pays affecté par une interruption de son approvisionnement en UFE pour des motifs non commerciaux. L'accord entre l'Agence et la Fédération de Russie a été signé en mars 2010.

7. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a sélectionné le site d'Östhammar pour y construire un dépôt géologique pour le combustible usé, après un processus de sélection d'une vingtaine d'années. Aux États-Unis, le gouvernement a décidé d'arrêter l'installation d'un dépôt permanent pour les déchets de haute activité à Yucca Mountain, tout en poursuivant la procédure d'autorisation. Il prévoit de créer une commission chargée d'évaluer les solutions de remplacement.

8. Dans le domaine de la fusion nucléaire, les préparatifs du site du réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) sont achevés et des arrangements relatifs aux achats ont été signés pour des installations d'une valeur d'environ 1,5 milliard d'euros, soit un tiers de l'ensemble des achats prévus. Les travaux de construction de l'installation nationale d'ignition aux États-Unis sont achevés.

9. La sécurité alimentaire, la santé humaine, y compris l'action préventive et la lutte contre les maladies, la protection de l'environnement, la gestion des ressources en eau, et l'utilisation des radio-isotopes et des rayonnements sont autant de domaines dans lesquels les techniques nucléaires et isotopiques apportent des contributions bénéfiques au développement socio-économique de nombreux pays à travers le monde.

10. Dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture, les techniques nucléaires servent, avec des techniques complémentaires, à lutter contre un nombre croissant d'insectes ravageurs qui menacent la productivité agricole et le commerce international. L'analyse des ressources génétiques du bétail revêt une priorité élevée au niveau international car elle permet de dégager des options cruciales pour l'expansion durable de l'élevage. Les techniques nucléaires peuvent contribuer à ces efforts. Les émissions de carbone suscitant de plus en plus d'inquiétudes, l'option consistant à entreposer (fixer) le carbone dans le sol soulève un intérêt accru. Les outils isotopiques sont utiles pour déterminer la capacité de fixation de certaines terres.

11. L'imagerie diagnostique reste un des domaines les plus innovants de la médecine moderne. Les techniques nucléaires comme la tomographie à émission de positons (TEP), la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT) et la tomodensitométrie (TDM) sont de plus en plus souvent fusionnées dans des systèmes d'imagerie hybrides comme la SPECT/TDM et la PET/TDM, qui permettent de mener des recherches combinées à la fois sur l'anatomie et la fonction des organes humains. Ces systèmes d'imagerie hybrides gagnent en importance dans les domaines de la cardiologie et de l'oncologie. Les récents résultats de l'application de techniques faisant appel à des isotopes stables pour évaluer la biodisponibilité du fer et des caroténoïdes de la provitamine A dans des groupes de population vulnérables aideront les décideurs, les professionnels de la santé et d'autres parties prenantes à déterminer les étapes suivantes et les possibilités d'intervention.

12. Dans le domaine de la gestion des ressources naturelles, les techniques nucléaires servent à évaluer la quantité d'eau douce qui pénètre dans des zones côtières via des aquifères côtiers. Ceci est important car ces écoulements sous-marins d'eaux souterraines peuvent être une bonne source d'eau douce comme ils peuvent aussi, dans certains cas, être une source de pollution des zones côtières. Les isotopes stables sont de plus en plus utilisés pour comprendre la répartition spatiale des différents processus qui influent sur la disponibilité et la qualité des eaux souterraines tant au niveau local qu'au niveau régional. Les informations obtenues peuvent servir de références précieuses pour l'évaluation de l'impact des changements climatiques et d'autres facteurs sur les ressources en eaux souterraines.

13. En 2009, la demande toujours croissante de radio-isotopes destinés à des applications médicales et industrielles ainsi que les progrès des technologies connexes ont retenu l'attention du monde entier en raison du grand nombre de reportages consacrés aux graves pénuries d'approvisionnement en isotopes à usage médical, notamment le molybdène-99 produit par fission. De nouvelles applications

de la technologie des rayonnements continuent d'être mises au point comme en témoigne l'utilisation récente d'une nouvelle méthodologie faisant appel aux faisceaux d'électrons pour stériliser ou désinfecter des emballages et des conteneurs aseptiques sans produits chimiques.

A. Applications énergétiques

A.1. L'électronucléaire aujourd'hui

14. En ce qui concerne l'électronucléaire, 2009 a été la deuxième année consécutive où un grand nombre de nouveaux réacteurs ont été mis en chantier et où les projections de la croissance de l'électronucléaire ont été revues à la hausse. Si 2008 s'est signalée comme étant la première année depuis 1955 durant laquelle aucun nouveau réacteur n'avait été couplé au réseau, en 2009, deux réacteurs, Tomari-3 (866 MWe) au Japon et Rajasthan-5 (202 MWe) en Inde, ont été couplés au réseau.

15. Au 1^{er} janvier 2010, il y avait 437 réacteurs nucléaires de puissance en service dans le monde, avec une capacité de production totale de 371 GWe (voir tableau A-1). Ceci représentait environ 1,5 WGe de moins qu'à la fin de 2008, en partie en raison de la mise à l'arrêt de trois réacteurs, Hamaoka-1 et -2 au Japon et Ignalina-2 en Lituanie, qui a été retiré du service à la fin de l'année.

16. Il y a eu 12 mises en chantier de réacteurs : Hongyanhe-3 et -4, Sanmen-1 et -2, Yangjiang-2, Fuqing-2, Fangjiashan-2, Haiyang-1 et Taishan-1 (tous de 1 000 MWe) en Chine; Shin-Kori-4 (1 340 MWe) en République de Corée ; ainsi que Novovoronezh 2-2 (1 085 MWe) et Rostov-3 (1 011 MWe) en Fédération de Russie. Les travaux de construction de Mochovce-3 et -4 (chacun de 405 MWe) en Slovaquie ont repris activement. Il y avait eu dix mises en chantier en 2008 et huit ainsi que la reprise de la construction active d'un réacteur en 2007.

17. Au total, 56 réacteurs étaient donc en construction à la fin de l'année, soit le nombre le plus élevé depuis 1992.

18. L'expansion actuelle et les perspectives de croissance à court et à long terme restent concentrées en Asie. Dix des 12 chantiers ouverts en 2009 se trouvaient en Asie. Comme le montre le tableau A-1, sur les 56 réacteurs qui étaient en construction, 36 étaient en Asie, de même que 30 des 41 derniers réacteurs couplés au réseau. L'objectif de la Chine est d'atteindre 40 GWe de capacité électronucléaire en 2020, contre 8,4 GWe aujourd'hui. Le premier ministre indien, Manmohan Singh, lors de son allocution d'ouverture de la Conférence internationale sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique, tenue à New Delhi en septembre, a déclaré que l'Inde pouvait potentiellement atteindre 470 GWe d'ici 2050.

19. En Finlande, des demandes d'autorisation ont été soumises au gouvernement pour qu'il prenne des « décisions de principe » en ce qui concerne la construction de deux nouveaux réacteurs nucléaires. Toutefois, les travaux de construction d'Olkiluoto-3 ont pris du retard.

20. En 2009, les récentes tendances à augmenter la capacité et à renouveler ou à proroger les licences de nombreux réacteurs en service se sont poursuivies. Aux États-Unis, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a approuvé huit nouveaux renouvellements de licences de 20 ans (pour une durée de vie totale autorisée de 60 ans), ce qui porte à 59 le nombre de renouvellements de licences approuvés. Le Service d'inspection des installations nucléaires du Royaume-Uni a approuvé

des examens périodiques renouvelés de la sûreté pour deux réacteurs, en autorisant leur exploitation pour dix années supplémentaires. La centrale nucléaire espagnole Garona a bénéficié d'une prorogation de quatre ans de sa licence, et les licences d'exploitation des centrales canadiennes, Bruce A et Bruce B, ont été renouvelées pour cinq années supplémentaires.

21. Dans certains pays européens qui imposaient précédemment des restrictions sur l'utilisation future de l'électronucléaire, on a noté une tendance à reconsidérer ces politiques.

22. Si la crise financière mondiale qui a éclaté durant le deuxième semestre de 2008 n'a pas pesé sur les projections globales concernant l'électronucléaire (voir section A.2), elle a été invoquée comme un facteur ayant contribué à des retards ou à des reports provisoires enregistrés dans des projets nucléaires de certaines régions du monde. Vattenfall a annoncé en juin qu'il reportait de 12 à 18 mois les décisions relatives à la construction de nouveaux réacteurs nucléaires au Royaume-Uni, en invoquant la récession économique et la situation du marché. Les difficultés financières ont été évoquées lors du retrait des compagnies d'électricité GDF SUEZ et RWE du projet Belene en Bulgarie. La Fédération de Russie a annoncé qu'au cours des prochaines années, en raison de la crise financière et d'une réduction escomptée de l'utilisation d'électricité, elle ne planifierait qu'un seul réacteur par an au lieu de deux. Au Canada, l'Ontario a suspendu les activités d'achat pour deux nouveaux réacteurs devant être construits sur son site de Darlington en raison d'une baisse de demande d'électricité. Aux États-Unis, invoquant les incertitudes qui planent sur l'économie nationale, Exelon a reporté d'importants travaux préliminaires de construction d'une nouvelle centrale nucléaire au Texas. Les examens relatifs à cinq des 28 réacteurs concernés par 18 demandes de licences combinées avaient été suspendus à la fin de 2009 à la demande des requérants. En Afrique du Sud, Eskom a prorogé de deux ans, jusqu'en 2018, le calendrier de construction de son prochain réacteur.

23. Tout comme les projections de croissance (section A.2), l'intérêt porté au lancement de nouveaux programmes électronucléaires reste élevé. Plus de 60 États Membres ont manifesté auprès de l'Agence le désir d'envisager de recourir à l'électronucléaire. En 2009, le nombre de projets de coopération technique de l'Agence consacrés à l'introduction de l'électronucléaire a triplé. Une brochure sur un nouveau service de l'Agence, l'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR), a été publiée sous le titre *Integrated Nuclear Infrastructure Review Missions: Guidance on Preparing and Conducting INIR Missions*, et les premières missions de ce service ont été exécutées en Jordanie, en Indonésie et au Vietnam. Les missions INIR sont des examens par des pairs coordonnés par l'Agence, que des équipes d'experts internationaux effectuent en se fondant sur le document *Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development*, publié par l'Agence fin 2008. L'objectif et la portée de chacun de ces examens sont adaptés aux besoins de l'État Membre demandeur. Comme dans le cas d'une autoévaluation, la mission INIR est destinée à aider le pays à déterminer les lacunes dans le niveau actuel de développement de son programme par rapport aux étapes prévues et à y remédier efficacement.

Tableau A-1. Réacteurs nucléaires de puissance en service ou en construction dans le monde (au 1^{er} janvier 2010)^a

PAYS	Réacteurs en service		Réacteurs en construction		Électricité d'origine nucléaire fournie en 2009		Expérience d'exploitation totale en 2009	
	Nbre tranches	Total MWe	Nbre tranches	Total MWe	TW h	% du Total	Années	Mois
AFRIQUE DU SUD	2	1 800			11,6	4,8	50	3
ALLEMAGNE	17	20 480			127,7	26,1	751	5
ARGENTINE	2	935	1	692	7,6	7	62	7
ARMÉNIE	1	375			2,3	45	35	8
BELGIQUE	7	5 902			45	51,7	233	7
BRÉSIL	2	1 884			12,2	2,9	37	3
BULGARIE	2	1 906	2	1 906	14,2	35,9	147	3
CANADA	18	12 569			85,3	14,8	582	2
CHINE	11	8 438	20	19 920	65,7	1,9	99	3
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	20	17 705	6	6 520	141,1	34,8	339	7
ESPAGNE	8	7 450			50,6	17,5	269	6
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	104	100 747	1	1 165	796,9	20,2	3 499	11
FÉDÉRATION DE RUSSIE	31	21 743	10	8 007	152,8	17,8	994	7
FINLANDE	4	2 696	1	1 600	22,6	32,9	123	4
FRANCE	59	63 260	1	1 600	391,8	75,2	1 700	2
HONGRIE	4	1 889			14,3	43	98	2
INDE	18	3 987	5	2 708	14,8	2,2	318	5
IRAN, RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE D'			1	915				
JAPON	54	46 823	1	1 325	263,1	29,2	1 440	8
MEXIQUE	2	1 300			10,1	4,8	35	11
PAKISTAN	2	425	1	300	2,6	2,7	47	10
PAYS-BAS	1	487			4	3,7	65	0
RÉPUBLIQUE TCHÈQUE	6	3 678			25,7	33,8	110	10
ROUMANIE	2	1 300			10,8	20,6	15	11
ROYAUME-UNI	19	10 137			62,9	17,9	1 457	8
SLOVAQUIE	4	1 762	2	782	13,1	53,5	132	7
SLOVÉNIE	1	666			5,5	37,8	28	3
SUÈDE	10	9 036			50	37,4	372	6
SUISSE	5	3 238			26,3	39,5	173	10
UKRAINE	15	13 107	2	1900	78,0	48,6	368	6
Total ^{b, c}	437	370 705	56	51 940	2 558,3	14 %	13 913	0

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 la Lituanie et Taiwan (Chine) :

Lituanie : 10 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 76,2 % de la production électrique totale ;

Taiwan (Chine) : 6 réacteurs (4 980 MWe) en service ; 2 réacteurs (2 600 MWe) en construction ; 39,9 TW·h de production d'électricité d'origine nucléaire, représentant 20,7 % de la production électrique totale.

c. L'expérience d'exploitation totale tient compte de centrales à l'arrêt en Italie (81 ans), au Kazakhstan (25 ans et 10 mois), en Lituanie (43 ans et 6 mois) et à Taiwan (Chine) (170 ans et un mois).

A.2. Croissance prévue de l'électronucléaire

24. Chaque année, l'Agence actualise ses projections haute et basse de la croissance mondiale de l'électronucléaire. En 2009, malgré la crise financière qui a éclaté à la fin de 2008, ces deux projections ont été revues à la hausse. Dans la projection basse actualisée, la capacité nucléaire mondiale atteint 511 GWe en 2030, contre 371 GWe à la fin de 2009. Dans la projection haute actualisée, elle atteint 807 GWe. Ces projections révisées pour 2030 sont supérieures de 8 % à celles qui avaient été établies en 2008.

25. La tendance à la hausse des projections est plus accentuée pour l'Extrême-Orient, une région qui inclut la Chine, le Japon et la République de Corée. Des tendances à la baisse modestes des projections ont été établies pour l'Amérique du Nord et pour la région Asie du Sud-Est et Pacifique.

26. Si la crise financière qui s'est déclenchée à la fin de 2008 a perturbé les perspectives de certains projets électronucléaires, son impact n'a pas été le même selon les régions du monde. Les caractéristiques régionales des révisions des projections reflètent, en partie, les variations de cet impact dans différentes régions. La révision générale à la hausse des projections basse et haute traduit le sentiment des experts réunis par l'Agence selon lesquelles les facteurs à moyen et à long termes qui suscitent des attentes accrues à l'égard de l'électronucléaire n'avaient pas fondamentalement changé. La performance et la sûreté des centrales nucléaires sont restées bonnes. Le réchauffement climatique, la sécurité des approvisionnements énergétiques et les prix élevés des combustibles fossiles et leur instabilité ont continué de susciter des préoccupations. Cependant, toutes les études ont prévu une augmentation continue de la demande énergétique à moyen et à long termes.

27. Ce qui a changé par rapport aux projections établies en 2008, c'est qu'on a globalement l'impression que les engagements des gouvernements, des producteurs d'électricité et des vendeurs vis-à-vis des plans qu'ils avaient annoncés et les investissements qu'ils effectuaient déjà dans ces plans se sont raffermis avec le temps, suscitant ainsi la confiance. En outre, la levée des restrictions précédentes des fournisseurs nucléaires sur le commerce nucléaire permettra à l'Inde d'accélérer l'expansion prévue de l'électronucléaire.

28. Les projections de l'Agence concernant le développement électronucléaire n'ont pas été les seules à avoir été révisées en 2009. Des projections actualisées ont aussi été publiées en 2009 par l'Agence d'information sur l'énergie (EIA) des États-Unis, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE et l'Association nucléaire mondiale. La fourchette des projections de l'EIA s'est légèrement resserrée, celle de l'Association nucléaire mondiale s'est légèrement élargie, tandis que celle de l'AIE a été très légèrement revue à la hausse (les valeurs basse et haute ayant toutes deux augmenté). La figure A-1 compare les fourchettes des projections du développement électronucléaire établies en 2009 l'EIA, l'AIE, l'AIEA et l'Association nucléaire mondiale.

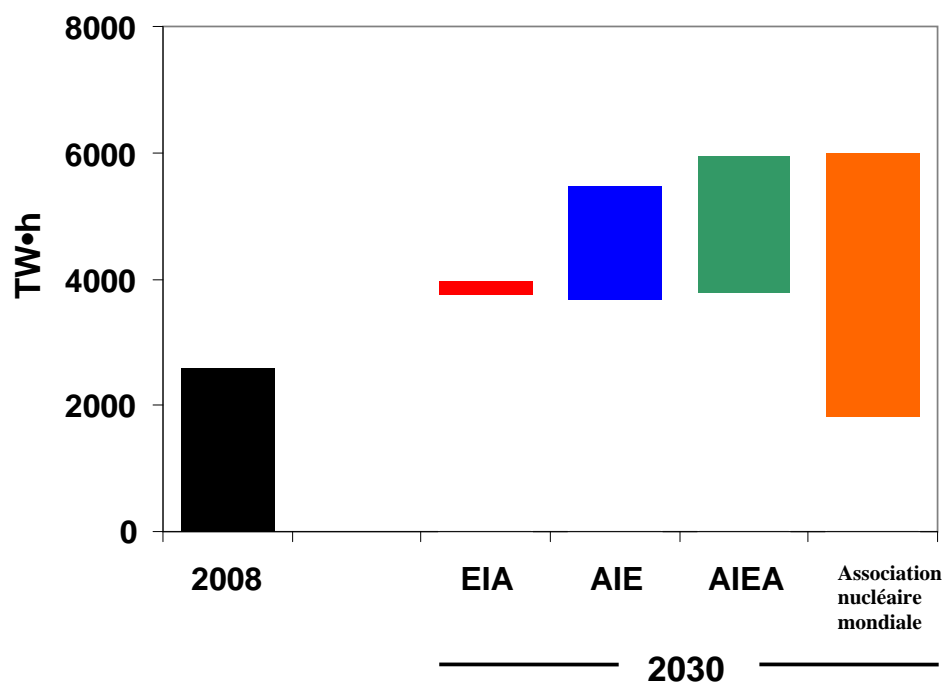


FIG. A-1. Comparaison des projections du développement électronucléaire établies par l'EIA, l'AIE, l'AIEA et l'Association nucléaire mondiale.

A.3. Cycle du combustible²

A.3.1. Ressources et production d'uranium³

29. Les ressources traditionnelles répertoriées d'uranium dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU sont actuellement estimées à 5,7 millions de tonnes (MtU). Ceci représente une augmentation de plus de 0,2 MtU par rapport à 2007, qui est essentiellement due aux augmentations déclarées par l'Australie, le Canada et la Namibie. Il y a en outre 0,7 MtU de ressources traditionnelles répertoriées dont les coûts de récupération s'établissent entre 130 \$/kgU and 260 \$/kgU. À titre de référence, le prix au comptant de l'uranium en 2009 a varié entre 110 \$/kg U et 135 \$/kgU, suivant une tendance à la baisse très progressive.

30. Les ressources traditionnelles non découvertes sont estimées à 6,3 MtU pour un coût inférieur à 130 \$/kgU, auxquelles viennent s'ajouter 0,2 MtU dont les coûts de récupération s'établissent entre 130 \$/kgU and 260 \$/kgU. Il s'agit notamment des ressources que l'on compte découvrir dans des gisements connus ou dans leurs alentours et de ressources plus hypothétiques dont on pense qu'elles existent dans des zones géologiquement favorables, mais encore inexplorées. On estime qu'il y a en outre 3,6 MtU de ressources hypothétiques dont les coûts de production n'ont pas encore été calculés.

² De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant le cycle du combustible figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel de l'AIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) et à l'adresse suivante : <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.

³ La présente section est inspirée du prochain « Livre rouge » de l'AEN (OCDE)-AIEA (*Uranium 2009 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris (2010)).

31. Les ressources non traditionnelles d'uranium et le thorium viennent s'ajouter aux autres ressources. Les ressources non traditionnelles comprennent l'uranium de l'eau de mer et celles pour lesquelles l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit mineur. Actuellement, très peu de pays déclarent les ressources non traditionnelles. Les dernières estimations d'uranium potentiellement récupérable associé à des phosphates, des minerais non ferreux, de la carbonatite, du schiste noir et de la lignite sont de l'ordre de 10 MtU. La Belgique, le Kazakhstan et les États-Unis ont produit dans le passé des quantités importantes d'uranium à partir d'acide phosphorique, et l'augmentation récente des prix de l'uranium a suscité un regain d'intérêt pour cette méthode en Australie, au Brésil, aux États-Unis, en France, en Inde, en Jordanie, au Maroc et en Tunisie. La Chine étudie la possibilité d'extraire de l'uranium des amas de cendres de houille produits par les centrales thermiques. Le thorium, qui peut aussi être utilisé comme combustible nucléaire, se trouve en abondance dans la nature et est facile à exploiter dans de nombreux pays. Les ressources mondiales de cette ressource sont estimées à environ 6 MtTh. Bien que le thorium soit utilisé comme combustible à des fins de démonstration, des travaux importants sont encore nécessaires avant qu'il ne puisse égaler l'uranium.

32. On estime que l'eau de mer contient 4 500 MtU, mais à un très faible niveau de concentration (3,3 parties par milliard). Il faudrait donc traiter 330 000 tonnes d'eau pour obtenir 1 kg d'uranium. Cette production revient actuellement trop cher. Des recherches ont été menées en Allemagne, aux États-Unis, en Italie, au Japon et au Royaume-Uni dans les années 70 et 80. Selon des expériences menées actuellement en laboratoire marin au Japon, il serait possible d'extraire de l'uranium avec des adsorbants en tresse arrimés sur les fonds marins et d'atteindre une capacité de production de 1 200 tU par an pour un coût estimé à environ 300 \$/kgU. Des recherches en laboratoire sont également effectuées en France et en Inde.

33. En raison de la baisse des prix au comptant de l'uranium en 2008, on s'attend, lors de la parution des données finales pour 2009, à ce qu'elles montrent une réduction des activités de prospection et de mise en valeur de cette ressource. Ceci est valable à la fois pour les pays qui ont déjà prospecté et mis en valeur des gisements d'uranium par le passé et pour ceux qui mènent depuis peu des activités de prospection.

34. En 2008, la production totale d'uranium dans le monde était de 43 800 tU, en hausse par rapport à celle de 2007 (41 300 tU). On estime qu'elle va passer à 49 000 tU en 2009. Comme le montre la figure A-2, le Canada, le Kazakhstan et l'Australie ont représenté presque 60 % de la production mondiale en 2008 et, avec cinq autres pays (États-Unis, Fédération de Russie, Namibie, Niger et Ouzbékistan), ils ont assuré 93 % de la production.

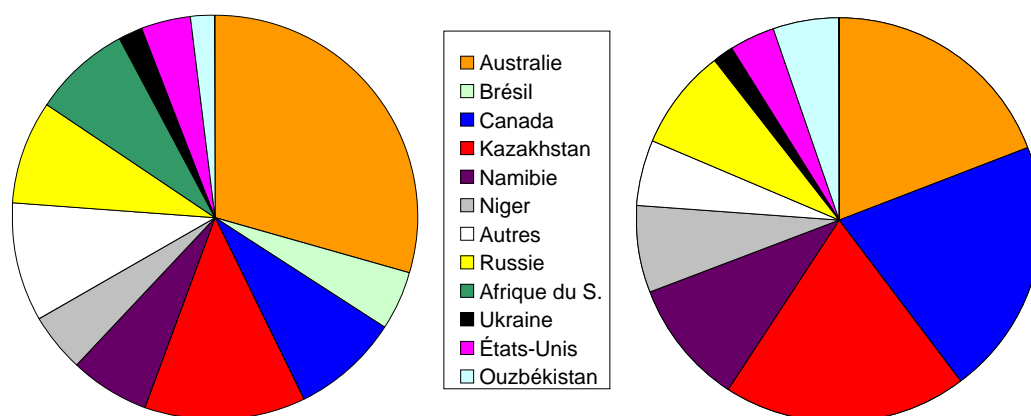


FIG. A-2. Répartition géographique des ressources d'uranium traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU (à gauche) et de la production d'uranium en 2008 (à droite).

35. Selon les prévisions, en 2009, la production d'uranium ne devait couvrir qu'environ 75 % des besoins estimés des réacteurs dans le monde (65 400 tU), le reste l'étant grâce à cinq sources secondaires : les stocks d'uranium naturel et enrichi, le retraitement de l'uranium à partir de combustible usé, le combustible à mélange d'oxydes (MOX), dont l'uranium 235 a été partiellement remplacé par du plutonium 239 provenant de combustible usé retraité, et le réenrichissement de résidus d'uranium appauvri (contenant moins de 0,7 % de ^{235}U). Au rythme de consommation estimé pour 2009, les 5,7 MtU de ressources d'uranium traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kgU devraient durer presque 90 ans. Cela soutient avantageusement la comparaison avec les réserves d'autres produits de base (cuivre, zinc, pétrole et gaz naturel), dont la durée varie entre 30 et 50 ans.

A.3.2. Conversion, enrichissement et fabrication de combustible

36. La capacité mondiale de conversion est d'environ 76 000 tonnes d'uranium naturel par an pour l'hexafluorure d'uranium (UF_6) et de 4 500 tU par an pour le dioxyde d'uranium (UO_2). La demande actuelle de conversion pour l' UF_6 s'établit actuellement à 62 000 tU par an. En 2009, AREVA a mis en chantier ses nouvelles installations de conversion (COMURHEX II) destinées à remplacer celles de Malvézi et de Pierrelatte (France). Les capacités nominales de conversion de COMURHEX II pour le tétrafluorure d'uranium (UF_4) et l' UF_6 sont de 15 000 tU par an pour chacun d'entre eux d'ici 2012. En 2008, Cameco Corporation et Kazatomprom ont annoncé la création d'une coentreprise pour implanter au Kazakhstan une usine de conversion d'une capacité de 12 000 t d' UF_6 .

37. La capacité mondiale d'enrichissement est actuellement d'environ 60 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande totale d'environ 45 millions d'UTS par an. 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 recourent à l'enrichissement par centrifugation. Georges Besse II et l'ACP doivent permettre de mettre à l'arrêt des installations d'enrichissement par diffusion gazeuse. À Georges Besse II, la première cascade de centrifugeuses a commencé à tourner en décembre 2009. S'agissant de la NEF, la première centrifugeuse a été installée en septembre 2009. À l'ACP, on

s'interroge encore sur l'état de préparation de la technologie⁴. La Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis a commencé l'examen formel de deux nouvelles installations, l'installation d'enrichissement d'Eagle Rock en Idaho, proposée par AREVA, et l'installation d'enrichissement par laser en Caroline du Nord, proposée par Global Laser Enrichment.

38. Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) pense commencer l'exploitation commerciale de cascades de centrifugeuses améliorées à Rokkasho-mura vers 2011 et étendre la capacité de 150 000 UTS aujourd'hui à 1,5 million UTS d'ici 2020. La capacité actuelle d'enrichissement en Chine, qui utilise des centrifugeuses russes, est de 1,3 million d'UTS, et la Russie et la Chine ont récemment convenu d'ajouter 0,5 million d'UTS. Des installations d'enrichissement réservées aux besoins nationaux existent en Argentine, au Brésil, en Inde et au Pakistan. L'Ukraine a rejoint l'Arménie, la Fédération de Russie et le Kazakhstan comme participants au Centre international d'enrichissement d'uranium (CIEU), créé en 2007 à Angarsk (Fédération de Russie).

39. En novembre, le Conseil des gouverneurs a autorisé le Directeur général de l'Agence à signer un accord avec la Fédération de Russie en vue de la création d'une réserve internationale d'uranium faiblement enrichi (UFE). Celle-ci serait constituée par 120 tonnes d'UFE qui pourraient être mises à la disposition d'un pays affecté par une interruption de son approvisionnement en UFE pour des motifs non commerciaux. Le Directeur général serait le seul à pouvoir approuver le prélèvement d'UFE dans cette réserve, conformément aux critères établis dans l'accord avec la Fédération de Russie. Celle-ci serait tenue de délivrer toutes les autorisations et les licences nécessaires à l'exportation de l'UFE, et le pays recevant l'UFE le paierait au prix du marché au moment de la livraison. L'accord entre l'Agence et la Fédération de Russie a été signé en mars 2010.

40. La capacité mondiale de fabrication de combustible est actuellement d'environ 13 000 tonnes d'uranium (tU) par an (uranium enrichi) pour le combustible des réacteurs à eau ordinaire (REO) et d'environ 4 000 tU par an (uranium naturel) pour le combustible des réacteurs à eau lourde sous pression (REL). La demande totale est approximativement de 10 400 tU par an. Certaines installations existantes sont en cours d'expansion, par exemple en Chine, aux États-Unis et en République de Corée. Les capacités actuelles de fabrication de combustible MOX, essentiellement situées en France, en Inde et au Royaume-Uni avec quelques petites installations en Fédération de Russie et au Japon, avoisinent les 250 tonnes de métaux lourds (tML). D'autres usines de fabrication de combustible MOX sont en construction aux États-Unis (pour utiliser les surplus de plutonium de qualité militaire). Genkai-3 au Japon a commencé à utiliser du combustible MOX en novembre, devenant le premier réacteur japonais à fonctionner de la sorte. Dans le monde, 31 réacteurs thermiques utilisent actuellement du combustible MOX.

⁴ Le Département de l'énergie des États-Unis a reporté l'examen de la garantie de prêt demandée afin que les questions liées à l'état de préparation de la technologie d'enrichissement de l'ACP puissent être étudiées.

A.3.3. Partie terminale du cycle du combustible

41. La quantité totale de combustible usé produite à l'échelle mondiale est d'environ 320 000 tonnes de métaux lourds (tML). Sur ce total, environ 95 000 tML ont déjà été retraitées, et quelque 225 000 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. La capacité mondiale de retraitement est d'environ 5 000 tML par an. La fin des travaux à la nouvelle usine de retraitement de Rokkasho au Japon a été reportée jusqu'en 2010.

42. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a sélectionné le site d'Östhammar pour y construire un dépôt géologique pour le combustible usé, après un processus de sélection d'une vingtaine d'années qui a permis, en 2002, de réduire à deux le nombre des sites candidats. Les recherches menées ultérieurement sur les sites ont démontré que le soubassement à Östhammar était plus stable et moins infiltré par les eaux que celui de Oskarshamn, l'autre site potentiel. SKB prévoit de demander une licence de construction en 2010, la mise en service de l'installation étant fixée pour 2023.

43. Les recherches sur des sites susceptibles d'accueillir des dépôts à Olkiluoto en Finlande et à Bure en France se sont poursuivies comme prévu, la mise en service des installations étant prévue pour 2020 et 2025 respectivement.

44. Aux États-Unis, le gouvernement a décidé d'arrêter l'installation d'un dépôt permanent pour les déchets de haute activité à Yucca Mountain, tout en poursuivant la procédure d'autorisation. Il prévoit de créer une commission chargée d'évaluer les solutions de remplacement.

45. Au Royaume-Uni, un processus volontaire de choix d'un site a été engagé. Deux municipalités dans les environs de Sellafield se sont déclarées intéressées.

46. En 2009, le nombre de réacteurs de puissance dans le monde entièrement démantelés est passé à 15, après l'achèvement des travaux de déclasserment du réacteur nucléaire de puissance de Rancho Seco, en Californie (États-Unis). Cinquante et un réacteurs mis à l'arrêt étaient en cours de démantèlement, 48 étaient mis en attente sûre, trois étaient placés sous massif de protection, et pour six autres, les stratégies de déclasserment n'avaient pas été encore déterminées.

A.4. Autres facteurs déterminants pour la croissance de l'électronucléaire

A.4.1. Aspects économiques

47. Le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009* signalait que la fourchette des estimations des coûts des nouvelles centrales nucléaires avait augmenté à sa partie supérieure par rapport à la fourchette de 1 200–2 500 \$ par kWe indiquée dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2006*. L'année dernière, les estimations des coûts sont restées élevées. La figure A-3 montre les estimations récentes des coûts instantanés recueillies par l'Agence, en les regroupant par région⁵.

⁵ Les données sont tirées d'études de coûts et de relevés de prix de l'industrie librement accessibles. Toutes les mises en garde mentionnées dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009* s'appliquent : les estimations des coûts peuvent varier en fonction des différences dans la définition des coûts instantanés, selon qu'il s'agit d'un site vierge ou d'un site sur lequel il y a déjà des réacteurs, ou encore que le site se trouve dans une zone sismiquement active, en fonction des variations des coûts de la main d'œuvre et des matériaux, ainsi que des différences dans les prescriptions en matière de localisation, la proportion de composants des centrales fabriqués ou achetés localement, les

48. Le schéma général de la figure conforte l'observation selon laquelle l'expérience réduit les incertitudes liées aux coûts. Bien que plusieurs raisons expliquent les faibles coûts en Asie (par exemple, les coûts des intrants qui sont en général plus bas qu'ailleurs et des devis qui parfois n'incluent que les composants importés), c'est aussi la région qui a l'expérience la plus récente en matière de construction de nouveaux réacteurs.

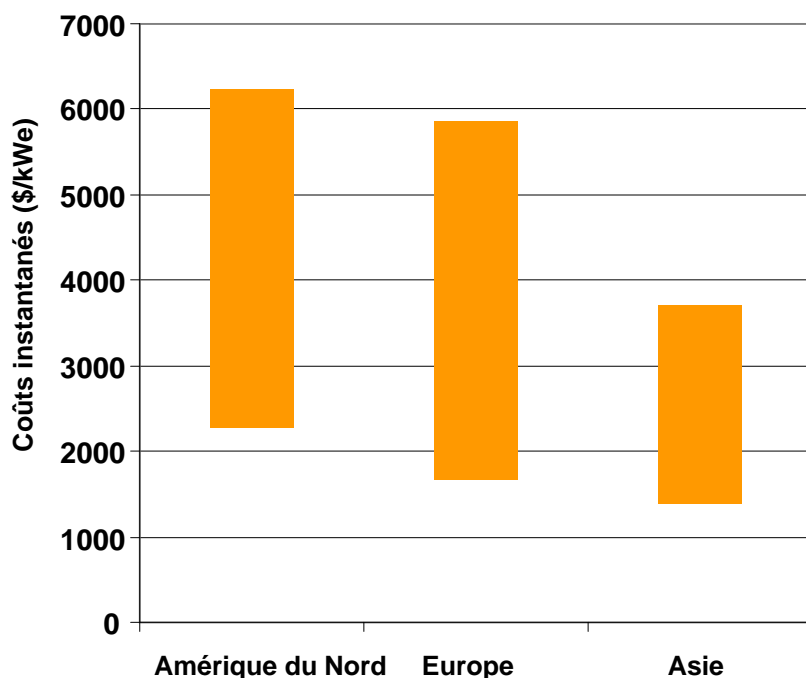


FIG. A-3. Fourchettes des estimations des coûts afférents à la construction instantanée par région, de 2007 à 2009 (en dollars de 2008)⁶.

49. Alors qu'il y a eu davantage d'estimations des coûts pour des projets électronucléaires particuliers à avoir été publiées, comme celles recueillies pour la figure A-3, le nombre d'estimations théoriques des coûts de l'électronucléaire publiées a, quant à lui, diminué. Quelques-unes ont néanmoins été publiées en 2009.

50. L'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) a mis à jour une étude des coûts aux États-Unis qu'il avait faite en 2003⁷ — son estimation actualisée des coûts afférents à la construction instantanée (4 000 \$/kWe) est très proche des estimations moyennes pour l'Amérique du Nord figurant dans la figure A-3. Il y conclut que, aux États-Unis, le coût des investissements sera plus élevé pour les centrales nucléaires que pour les centrales au charbon et au gaz naturel en raison du manque d'expérience récente et des incertitudes qui en résultent pour les investisseurs. Sans cette « prime de risque », les estimations du coût moyen actualisé de l'électricité (CMAE) produite par des centrales nucléaires seraient comparables à celles établies pour les centrales au charbon et au gaz, même si l'on

subventions et les garanties financières, les prescriptions réglementaires et leur prévisibilité, les arrangements contractuels, les taux de change et les anticipations inflationnistes de même que les technologies.

⁶ Le graphique correspond à 85 estimations des coûts instantanés, dont 26 concernent l'Amérique du Nord, 32 l'Europe et 27 l'Asie.

⁷ Institut de technologie du Massachusetts, *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study* (2003), pouvant être consultée à l'adresse : <http://web.mit.edu/nuclearpower/>

soustrait les coûts et les taxes liés aux émissions de dioxyde de carbone et si l'on retient un coût afférent à la construction instantanée de 4 000 \$/kWe. Les États-Unis ont actuellement pour politique d'accorder des garanties de prêts et des crédits d'impôt sur la production pour un nombre limité de nouvelles centrales nucléaires, qui viennent en déduction de la prime de risque. Cependant, l'étude conclut que l'expansion à long terme de l'électronucléaire dans ce pays passe obligatoirement par l'élimination permanente de la prime de risque, ce qui n'est possible que si la performance des centrales nucléaires s'avère bonne.

51. Une deuxième étude, effectuée par Citigroup Investment Research, a estimé les coûts instantanés de nouveaux réacteurs nucléaires génériques au Royaume-Uni entre 3 700 \$–5 200 \$/kWe. Le chiffre s'inscrit dans une fourchette des estimations des coûts concernant des projets européens indiquée dans la figure A-3. Cette dernière contient également des estimations des coûts figurant dans l'étude intitulée « *Coûts prévisionnels de production de l'électricité : 2010* » qui a été publiée récemment par l'AIE/OCDE et l'AEN/OCDE. Cette étude a conclu que les estimations des coûts instantanés varient sensiblement suivant les pays par suite de différences d'ordre financier, technique et réglementaire. Des estimations plus faibles des coûts ont été communiquées pour l'Asie, et notamment pour la République de Corée (1 556 \$/KWe), qui a couplé quatre nouveaux réacteurs au réseau depuis 2000 et en a six en construction.

A.4.2. Sûreté⁸

52. Les indicateurs de sûreté, tels que ceux publiés par l'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO) et reproduits dans les figures A-4 et A-5, 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.

53. 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 2009* (GC(54)/INF/2) de l'Agence.

⁸ De plus amples informations sur les activités de l'Agence concernant la sûreté nucléaire figurent dans les sections correspondantes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) et sur le site <http://www-ns.iaea.org/>.

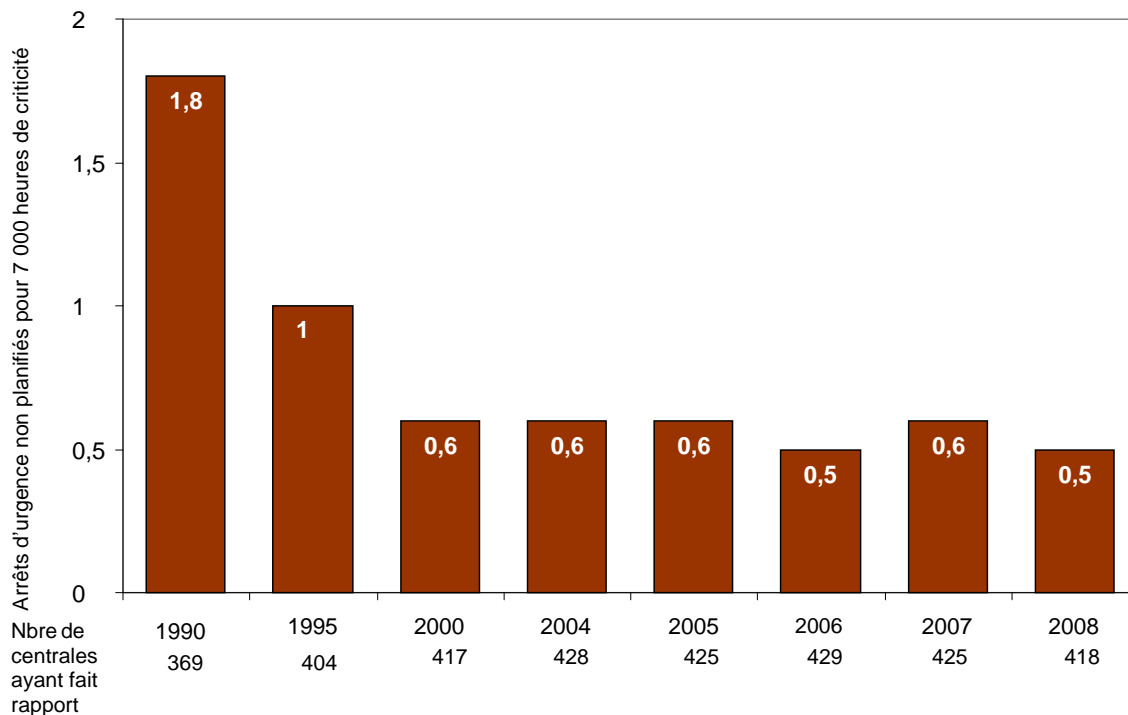


FIG. A-4. Arrêts d'urgence non planifiés pour 7 000 heures de criticité (source : indicateurs de performance WANO en 2008).

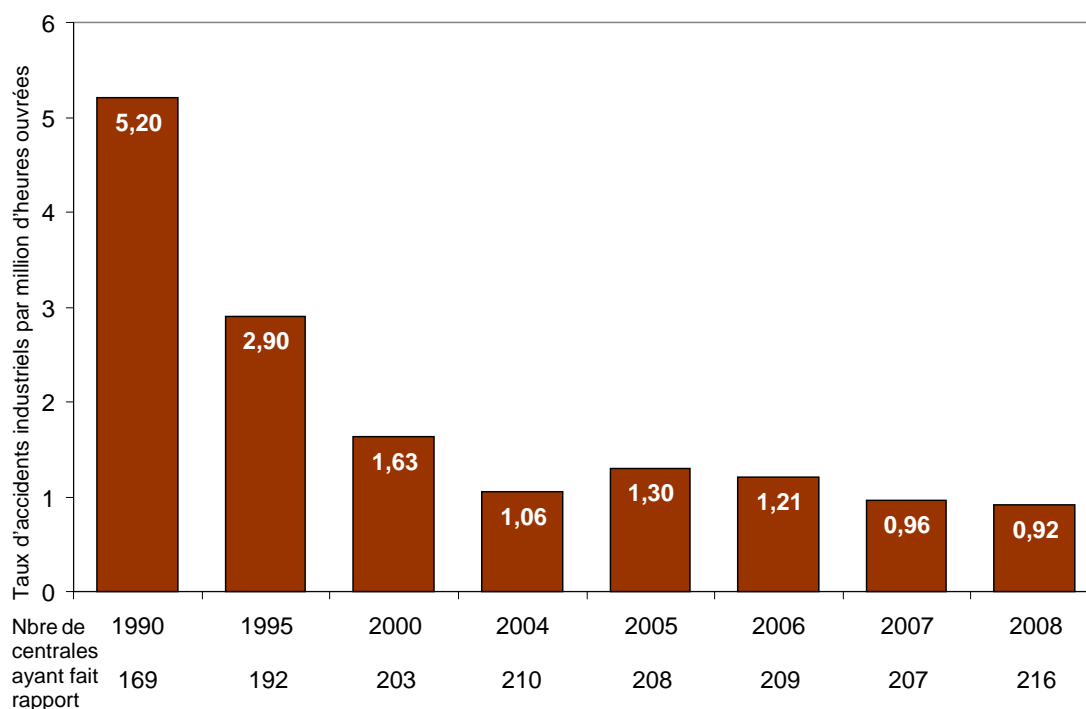


FIG. A-5. Taux d'accidents industriels dans les centrales nucléaires par million d'heures ouvrées (source : indicateurs de performance WANO en 2008).

A.4.3. Mise en valeur des ressources humaines

54. Les estimations des besoins en ressources humaines associés à une quelconque des projections examinées dans la section A.2 ne sont pas facilement disponibles, et 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. Devant l'intérêt accru que suscite l'électronucléaire, des pays ont exprimé leurs craintes quant à d'éventuelles pénuries de spécialistes ayant les compétences requises par l'industrie électronucléaire, bien que l'on admette également que la situation soit différente d'un pays à l'autre à cause de divers facteurs, le principal étant le développement de leur programme électronucléaire.

55. 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 succès. Par exemple, la compagnie Électricité de France (EDF) a recruté quatre fois plus de spécialistes en 2008 qu'en 2006, et elle compte maintenir ce rythme de recrutement élevé pendant encore plusieurs années, grâce en partie à un projet interne de « renouvellement des compétences ». AREVA a recruté 8 000 ingénieurs en 2009 et prévoit d'en recruter plusieurs milliers d'autres dans les années à venir. Les deux sociétés bénéficieront de l'aide d'un comité de coordination des formations aux sciences et techniques nucléaires (C2FSTN), créé en 2008 sur l'initiative du président de la République. Aux États-Unis, le recrutement d'ingénieurs nucléaires a augmenté de 46 % au cours des cinq dernières années, bénéficiant d'un financement des pouvoirs publics et de la publication d'enquêtes biennales sur les besoins en ressources humaines qui ont amélioré la visibilité des carrières dans le domaine nucléaire. La Chine élabore un plan quinquennal afin de recruter 20 000 nouveaux ingénieurs d'ici 2020 pour son programme électronucléaire, et la Nuclear Power Corporation of India développe ses programmes actuels de recrutement pour plus que doubler le nombre de ses ingénieurs d'ici 2017.

56. Si les projections hautes concernant l'électronucléaire décrites dans la section A.2 se réalisent, il faudra que ces initiatives soient couronnées de succès et se répètent plusieurs fois. L'enjeu sera de taille. Par exemple, la projection haute de l'Agence supposerait le raccordement au réseau de 22 nouveaux réacteurs en moyenne chaque année jusqu'en 2030. Ceci est bien plus que la moyenne de trois nouveaux réacteurs couplés au réseau chaque année entre 2000 et 2009, et un tiers de plus que la moyenne annuelle de 16 nouveaux réacteurs durant les années 70. Cependant, même dans la projection haute, la capacité électronucléaire ne croît guère plus vite (0,5 %) que la capacité globale de production d'électricité. Ceci signifie que les besoins en ressources humaines pour les programmes électronucléaires n'augmenteraient qu'un peu plus rapidement que les besoins identiques pour la production d'électricité à partir du charbon, du gaz naturel et des énergies renouvelables. Le défi à relever par l'électronucléaire n'est pas exceptionnel.

57. Cependant, pour y répondre, des données plus précises sont nécessaires pour :

- estimer les besoins en main-d'œuvre dans différents pays pour la conception, la réglementation, la fabrication, la construction, l'exploitation de centrales nucléaires et l'appui à leur fournir ;
- estimer la capacité des programmes existants à répondre à ces impératifs ; et
- estimer les investissements et les délais nécessaires pour développer les programmes existants afin de remédier à toute pénurie anticipée de main-d'œuvre.

58. L'AEN/OCDE, qui s'intéresse plus particulièrement aux tendances dans les pays de l'OCDE à la suite de son rapport de 2000 intitulé « *Nuclear Education and Training: Cause for Concern?* », et le Forum européen de l'énergie nucléaire s'efforcent actuellement de rassembler des informations sur les ressources humaines requises. Un effort international concerté est cependant nécessaire pour recueillir et analyser les données en vue d'en tirer des conclusions plus exhaustives sur la question des ressources humaines pour l'électronucléaire au niveau mondial. En conséquence, l'Agence en coopération avec l'AEN/OCDE, la WANO, l'Association nucléaire mondiale, l'Institut de l'énergie nucléaire et le Laboratoire national de Los Alamos aux États-Unis, l'Agence japonaise de l'énergie

atomique, Cogent Sector Skills Council au Royaume-Uni et d'autres, a annoncé en mars 2010, à la conférence internationale sur la mise en valeur des ressources humaines pour l'introduction et l'expansion de programmes électronucléaires, tenue à Abou Dhabi, le lancement d'une nouvelle initiative internationale. Il est prévu qu'à la suite de cette initiative, on entreprendra les activités suivantes à l'échelle mondiale : enquête sur les ressources humaines dans les centrales nucléaires existantes, y compris leurs sous-traitants et leurs fournisseurs ; enquête sur l'offre et la demande de ressources humaines pour les organismes de réglementation nucléaire ; enquête sur les organismes et les programmes de formation théorique qui appuient l'électronucléaire ; mise au point d'outils de planification de la main-d'œuvre pour les pays qui envisagent de lancer ou qui lancent de nouveaux programmes électronucléaires ; et incorporation des données susmentionnées dans une base de données accessible pouvant être utilisée pour modéliser l'offre et la demande de ressources humaines à l'échelle mondiale ou nationale.

B. Fission et fusion avancées

B.1. Fission avancée⁹

B.1.1. INPRO et GIF

59. Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'Agence fournit un cadre dans lequel les détenteurs et les utilisateurs de technologies étudient conjointement des systèmes innovants d'énergie nucléaire. Lancé en 2001, l'INPRO compte 31 membres qui représentent 75 % du PIB mondial et 65 % de la population mondiale. En 2009, les activités de l'INPRO ont été regroupées sous cinq grands nouveaux domaines d'activité, à savoir : les évaluations des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) par la méthode INPRO ; la vision globale, les scénarios et les filières pour un développement durable du nucléaire ; les innovations en matière de technologie nucléaire ; les innovations en matière d'arrangements institutionnels et le Forum de dialogue de l'INPRO sur les innovations concernant l'énergie nucléaire.

60. En 2009, le Belarus a entrepris une nouvelle NESA. Un manuel en neuf volumes sur la méthodologie INPRO a été publié, et l'INPRO s'est doté d'un « module de soutien aux NESA » comportant des formations, des missions d'appui et une aide pour la mise en œuvre, l'analyse et l'évaluation des résultats. Des publications intitulées *IAEA Tools and Methodologies for Energy System Planning and Nuclear Energy System Assessments* et *Common User Considerations by Developing Countries for Future Nuclear Energy Systems* ont aussi vu le jour. L'INPRO a achevé les études sur les scénarios mondiaux et les tendances régionales du développement de l'énergie nucléaire

⁹ De plus amples informations sur les activités de l'AIEA concernant les réacteurs à fission avancés figurent dans les sections correspondantes du rapport annuel 2009 de l'AIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>). Voir aussi : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Terms for describing new, advanced nuclear power plants*, IAEA-TECDOC-936 (1997); *Status of liquid metal cooled fast reactor technology*, IAEA-TECDOC-1083 (1999); *Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology*, IAEA-TECDOC-1198 (2001); *Heavy Water Reactors: Status and Projected Development*, Technical Reports Series No. 407 (2002); *Review of national accelerator driven system programmes for partitioning and transmutation*, IAEA-TECDOC-1365 (2003); *Status of advanced light water reactor designs: 2004*, IAEA-TECDOC-1391 (2004); *Status of innovative small and medium sized reactor designs: 2005*, IAEA-TECDOC-1485 (2005); *Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling*, IAEA-TECDOC-1536 (2007); *Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation*, IAEA-TECDOC--1569 (2007); and *Advanced Applications of Water Cooled Nuclear Power Plants*, IAEA-TECDOC-1584 (2008).

au XXI^e siècle ainsi que sur les questions juridiques et institutionnelles liées aux centrales nucléaires transportables.

61. À travers un système de contrats et d'accords, le Forum international Génération IV (GIF), qui compte maintenant 13 membres¹⁰, coordonne les activités de recherche sur six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems* [réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNRRG), réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, réacteurs à sels fondus, réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, réacteurs refroidis par eau supercritique et réacteurs à très haute température (RTHT)]. Cependant, la plupart des études techniques en cours sur les systèmes concernés ne font pas partie du programme du GIF.

62. À la fin de 2009, l'*Accord-cadre sur la collaboration internationale en matière de recherche et de développement des systèmes d'énergie nucléaire de Génération IV* avait été signé par neuf membres du GIF : l'Afrique du Sud, le Canada, la Chine, les États-Unis d'Amérique, la France, le Japon, la République de Corée, la Suisse et Euratom. Il définit les mécanismes de collaboration du GIF, à savoir des arrangements-système et des arrangements-projet. Des arrangements-système sont en place pour quatre des six systèmes sélectionnés : les RNRRG, les réacteurs refroidis par eau supercritique, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium et les RTHT. En 2009, le Ministère chinois de la science et de la technologie a signé l'arrangement-système pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, et un quatrième arrangement-projet pour ces réacteurs, portant sur leur sûreté et leur exploitation, est entré en vigueur.

63. L'Agence et le GIF coopèrent pour éviter les doubles emplois et créer des synergies. Cette coopération prévoit notamment l'utilisation par l'Agence du modèle d'évaluation économique (ECONS) du GIF pour l'estimation du coût des réacteurs refroidis par gaz, ainsi que l'utilisation par le GIF du modèle d'évaluation économique de l'Agence pour la production d'hydrogène d'origine nucléaire (HEEP). En outre, le GIF coopère au projet de recherche coordonnée de l'Agence sur les phénomènes de transfert thermique et les essais de codes thermohydrauliques pour les réacteurs refroidis par eau supercritique.

B.1.2. Cadre international pour la coopération en matière d'énergie nucléaire (CICEN)

64. Le cadre international pour la coopération en matière d'énergie nucléaire (CICEN) a été lancé à l'origine par les États-Unis en 2006 en tant que Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP). Il a comporté a) une collaboration entre des pays s'accordant sur la nécessité d'une expansion du nucléaire dans le monde, actuellement au nombre de 25, et b) un programme national des États-Unis visant à mettre en place des technologies de recyclage, de fabrication du combustible et des réacteurs afin de détruire les éléments radioactifs à longue période dans le combustible usé. Si ce dernier a été interrompu en 2009, la collaboration internationale s'est poursuivie avec des réunions des deux groupes de travail – sur la fiabilité des services relatifs au combustible et sur la mise en place des infrastructures – ainsi que de son Groupe de direction, en avril, et de son Comité exécutif ministériel en octobre, en Chine. Le nom de cette collaboration internationale a été modifié en juin 2010 en vue d'en élargir le champ et d'attirer davantage de participants.

B.1.3. Autres développements concernant la fission avancée

65. Outre l'INPRO, le GIF et le CICEN, un certain nombre de pays, de sociétés et de partenariats mènent des activités de recherche, de mise au point et d'implantation de réacteurs à fission avancés.

¹⁰ Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, Fédération de Russie, France, Japon, République de Corée, Royaume-Uni, Suisse et Euratom.

Ces initiatives constituent l'essentiel des travaux menés dans le monde sur la fission avancée et couvrent les réacteurs à haute température, les réacteurs à neutrons rapides, ainsi que des réacteurs à eau ordinaire améliorés de différentes tailles et aux applications diverses. Les avancées en 2009 ont été dans la droite ligne des progrès antérieurs résumés dans le *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009*¹¹ et seront décrites plus en détail dans la mise à jour 2010 du rapport de l'Agence sur la *situation internationale et les perspectives de l'électronucléaire*.

B.2. Fusion

66. Les sept parties au projet de réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER) (Chine, États-Unis, Fédération de Russie, Inde, Japon, République de Corée et Union européenne) ont poursuivi comme prévu les travaux d'infrastructure et de préparation du site, ces derniers s'étant achevés en mars. Des arrangements relatifs aux achats ont été signés pour des installations d'une valeur d'environ 1,5 milliard d'euros, soit un tiers de l'ensemble des achats prévus.

67. Dans le cadre de leur accord formel de coopération¹², l'Agence et l'Organisation internationale ITER ont commencé à planifier la coopération internationale relative à la formation, aux échanges de personnel, aux conférences et aux publications sur les composants et les installations nécessaires à la fusion. La participation, avec l'appui de l'Agence, de jeunes physiciens spécialistes de la fusion et des plasmas à des expériences conjointes sur la fusion dans des installations existantes (puis aux publications parues ultérieurement) s'est poursuivie dans le cadre d'expériences sur les phénomènes de turbulences dans les plasmas des tokamaks qui dégradent le confinement énergétique, organisées en mai par la communauté des tokamaks brésiliens.

68. L'installation nationale d'ignition (NIF) aux laboratoires Lawrence Livermore aux États-Unis a été inaugurée en mai. Elle est dotée de 192 faisceaux laser d'une énergie totale d'environ 1,5 mégajoule focalisés sur une « hohlraum » afin de déclencher une réaction de fusion dans des pastilles de deutérium-tritium. Les premiers résultats sur les interactions des faisceaux dans la « hohlraum » communiqués en septembre lors de la Conférence internationale sur les sciences et les applications en fusion inertielle ont montré que la NIF était prête à entreprendre des expériences de physique visant à produire à terme de l'énergie par fusion inertielle et à mieux comprendre la nature et l'évolution de l'univers.

¹¹ Voir <http://www.iaea.org/Publications/Reports/ntr2009.pdf>

¹² Reproduit dans le document INFCIRC/25/Add.8 disponible sur le site web de l'Agence à l'adresse <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/2009/infcirc25a8.pdf>.

C. Données atomiques et nucléaires

69. Coordonnées par l'Agence, les grandes bases de données élaborées par le réseau international de centres de données sur les réactions nucléaires et le réseau international des évaluateurs de données relatives à la structure et à la désintégration des noyaux sont constamment améliorées en ce qui concerne la qualité, l'exhaustivité, la présentation visuelle et la répartition mondiale des données. Il convient de noter en particulier en 2009 la collaboration internationale sur l'assurance de la qualité des données expérimentales sur les réactions nucléaires (EXFOR). De nouvelles bibliothèques de données ont été mises à disposition pour les applications dans les calculs relatifs aux réacteurs rapides, la dosimétrie des neutrons et l'analyse des matières à l'aide de faisceaux d'ions. Le nombre de recherches à partir des serveurs web des centres coopérants a augmenté d'environ 10 % par an au cours des deux dernières années.

70. La planification avancée des traitements et la dosimétrie physique à l'aide de protons et de faisceaux d'ions sont basées sur des modèles informatiques (techniques de Monte Carlo) dans lesquels les données nucléaires constituent un apport important. Deux nouvelles installations de faisceaux d'ions sont devenues opérationnelles en Allemagne et au Japon en 2009. Plus de dix centres de radiothérapie se trouvent à un stade avancé de construction. Lors de la Conférence internationale sur l'analyse des faisceaux d'ions tenue en 2009, de nouvelles utilisations de ces faisceaux ont été rapportées non seulement pour l'imagerie moléculaire et l'étude des nanoparticules et des dispositifs nanométriques en microtomographie, mais aussi pour l'analyse des faisceaux d'ions sur la surface de mars.

71. En ce qui concerne l'électronucléaire, les activités effectuées dans le cadre de l'industrie nucléaire européenne ont été centrées sur la validation de la nouvelle version 3.1.1 du Fichier conjoint de données évaluées sur la fission et la fusion (JEFF-3.1.1) en vue de son adoption pour les analyses de sûreté et la planification opérationnelle du parc nucléaire actuel, et pour l'analyse des modèles de réacteur de génération IV. S'agissant de la fusion, le manuel *Handbook of Activation Data Calculated Using EASY-2007* a été publié. Il résume plus de 20 ans d'études de données sur les réactions nucléaires pertinentes pour les dispositifs de fusion. Des données atomiques et moléculaires essentielles pour le projet ITER sont en train d'être rassemblées dans des bases de données à travers le monde, en particulier en ce qui concerne les processus mettant en jeu les éléments légers dans les zones de l'écorceur du plasma bord. Ces nouvelles bases de données comprennent des données sur les processus d'excitation, d'ionisation, de recombinaison et de collision des particules.

D. Applications des accélérateurs et des réacteurs de recherche

D.1. Accélérateurs

72. Il y a environ 163 accélérateurs électrostatiques de faible énergie installés dans 50 États Membres, neuf sources de neutrons à spallation en exploitation dans cinq États Membres et 50 sources de lumière synchrotron installés dans 20 États Membres. Le nombre d'accélérateurs électrostatiques de faible énergie en exploitation dans le monde est pratiquement constant, les mises à l'arrêt dans les pays développés étant contrebalancées par la mise en service de nouveaux accélérateurs dans les pays en développement pour les services d'analyse nucléaire. Le nombre de sources de spallation et celui de sources de lumière synchrotron augmentent de quelques nouveaux appareils par décennie.

73. Les accélérateurs modernes sont utilisés dans les domaines de la radiophysique médicale, de la radiobiologie, de la physique nucléaire expérimentale, de l'agriculture, des processus de stérilisation, de la recherche sur les matériaux, de l'étude du patrimoine culturel et de la protection de l'environnement. Étant donné les problèmes de ressources humaines existants dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires (voir section A.4.3), les petits accélérateurs sont aussi de plus en plus étudiés dans les programmes de formation universitaire pertinents pour aider les étudiants à acquérir des connaissances générales et spécialisées. Par exemple, le Ghana a mis en place en 2009 un accélérateur pour renforcer davantage la capacité institutionnelle et appuyer la recherche et la formation. Les petits accélérateurs permettent notamment d'acquérir des connaissances et une expérience pratiques, ce qui est généralement impossible avec des accélérateurs plus grands.

74. Les cibles des sources de neutrons de spallation utilisées sur les accélérateurs de forte puissance fournissent des informations utiles sur l'endommagement par irradiation dans les systèmes hybrides, y compris ceux envisagés pour la transmutation des déchets nucléaires et la production d'électricité. On a commencé en 2009 à démanteler la cible de métal liquide de l'expérience Megawatt Pilot Target Experiment (MEGAPIE) de la source suisse de neutrons de spallation (SINQ) qui avait été irradiée à la puissance de 0,8 MW pendant cinq mois en 2006. Les matériaux de structure des cibles sont en train d'être séparés et disséqués en échantillons en vue de tester les propriétés des matériaux irradiés par les partenaires internationaux de MEGAPIE. Les données rassemblées aideront à concevoir les futures cibles à longue période et de haute énergie des systèmes hybrides.

D.2. Réacteurs de recherche

75. Les réacteurs de recherche peuvent avoir des usages multiples : formation dans le domaine des sciences nucléaires, recherche nucléaire, essais de matériaux, production de radio-isotopes pour l'industrie et la médecine, et services commerciaux tels que le dopage au silicium, l'analyse par activation neutronique, l'amélioration des pierres précieuses et les essais non destructifs. En outre, ils peuvent constituer une étape du programme national pour l'introduction de l'électronucléaire. Avec l'intérêt croissant que suscite l'énergie nucléaire, plus de 20 États Membres envisagent de construire de nouveaux réacteurs de recherche. En 2009, l'initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale appuyée par l'Agence a lancé une formation collective avec bourse pour aider les États Membres intéressés à démarrer leur premier projet de réacteur de recherche. Ce cours porte sur la planification, l'évaluation, l'élaboration, la construction, la mise en service, l'utilisation, l'exploitation, et la maintenance des réacteurs de recherche.

76. Il y a plus de 240 réacteurs de recherche en service dans le monde. Aucun réacteur de recherche nouveau n'a été mis en service en 2009. Étant donné que les réacteurs anciens mis à l'arrêt sont remplacés par un nombre plus faible de réacteurs polyvalents, le nombre de réacteurs de recherche en

service devrait diminuer de 100 à 150 d'ici 2020. Il faudra développer la coopération internationale pour permettre un large accès à ces installations ainsi que leur utilisation efficiente. Les réseaux de coopération seront aussi utiles pour moderniser les réacteurs de recherche existants et en installer de nouveaux. La création de ces réseaux (dans les régions de la Méditerranée, d'Europe orientale, des Caraïbes et d'Asie centrale, ainsi que d'un réseau thématique sur l'analyse des contraintes résiduelles et de la texture) a continué de progresser en 2009, mais d'importants efforts s'avèrent encore nécessaires.

77. L'Initiative des États-Unis pour la réduction de la menace mondiale (GTRI) sert de cadre à l'un des principaux programmes de conversion du combustible des réacteurs de recherche et des cibles utilisées dans les installations de production d'isotopes de l'uranium hautement enrichi (UHE) à l'UFE. En 2009, sa portée a été étendue de 129 à 200 réacteurs de recherche. À la fin d'avril 2010, 72 réacteurs de recherche en exploitation dans le monde qui utilisaient du combustible à l'UHE avaient été convertis au combustible à l'UFE ou mis à l'arrêt avant conversion et l'on avait déterminé que 33 autres pourraient être convertis à l'utilisation de combustibles qualifiés à l'UFE existants. Pour la conversion des réacteurs de recherche à hautes performances, il faudra utiliser le nouveau combustible à haute densité en cours de mise au point (voir le paragraphe 79 ci-après). En ce qui concerne la conversion de l'UHE à l'UFE des cibles utilisées dans la production de molybdène 99, l'Afrique du Sud, qui a converti intégralement le réacteur Safari-1 à l'utilisation de combustible à l'UFE en 2009, est devenu le premier producteur à grande échelle de ce radio-isotope à faire état de progrès notables également dans la conversion à l'UFE de cibles utilisées pour la production d'isotopes médicaux.

78. Le programme de renvoi du combustible d'origine russe pour réacteurs de recherche mené dans le cadre de la GTRI a progressé sensiblement en 2009. Environ 270 kg de combustible nucléaire à l'UHE usé et 49 kg de combustible nucléaire à l'UHE neuf ont été réexpédiés de Hongrie, du Kazakhstan, de Libye, de Pologne et de Roumanie en Fédération de Russie. Depuis sa création, le programme a permis de renvoyer en Fédération de Russie quelque 1 350 kg d'UHE contenu dans du combustible nucléaire neuf et usé.

79. Pour la conversion des réacteurs de recherche à haut flux et haute performance, on aura besoin des combustibles avancés à très haute densité basés sur des alliages uranium-molybdène en cours de mise au point. Le comportement et les performances des combustibles à l'uranium-molybdène 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, le Chili, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et la République de Corée. Aux États-Unis, les efforts sont axés sur la mise au point de combustible monolithique à l'uranium-molybdène destiné à être utilisé dans les réacteurs de recherche à haut flux. Des progrès sensibles sont enregistrés à mesure que la technologie mûrit. Une nouvelle initiative européenne concernant la qualification du combustible dispersé à très haute densité faiblement enrichi à l'uranium-molybdène aux fins de la conversion à l'UFE de réacteurs européens à haut flux a été consolidée en 2009.

80. Bien que des avancées notables aient été enregistrées en 2009 dans la mise au point et la qualification du combustible à l'uranium-molybdène, il faut encore progresser et effectuer des essais étendus pour pouvoir mettre sur le marché en temps voulu des combustibles à l'UFE qualifiés de très haute densité.

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

E.1. Amélioration de la productivité et de la santé du bétail¹³

81. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ont déterminé que l'analyse des ressources génétiques animales était une question hautement prioritaire car elle offre des options essentielles pour le développement durable de la production animale et le renforcement de la sécurité alimentaire. Avec l'appui de l'Agence, d'importants progrès ont été réalisés dans l'analyse de la diversité génétique chez les races bovines, ovines et caprines en vue de promouvoir la sélection d'animaux appropriés pour accroître la productivité, dans la mesure où leur aptitude à résister aux maladies endémiques ou aux conditions environnementales difficiles est bien souvent liée à leur patrimoine génétique. Les données et les résultats de ces analyses génétiques sont précieux pour assurer la durabilité des programmes futurs de sélection animale et permettre de sélectionner des animaux porteurs de gènes appropriés. Toutefois, il y a d'importantes lacunes dans la capacité d'utiliser les données génétiques provenant de ces analyses pour les programmes de sélection animale, en particulier dans les pays en développement. Pour remédier à ces problèmes, une interface de système de réseau informatisé a été établie pour mettre les données génétiques à la disposition de tous les États Membres, et fournir un accès aux protocoles de laboratoire, aux procédures normalisées d'opération pour l'analyse génétique, aux outils de recherche génomique, et à une base de données moléculaires sur les animaux d'élevage¹⁴. Des données génétiques et phénotypiques ont été acquises sur plus de 4 000 ovins et caprins de 89 races. Elles seront utilisées pour déterminer les gènes communs susceptibles d'être exploités pour améliorer la production animale.

82. Les sondes de nucléides radiomarqués ont permis de séquencer l'intégralité du génome bovin¹⁵. Ces outils permettent de sélectionner des animaux plus efficaces sur le plan énergétique ayant une empreinte écologique plus faible, et en particulier des animaux qui produisent moins de gaz à effet de serre. Cette découverte pourrait permettre d'accroître l'efficacité de la production de viande et de lait, et fournir de nouvelles informations sur l'évolution des mammifères ainsi que sur les particularités biologiques des bovins. Elle montre aussi la direction à suivre dans la recherche qui pourrait permettre de promouvoir la durabilité de la production alimentaire dans un monde confronté au problème de la croissance démographique.

83. Le diagnostic précoce et rapide des maladies vétérinaires grâce à l'utilisation combinée des techniques nucléaires et de la biotechnologie moderne est essentiel dans les efforts visant à limiter l'impact de ces maladies sur les populations animales et humaines et à améliorer la sécurité alimentaire. Les technologies nucléaires, qui sont très sensibles et très spécifiques, peuvent être combinées avec la technologie moderne pour détecter spécifiquement les pathogènes des maladies animales avant qu'ils ne provoquent ces maladies, déterminer l'empreinte génétique d'un animal et caractériser les micro-organismes qui affectent la santé animale et humaine. Par exemple, les

¹³ De plus amples détails sont donnés dans les sections pertinentes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) ou à l'adresse : <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>).

¹⁴ Élaboration d'une base de données en temps réel pour les loci de caractères quantitatifs/les gènes/les séquences d'ADN et la caractérisation génétiques chez les petits ruminants : (http://www.intl-pag.org/16/abstracts/PAG16_P08a_852.html).

¹⁵ The Bovine Genome Sequencing and Analysis Consortium, Christine G. Elsik, Ross L. Tellam, and Kim C. Worley. The Genome Sequence of Taurine Cattle: A Window to Ruminant Biology and Evolution Science 24 April 2009 324: 522-528.

technologies nucléaires moléculaires permettent de confirmer les diagnostics de la grippe aviaire et de la grippe porcine en une journée, alors que le diagnostic classique de ces deux maladies peut prendre jusqu'à une semaine.



FIG. E-1. Chèvres locales de Myanmar résistantes aux maladies parasitaires et bien adaptées à l'environnement local utilisées dans un exercice de cartographie génétique basées sur les technologies nucléaires.

E.2. Lutte contre les insectes nuisibles

84. L'utilisation des techniques nucléaires dans la lutte contre les insectes nuisibles ne se limite pas au recours à l'irradiation gamma pour stériliser les insectes dans le cadre de l'application de la technique de l'insecte stérile (TIS) à l'échelle d'une zone et des méthodes de lutte génétique connexes, mais comprend aussi des études isotopiques de la biologie, du comportement, de la biochimie, de l'écologie et de la physiologie des insectes. L'Agence a aussi participé à des travaux de recherche entomologique basés sur l'utilisation des radionucléides dans la lutte contre les insectes nuisibles. Son manuel de formation *Laboratory Training Manual on the Use of Nuclear Techniques in Insect Research and Control*, qui a été réédité et publié en 1992, est une contribution majeure dans ce domaine. L'environnement scientifique et social mondial a beaucoup changé depuis le milieu des années 90. Du point de vue environnemental, il n'est plus acceptable de rejeter des radionucléides avec des insectes dans la nature. En outre, l'utilisation des radionucléides en laboratoire revient de plus en plus cher en raison des considérations de sûreté.

85. Les techniques d'isotopes stables sont utilisées en remplacement de nombreuses méthodes basées sur les radionucléides. Ces isotopes, qui ne sont pas radioactifs, sont naturellement omniprésents dans l'environnement, et leur manipulation ne présente aucun risque sanitaire pour le personnel. Étant donné qu'il y a peu de considérations de sûreté à prendre en compte, on n'a pas besoin de règles spéciales pour les bâtiments et le matériel. Tout cela contribue à réduire les coûts, facilite leur utilisation, et permet de lâcher en toute sûreté les insectes marqués avec ces isotopes dans l'environnement.

86. En 2009, l'Agence et la FAO ont publié le manuel *Manual for the Use of Stable Isotopes in Entomology*, qui présente les principes et les techniques de base de la science des isotopes stables et examine l'utilisation de ces isotopes dans la recherche entomologique. Les progrès réalisés en

spectrométrie de masse à rapport isotopique dans les domaines de la détection, de la précision et de l'automatisation ont largement contribué à multiplier les possibilités expérimentales au cours des 25 dernières années. Les processus naturels de la biosphère se traduisent par des signaux isotopiques distinctifs et les isotopes stables peuvent donc être extrêmement utiles en recherche entomologique pour répondre non seulement à de nombreuses questions d'ordre biologique et écologique concernant par exemple le traçage des mouvements des insectes, les modes d'alimentation dans la chaîne alimentaire, et le transfert d'éléments nutritifs et de sperme, mais aussi à des questions spécifiques ayant trait à l'utilisation des ressources.

87. D'un autre côté, l'un des principaux inconvénients de l'utilisation des isotopes stables est le coût d'investissement des spectromètres de masse à rapport isotopique. En outre, le matériel a besoin d'un environnement à température contrôlée et il faut un personnel qualifié pour la maintenance et l'entretien des instruments sensibles. On pourrait surmonter ces obstacles en sous-traitant les analyses isotopiques à un laboratoire d'analyses commerciales. De nombreux laboratoires offrent aujourd'hui des services d'analyse isotopique payés à l'échantillon, et l'expédition d'échantillons d'isotopes à travers le monde est une opération simple, sûre et peu coûteuse.

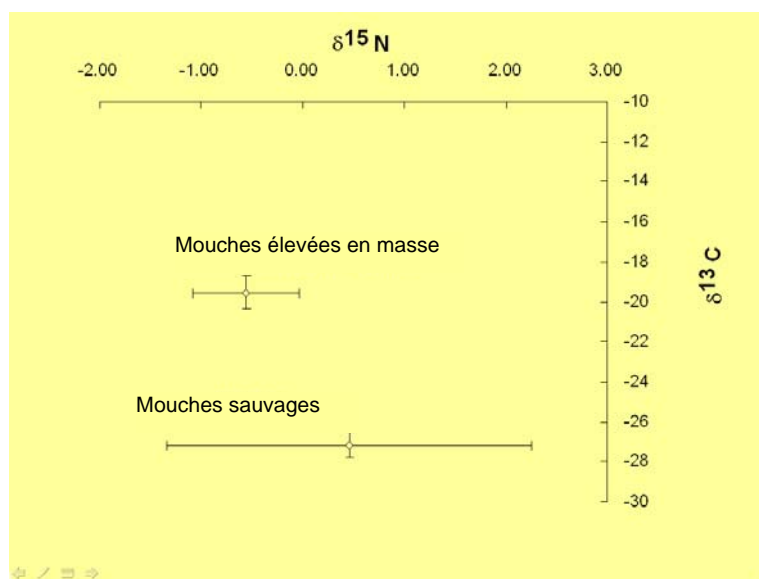


FIG. E-2. La signature des isotopes stables peut être utilisée pour distinguer les mouches élevées en laboratoire des mouches sauvages aux fins du contrôle des populations d'insectes dans le cadre de la mise en œuvre de programmes d'application de la technique de l'insecte stérile. Cette figure montre les signatures isotopiques moyennes de mouches *Ceratitis capitata* mâles sauvages ou provenant d'une installation d'élevage en masse ; les barres représentent l'écart type (+/-) par rapport aux valeurs moyennes.

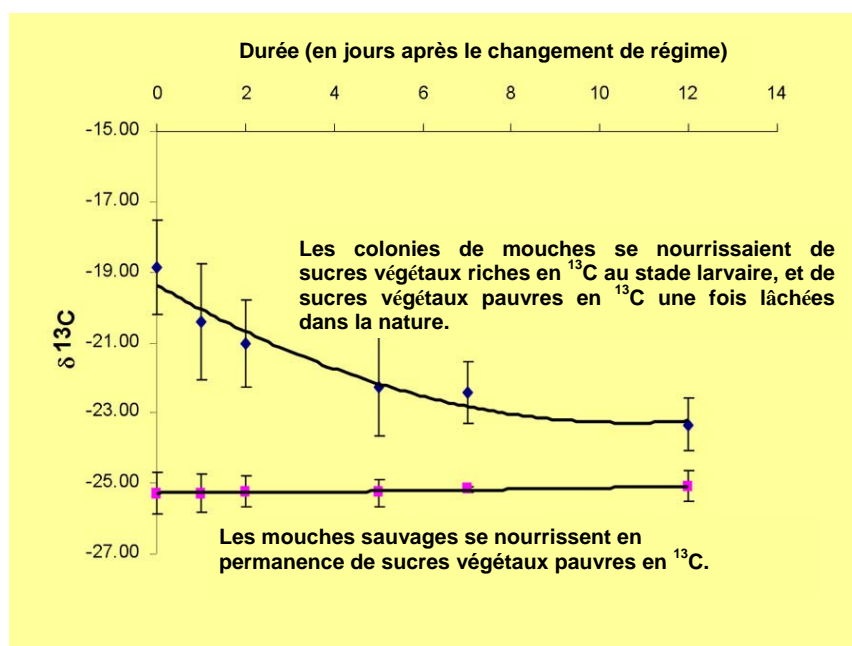


FIG. E-3. La signature isotopique des mouches élevées en masse persiste tout au long de leur vie, même lorsqu'elles sont lâchées le jour 0 où elles passent de l'alimentation larvaire riche en carbone 13 à l'alimentation adulte pauvre en carbone 13 en simulation de la pratique de la technique de l'insecte stérile. On peut distinguer les mouches stériles des mouches sauvages avec un taux de certitude supérieur à 99 %.

E.3. Qualité et sécurité sanitaire des aliments

88. L'irradiation des produits alimentaires est une technique efficace de lutte contre les micro-organismes, y compris ceux qui sont responsables d'une série de maladies transmises par les aliments. Les flambées de ces maladies ont été associées à tous les types d'aliments et les pathogènes peuvent infecter ceux-ci à partir de différentes sources de contamination provenant de la manipulation, du traitement et de la préparation des aliments.

89. Étant donné que le chauffage prolongé n'est pas un traitement approprié pour toutes les denrées alimentaires, l'irradiation est une option possible de transformation et de traitement. L'un de ses principaux avantages est qu'elle détruit les micro-organismes sans augmenter sensiblement la température. Elle peut être appliquée aux légumes frais, aux fruits et aux aliments congelés sans changer leur goût ou leur texture de manière notable. Elle peut en outre être utilisée pour traiter les aliments préparés traditionnellement et emballés, prêts à la distribution. Un autre avantage de l'irradiation est qu'elle détruit les organismes responsables de l'altération, et permet de conserver frais les viandes, les volailles, les poissons et les fruits de mer plus longtemps.

90. La plupart des travaux de recherche-développement effectués jusqu'ici sur l'irradiation des aliments étaient centrés sur le traitement de produits simples pour la consommation du grand public. Toutefois, l'évolution récente indique qu'on pourrait avoir besoin d'irradier les aliments afin d'obtenir des niveaux exceptionnels de sûreté microbiologique pour des groupes particuliers de consommateurs très sensibles aux micro-organismes des aliments, et qui ont besoin d'un approvisionnement sécurisé en denrées alimentaires sûres et saines. Par exemple, ceux dont le système immunitaire est déficient sont particulièrement sensibles aux bactéries transmises par les aliments et qui limitent souvent la gamme de produits alimentaires qu'ils peuvent consommer. Pour satisfaire aux rigoureuses prescriptions de la communauté médicale, des travaux de recherche-développement pourraient être effectués sur l'irradiation pour mettre au point une gamme d'aliments irradiés destinés à des régimes spéciaux.



FIG. E-4. L'Office de contrôle des médicaments et des produits alimentaires des États-Unis d'Amérique a approuvé récemment l'irradiation des épinards suite à des flambées de bactéries.

91. Les prochaines étapes de l'application de l'irradiation des aliments consistent à élaborer et à améliorer les techniques d'irradiation conjointement avec d'autres techniques de traitement des aliments appropriées pour un large éventail de denrées alimentaires. En particulier, ces aliments doivent pouvoir être consommés par des groupes cibles spécifiques qui ont besoin de niveaux d'hygiène exceptionnels. On continuera d'utiliser l'irradiation, seule ou en combinaison avec d'autres technologies alimentaires, pour élaborer des aliments sûrs pour les essais nutritionnels, microbiologiques et d'acceptabilité, et contribuer ainsi à améliorer la santé humaine.

E.4. Amélioration des cultures

92. Le recours aux mutations induites pour l'amélioration des cultures et la promotion de la recherche fondamentale suscite un intérêt croissant. Deux techniques innovantes en cours de développement sont l'implantation de faisceaux d'ions, qui permettent la désintégration de l'isotope à l'intérieur de la cellule, et la sélection spatiale (l'espace étant la zone située au-delà de l'atmosphère terrestre), dans laquelle des rayons cosmiques traversent la cellule. Ces techniques complètent d'autres méthodes utilisées en sélection des plantes par mutagenèse. Le nombre de variétés de mutants officiellement mises en circulation dans le monde pour la production commerciale et qui proviennent de 170 espèces végétales différentes, augmente régulièrement et est proche de 3 100¹⁶. En attendant, de nouvelles installations de traitement par mutagenèse telles que des implanteurs de faisceaux d'ions, des phytotrons et des serres à rayons gamma sont en train d'être construits et d'être utilisés pour la sélection par mutagenèse dans certains pays d'Asie.

93. Parallèlement, de nouvelles frontières sont franchies dans la mise au point de technologies novatrices pour découvrir rapidement à grande échelle différents types de mutations induites. Au

¹⁶ Voir la base de données sur les variétés de mutants à l'adresse <http://mvgs.iaea.org/>

niveau moléculaire, la tendance est à l'élaboration d'ensembles technologiques combinant la biotechnologie moderne comme les technologies de criblage à fort débit et les méthodes de séquençage de la prochaine génération avec les mutations induites. Les techniques de criblage phénotypique systématique à fort débit basées sur les outils automatisés d'analyse de l'imagerie et les robots, comme celles utilisées actuellement au High Resolution Plant Phenomics Centre en Australie, peuvent permettre de traiter de très grandes collections de mutants (c'est-à-dire 10 000-100 000 plantes dont le phénotype est entièrement connu) et de combler ce qu'il est convenu d'appeler l'« écart phénotype/génotype ». Ce type de criblage est extrêmement important car il permet au sélectionneur de déterminer efficacement les lignées mutantes possédant les caractéristiques nécessaires pour produire plus, même dans des conditions difficiles. Il est essentiel de trouver un moyen de combler le fossé entre les ressources de plantes mutantes disponibles et l'ensemble des phénotypes de plantes pour pouvoir exploiter pleinement les potentialités de la biodiversité végétale, y compris les grandes cultures à l'étude. Accroître l'efficacité grâce à la sélection par mutagenèse peut aider à améliorer à la fois la qualité et la disponibilité des variétés de cultures, et ainsi augmenter les disponibilités alimentaires pour permettre la réduction si nécessaire des prix des aliments. Il est aujourd'hui possible de séquencer un génome à un coût économique abordable pour des pays à faible revenu.

E.5. Gestion durable des sols et de l'eau

E.5.1. Recours aux méthodes isotopiques pour améliorer la gestion de l'eau en agriculture

94. La quantité d'eau du sol disponible pour la croissance des plantes dépend de l'étendue des pertes d'eau du sol nu (c'est-à-dire l'évaporation) et de la transpiration des feuilles des plantes. Pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation, il importe de quantifier ces deux composantes des pertes d'eau. Toutefois, l'évaporation et la transpiration sont difficiles à mesurer avec précision à l'échelle d'un champ, en raison des interactions complexes avec d'autres facteurs comme l'intensité de la pluviosité, l'état de l'eau du sol, la profondeur du système racinaire des plantes et la couverture du sol. Les isotopes stables de l'eau (oxygène 18 et hydrogène 2) peuvent être utilisés efficacement pour démêler ces interactions car ce sont des traceurs naturels du mouvement de l'eau dans le continuum sol-végétation-atmosphère. L'évaporation augmente les niveaux de ces deux isotopes dans l'eau du sol. En revanche, la transpiration des plantes ne modifie pas sa composition isotopique. Des travaux de recherche récents basés sur des techniques isotopiques ont permis de quantifier avec succès l'évaporation et la transpiration dans des pâturages semi-arides, des forêts de conifères et des systèmes cultureux. Les données recueillies serviront à mettre au point des ensembles technologiques et des modèles pour améliorer la gestion du sol et de l'eau dans différents environnements.



FIG. E-4. Mesure de l'évaporation de l'eau du sol et de la transpiration des plantes dans un champ de maïs à l'aide de techniques traditionnelles et isotopiques. (Avec l'aimable autorisation du professeur Xurong Mei).

E.5.2. Fixation de carbone organique du sol et atténuation des changements climatiques

95. La fixation de carbone organique dans le sol peut atténuer l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère et atténuer les changements climatiques. Les plantes utilisent le CO₂ pour croître à travers la photosynthèse. Lorsqu'elles meurent et se décomposent, une partie de leur carbone est fixée dans le sol sous forme de carbone organique. Des progrès notables ont certes été accomplis dans l'évaluation de ce carbone, mais les mécanismes de contrôle et de régulation de son flux dans le sol sont encore mal connus. En particulier, le lien entre la fixation du carbone organique du sol et la disponibilité de l'azote et du phosphore du sol n'est pas encore bien déterminé. Des travaux effectués sur l'utilisation d'isotopes radioactifs (carbone 14) et stable (carbone 13) du carbone, et le fractionnement du carbone du sol et les mésocosmes (monolithes) ont montré que la disponibilité du phosphore et de l'azote jouait un rôle crucial dans la détermination de la capacité de fixation de carbone organique du sol et son fractionnement dans différents compartiments du sol ayant différentes potentialités de piégeage. Pour améliorer les modèles de fixation du carbone organique dans le sol, un phénomène si nécessaire comme facteur d'atténuation des changements climatiques, il faut évaluer la fixation de ce carbone en réponse aux variations des niveaux d'azote et de phosphore dans les écosystèmes où la remise en état des terres revêt une importance croissante pour une production alimentaire durable. Ces informations sont extrêmement importantes pour que l'agriculture soit prise en compte dans les mécanismes futurs d'échange des droits d'émission de carbone et pour réduire les émissions de carbone^{17,18}.

¹⁷ Voir aussi Trumbore, S. 2009. *Radiocarbon and soil carbon dynamics*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 37: pp. 47–66.

¹⁸ Bradford, M., Fierer, N., Jackson, R., Maddox, T., Reynolds, J., 2008. *Nonlinear root-derived carbon sequestration across a gradient of nitrogen and phosphorous deposition in experimental mesocosms*. Global Change Biology, 14, pp. 1113–1124.

F. Santé humaine

F.1. Recours aux techniques nucléaires dans la lutte contre la malnutrition

96. Une bonne partie de la population mondiale, en particulier les nourrissons, les enfants et les femmes en âge de procréer, souffre de carences en micronutriments, la « faim insoupçonnée » dans les pays en développement. Les carences en vitamines A, en zinc et en fer constituent de sérieux problèmes de santé publique dans la mesure où elles concourent non seulement à réduire les performances de croissance et à entraver le développement cognitif au début de la vie, mais aussi à dégrader la santé chez les enfants.

97. Il faut élaborer d'urgence des stratégies efficaces et durables basées sur l'alimentation pour lutter contre les carences en micronutriments. Ces stratégies comprennent des interventions classiques comme l'enrichissement des aliments et les changements de régime, mais aussi des approches plus innovantes telles que l'amélioration des qualités nutritionnelles des aliments de base ou « bio-enrichissement ». Les techniques nucléaires, qui font partie intégrante des interventions nutritionnelles élaborées et évaluées pour lutter contre les carences en micronutriments, servent à estimer la biodisponibilité de ces nutriments.

98. Les récents résultats de l'application de techniques d'isotopes stables pour évaluer la biodisponibilité du fer et des caroténoïdes de la provitamine A dans des groupes de population vulnérables aideront les décideurs, les professionnels de la santé et d'autres parties prenantes, y compris l'industrie alimentaire et les phytogénéticiens, à déterminer la voie à suivre. Par exemple, l'impact global de l'utilisation des stratégies d'enrichissement des aliments pour lutter contre les carences en fer dépendra de la biodisponibilité des composés du fer ainsi que de la présence de substances qui inhibent ou bloquent l'absorption du fer présent dans l'aliment, comme souligné dans les récentes orientations élaborées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la FAO¹⁹.



FIG. F-1. Les nourrissons, les enfants et les femmes en âge de procréer constituent les groupes les plus vulnérables menacés par la « faim insoupçonnée » dans les pays en développement. (Avec l'aimable autorisation de Stephanie Good, Éthiopie).

99. L'utilisation des techniques d'isotopes stables pour estimer les quantités totales de vitamine A permet actuellement de recueillir de nouvelles informations sur la valeur biologique de la patate douce

¹⁹ World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Guidelines on food fortification with micronutrients*. Allen L, De Benoist B, Dary O, Hurrell RF, eds. <http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/9241594012/en/index.html>.

à chair orangée, qui est riche en caroténoïdes de la provitamine A²⁰. L'Agence collabore étroitement avec des partenaires internationaux tels que HarvestPlus dans ce domaine ainsi que sur l'évaluation d'aliments de base bio-enrichis tels que le blé à forte teneur en zinc²¹.

100. L'importance de ces efforts est soulignée dans le récent rapport de 2008 du consensus de Copenhague.²² Un comité de huit des plus grands économistes du monde a classé les solutions proposées aux défis mondiaux sur la base des coûts et des avantages économiques. Les solutions axées sur la lutte contre les carences en micronutriments – c'est-à-dire la supplémentation, l'enrichissement et le bio-enrichissement des aliments – sont arrivées en première, troisième et cinquième positions sur 30 solutions proposées pour combattre les dix différents problèmes déterminés par les nutritionnistes.

F.2. L'imagerie hybride SPECT/TDM et PET/TDM²³

101. L'imagerie diagnostique est l'un des domaines les plus innovants de la médecine moderne. Elle peut se diviser en deux grandes catégories : les modalités qui définissent très précisément les détails anatomiques, et celles qui produisent des images fonctionnelles ou moléculaires. Comme exemples de la première catégorie, on peut citer notamment la tomодensitométrie (TDM) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM), qui permettent de déterminer les changements de structure au millimètre près. La tomographie à émission de positons (TEP) et la tomographie informatisée d'émission monophotonique (SPECT), qui permettent de traquer les maladies jusqu'au niveau moléculaire sont des exemples de la seconde catégorie.

102. Au cours de la décennie écoulée, la technologie a permis de fusionner les modalités anatomiques et fonctionnelles en systèmes d'imagerie hybrides comme la SPECT/TDM et la TEP/TDM. Ceux-ci permettent de mener des recherches combinées à la fois sur l'anatomie et la fonction des organes humains. Leurs avantages cliniques sont nombreux et comprennent l'amélioration de la détermination et de la localisation des lésions, ainsi que de la caractérisation des changements structuraux et métaboliques des lésions déterminées. Cela permet de détecter les maladies à un stade précoce avec une plus grande précision, et donc de les traiter plus tôt avec de meilleures chances de guérison complète et rapide. L'imagerie hybride a été appliquée avec succès en cardiologie et dans la lutte contre le cancer. La TEP/TDM est utilisée pour évaluer la réduction du flux sanguin dans le blocage de l'artère coronarienne, qui peut entraîner la nécrose des tissus. En oncologie, l'imagerie hybride permet de détecter les cancers à un stade précoce, en montrant les changements survenus au niveau cellulaire bien avant l'apparition des changements anatomiques. En chirurgie orthopédique, la SPECT/TDM et la TEP/TDM constituent les meilleures modalités d'investigation en cas de douleurs lombaires et peuvent être aussi utilisées dans les traitements post-chirurgicaux et post-traumatiques. D'autres domaines d'application de l'imagerie hybride comprennent l'évaluation des maladies bénignes du cerveau, de la thyroïde, de la parathyroïde et d'autres organes du corps humain.

²⁰ Voir <http://www.harvestplus.org/content/biofortified-foods-offer-protection-vitamin-deficiency>

²¹ Voir <http://www.harvestplus.org/content/study-shows-women-absorb-more-zinc-biofortified-wheat>

²² Voir <http://www.copenhagenconsensus.com/The%2010%20challenges-1.aspx>

²³ De plus amples détails sont donnés dans les sections pertinentes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) ou à l'adresse : <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>).

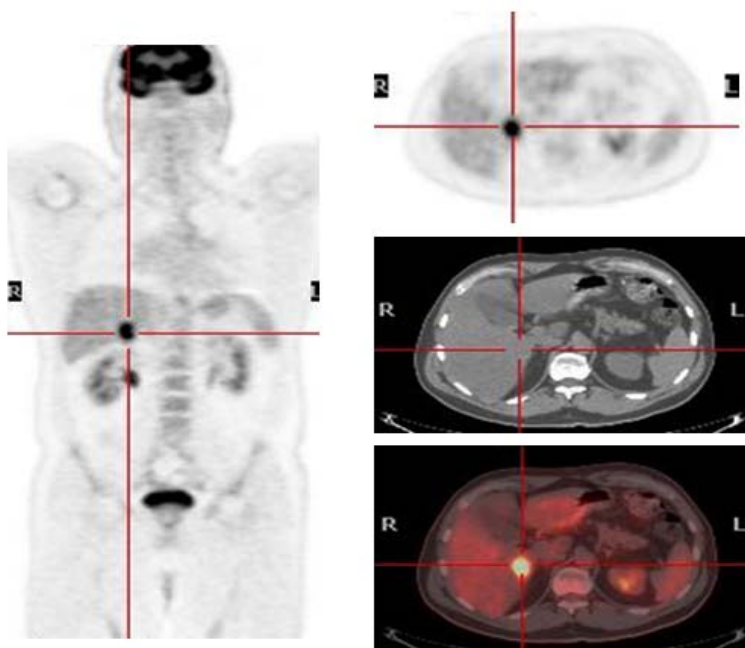


FIG. F-2. Des images comme celles présentées ici d'organes internes d'un homme de 50 ans qui a souffert d'un cancer du colon traité par voie chirurgicale, sont essentielles pour suivre l'évolution de la maladie. Les zones plus claires montrent une augmentation des marqueurs tumoraux due à une possible reprise de la tumeur. La TEP/TDM montre une seule métastase au niveau du foie sans autre lésion, ce qui indique qu'elle pourrait être enlevée sans autre intervention chirurgicale (avec l'aimable autorisation de S. Fanti).

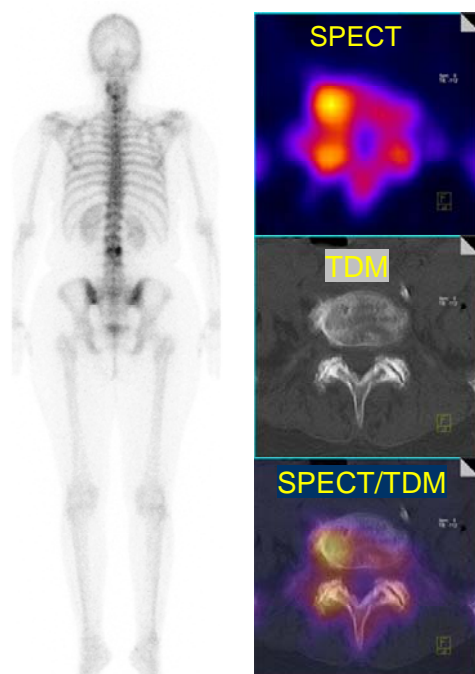


FIG. F-3. Une étude SPECT montre une augmentation du métabolisme osseux dans les régions lombaires et cervicales de cette femme de 65 ans qui a souffert de mélanome dans le passé. Les images hybrides SPECT/TDM montrent de très importants changements de l'anatomie des os associés à des processus de dégénérescence. On peut écarter l'hypothèse de métastases des os.

F.3. Progrès dans les applications en radio-oncologie

103. L'année 2009 a été marquée par plusieurs développements technologiques dans le domaine de la radio-oncologie. Ceux-ci ont été mis en relief en avril 2009 à la Conférence internationale sur les progrès en radio-oncologie²⁴.

104. La première question importante concerne les efforts visant à estimer la valeur comparative des unités au cobalt et des accélérateurs linéaires, qui revêt une importance particulière pour les pays à revenu faible ou intermédiaire. Au cours de cette conférence, et par la suite dans le cadre d'une évaluation comparative des technologies nucléaires dans le domaine de la santé humaine effectuée par l'Agence, les experts ont convenu que le choix entre ces deux modalités de traitement dépendait de plusieurs facteurs, y compris l'existence de plans nationaux de lutte contre le cancer, d'une masse critique de personnel scientifique et médical qualifié, et de l'infrastructure adéquate.

105. Deuxièmement, les questions liées à l'incertitude et à la précision en radio-oncologie deviennent de plus en plus importantes dans le monde à mesure que les techniques de traitement deviennent plus sophistiquées, avec l'utilisation de doses plus élevées pour améliorer les taux de guérison du cancer. Il est de plus en plus admis qu'il faut des activités d'assurance de la qualité et une documentation précise à chaque stade du processus de gestion de la maladie. L'élaboration de directives et de protocoles cliniques basés sur l'expérience est en train d'être encouragé.

106. Les nouvelles technologies, telles que la radiothérapie à intensité modulée (IMRT), la radiothérapie assistée par l'image (IGRT) et l'utilisation de protons et de particules chargées sont examinées plus minutieusement pour que la pratique clinique puisse reposer sur des preuves scientifiques solides. Cela est important, non seulement pour les pays à revenu faible ou intermédiaire, mais aussi pour les pays à haut revenu, dans la mesure où les ressources sont limitées et que les mesures des avantages par rapport aux coûts sont de plus en plus utiles.

107. Il y a aussi un regain d'intérêt pour l'utilisation de « plans de traitement par hypofractionnement » en raison des efforts de réduction des coûts et de la plus grande précision de la fourniture de doses de rayonnements avec du matériel techniquement avancé.

F.4. Impact de la technologie numérique sur l'imagerie radiologique X

108. Les progrès de la technologie numérique ont facilité une hausse de l'application de la tomodensitométrie (TDM). L'utilisation de la TDM multicoupe rapide sur de grandes régions a permis par exemple d'étendre la tomodensitométrie à un large éventail d'applications, de la cardiologie aux investigations pédiatriques. Cette technologie nouvelle s'accompagne de l'augmentation des doses de rayonnements et remet en question nos pratiques établies de détermination des doses. Le diagnostic radiologique est un domaine de la médecine crucial pour des soins de santé efficaces. En moyenne, une personne sur deux dans le monde fait un examen radiologique chaque année. La figure F-4 montre que le nombre d'examens radiologiques X a plus que doublé au cours des 20 dernières années [d'après le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR)]. La répartition géographique des services est très inégale : moins de 2 % des examens effectués dans le monde sont conduits dans les pays à faible revenu. Un autre caractère distinctif de la radiologie aujourd'hui est le rythme des changements technologiques, caractérisés par le passage brutal des images analogiques telles que les films, aux images numériques.

²⁴ Pour de plus amples informations, voir :
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=35265>

109. Pour les pays à faible revenu, la technologie numérique s'accompagne d'opportunités inespérées, mais aussi de défis. Malheureusement, nombreux sont les pays en développement où les images diagnostiques sont encore presque entièrement produites par le développement manuel de films. Cette méthode pose de multiples problèmes techniques, et les images sont souvent de qualité médiocre. Elle est en outre peu respectueuse de l'environnement. Un aspect particulièrement critique est qu'elle peut réduire l'efficacité des services, lorsque le matériel radiologique et le personnel qualifié sont insuffisants. Les images médicales numériques peuvent être envoyées électroniquement dans des endroits éloignés, ce qui permet à ceux-ci ou aux services ayant des ressources limitées d'avoir accès à des centres d'excellence pour des diagnostics spécialisés, et contribue à dispenser des formations spécialisées. Avec le développement de cette technologie et la réduction des coûts, l'imagerie numérique sera de plus en plus viable financièrement dans les pays en développement. La poursuite des améliorations de cette technologie offrira une alternative au traitement manuel des images de films, et permettra une utilisation plus efficace et plus large des services radiologiques.

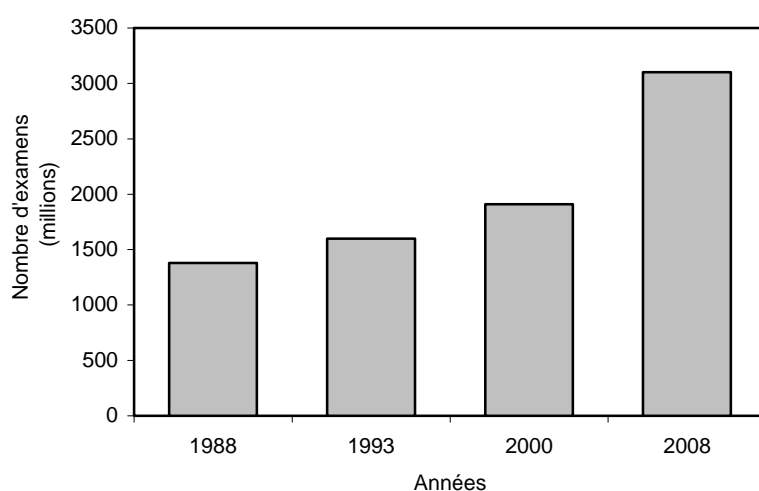


FIG. F-4. Évolution des examens radiologiques X dans le monde (chiffres officiels de l'UNSCEAR, 2008).

G. Environnement

G.1. Recours aux techniques nucléaires pour quantifier les écoulements sous-marins d'eaux souterraines²⁵

110. L'eau des fleuves et des aquifères coule du continent vers la mer. Lorsque les aquifères rencontrent la ligne de côte, ils déversent de l'eau douce dans l'océan. Les estimations de ces écoulements sous-marins souterrains dans les eaux côtières varient de 6 % à 100 % d'eau douce, essentiellement en fonction de la variabilité régionale et temporelle des débits. Plus récemment, ces

²⁵ De plus amples détails sont donnés dans les sections pertinentes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) ou à l'adresse : <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>).

écoulements ont suscité beaucoup d'intérêt en ce qui concerne la gestion côtière compte tenu de leur potentialité comme source d'eau douce dans les régions confrontées à des pénuries. En outre, si ce sont des écoulements d'eaux saumâtres, celles-ci pourraient être utilisées dans des usines de dessalement. D'un autre côté, ces eaux peuvent contenir des niveaux élevés de polluants (nutriments, métaux, pesticides), et donc contaminer les écosystèmes côtiers. Cela peut entraîner la prolifération d'algues nuisibles et la contamination des régions côtières. Enfin, comme outil de gestion, la connaissance du volume des écoulements sous-marins d'eaux souterraines aide à prévenir la surexploitation des aquifères côtiers et l'intrusion d'eaux salées.

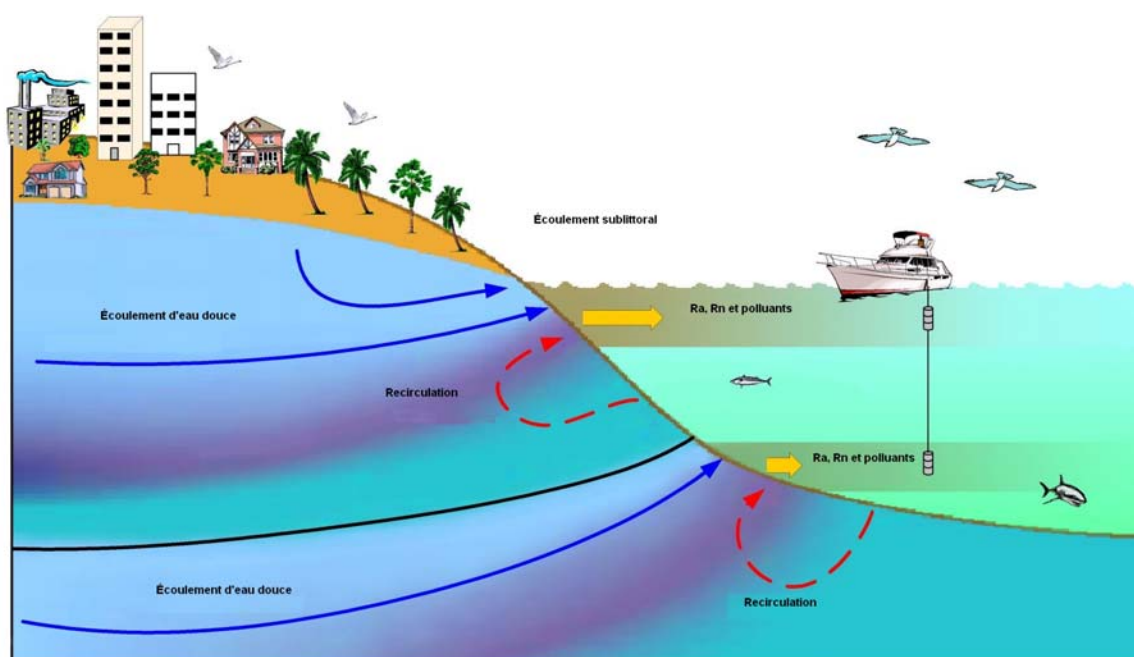


FIG. G-1. Schéma du concept de l'écoulement des eaux souterraines sous-marines. Le gradient hydraulique entraîne le déversement d'eau douce dans la mer. La recirculation de l'eau de mer due, par exemple aux marées, y contribue.

111. Des techniques de mesures du radium et du radon ont été élaborées pour détecter et quantifier les écoulements sous-marins d'eaux souterraines dans les régions côtières²⁶ ; le taux de ces deux radionucléides est plus élevé dans ces eaux que dans l'eau de mer. On peut détecter les sources de ces écoulements en mesurant la distribution spatiale du radium et du radon dans les eaux côtières. Les changements temporels de leurs concentrations – essentiellement en raison du mélange entre ces eaux et l'eau de mer dû aux marées – permettent de déterminer le volume des écoulements. En outre, la détermination des quatre isotopes du radium (radium 223, radium 224, radium 226 et radium 228) permet de comprendre la dispersion et les caractéristiques temporelles des écoulements souterrains sous-marins dans les eaux côtières. Étant donné que le radon et le radium peuvent facilement servir de traceurs de ces écoulements, on devrait les utiliser plus dans les zones côtières où l'environnement est menacé.

²⁶ Voir aussi *Nuclear and Isotopic Techniques for the Characterization of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Zones* (IAEA-TECDOC-1595, 2008).

G.2. Compréhension du cycle de carbone : application des techniques nucléaires pour évaluer les flux de particules de la surface au fond des océans

112. La compréhension des mécanismes qui contrôlent et augmentent le flux de matières de la surface au fond ou dans les profondeurs de l'océan est une question fondamentale en suspens en biochimie marine. L'océan est un important puits de carbone et le piégeage de quantités croissantes de CO₂ entraîne son acidification. Le « fonçage des particules » est le mécanisme ultime d'élimination du carbone et d'autres éléments ainsi que des contaminants de la couche supérieure de l'océan. Ce processus concerne aussi le carbone atmosphérique, converti du CO₂ en biomasse et fixé dans les eaux profondes par le biais du fonçage des particules, des contaminants et des éléments radioactifs. L'analyse des particules en suspension provenant de diverses profondeurs des océans permet d'évaluer divers facteurs qui contrôlent le transfert du carbone de la surface vers les grands fonds océaniques.

113. Le fonçage des particules est la principale voie de transfert du carbone de la surface vers les fonds océaniques. Lorsque ces particules se déposent au fond des océans, le carbone organique qu'elles contiennent se reminéralise en carbone inorganique, qui est rejeté et redistribué plus facilement dans les eaux océaniques à diverses profondeurs. L'étendue de cette redistribution détermine la quantité de CO₂ que l'océan peut capter dans l'atmosphère. Ces dernières années, le thorium 234, un radionucléide naturel, est de plus en plus utilisé pour quantifier les flux de particules et le transfert de carbone de la couche supérieure de l'océan tant en haute mer que dans les zones côtières. C'est un isotope réactif produit par décroissance de son parent l'uranium 238 qui est dissout dans l'eau de mer. Le déséquilibre entre celui-ci et l'activité totale mesurée du thorium 234 reflète le taux net du transfert de particules de la surface de l'océan sur plusieurs jours à plusieurs semaines.

114. Cette technique a été appliquée récemment dans le cadre d'un projet international conduit sur les côtes de la mer Arctique pour évaluer l'impact de la fonte des pergélisols due au réchauffement climatique, et de l'augmentation consécutive du flux de matières organiques à travers les fleuves, des côtes vers le large.



FIG. G-2. Mise en place in situ d'une pompe à grand volume en vue de collecter des particules de matières utilisées pour mesurer les radionucléides dans les eaux arctiques.

H. Ressources en eau

115. Le troisième Rapport sur la mise en valeur des ressources en eau de la planète des Nations Unies²⁷ et le cinquième Forum mondial de l'eau, qui a eu lieu à Istanbul en 2009, ont souligné les domaines cruciaux en ce qui concerne l'eau dans un monde en évolution. Avec les menaces qui pèsent sur les ressources en eau, facteur critique de la société humaine et de la durabilité des écosystèmes, menaces dues aux changements climatiques, à l'augmentation des coûts des produits alimentaires et de l'énergie, et à la crise économique mondiale, la recherche de solutions aux problèmes de l'eau n'en est que plus urgente.

116. Le renforcement de la coopération entre les organismes compétents à travers le monde revêt donc une importance primordiale pour l'étude des liens entre l'eau et les autres facteurs. L'Agence analyse ces liens dans le cadre de son programme sur les ressources en eau. L'hydrologie isotopique fournit des outils uniques pour étudier les problèmes complexes de l'eau, et aide les responsables et les décideurs à comprendre le lien étroit entre la production d'énergie et la production d'aliments d'une part, et l'utilisation des ressources en eau de l'autre. L'alimentation et l'énergie ont toutes deux un impact majeur sur la durabilité des ressources en eau, et la disponibilité de l'eau aura un impact majeur sur la satisfaction des demandes croissantes de produits alimentaires et d'énergie. Une multitude de facteurs influencent les ressources en eau – ou le manque d'eau – et réciproquement, et les liens entre l'eau et les facteurs politiques, économiques, sociaux et environnementaux et les diverses sources de

²⁷ *Troisième Rapport sur la mise en valeur des ressources en eau de la planète* (UNESCO, 2009)
<http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/index.shtml>

pression représentées dans la figure H-1 montrent la nécessité d'une gestion et d'une planification intégrées des ressources en eau.

117. Trop souvent, une mauvaise connaissance des systèmes hydrologiques et du cycle de l'eau aux niveaux local et national empêche une gestion efficace et durable de l'eau. Les techniques nucléaires, en l'occurrence l'hydrologie isotopique, aident à combler cette lacune, et pourraient permettre d'obtenir des informations clés beaucoup plus rapidement que les méthodes classiques de surveillance hydrologique.

118. Les techniques isotopiques d'évaluation des ressources en eau deviennent de plus en plus accessibles en raison de l'utilisation accrue d'analyseurs de spectrométrie laser mis au point récemment pour mesurer les isotopes de l'eau. L'AIEA a joué un rôle essentiel dans l'évaluation de la performance de cette technologie et aide actuellement les États Membres à se procurer ces analyseurs et à former leurs techniciens. Ces instruments sont moins chers et plus faciles à utiliser que les spectromètres de masse à rapport isotopique communément utilisés depuis les années 40. Grâce à cette technologie, un nombre accru d'experts dans le domaine des ressources en eau et de groupes intéressés peuvent avoir accès aux outils isotopiques pour l'évaluation de ces ressources. L'utilisation de cette technologie laser devrait connaître une croissance exponentielle au cours de la prochaine décennie.

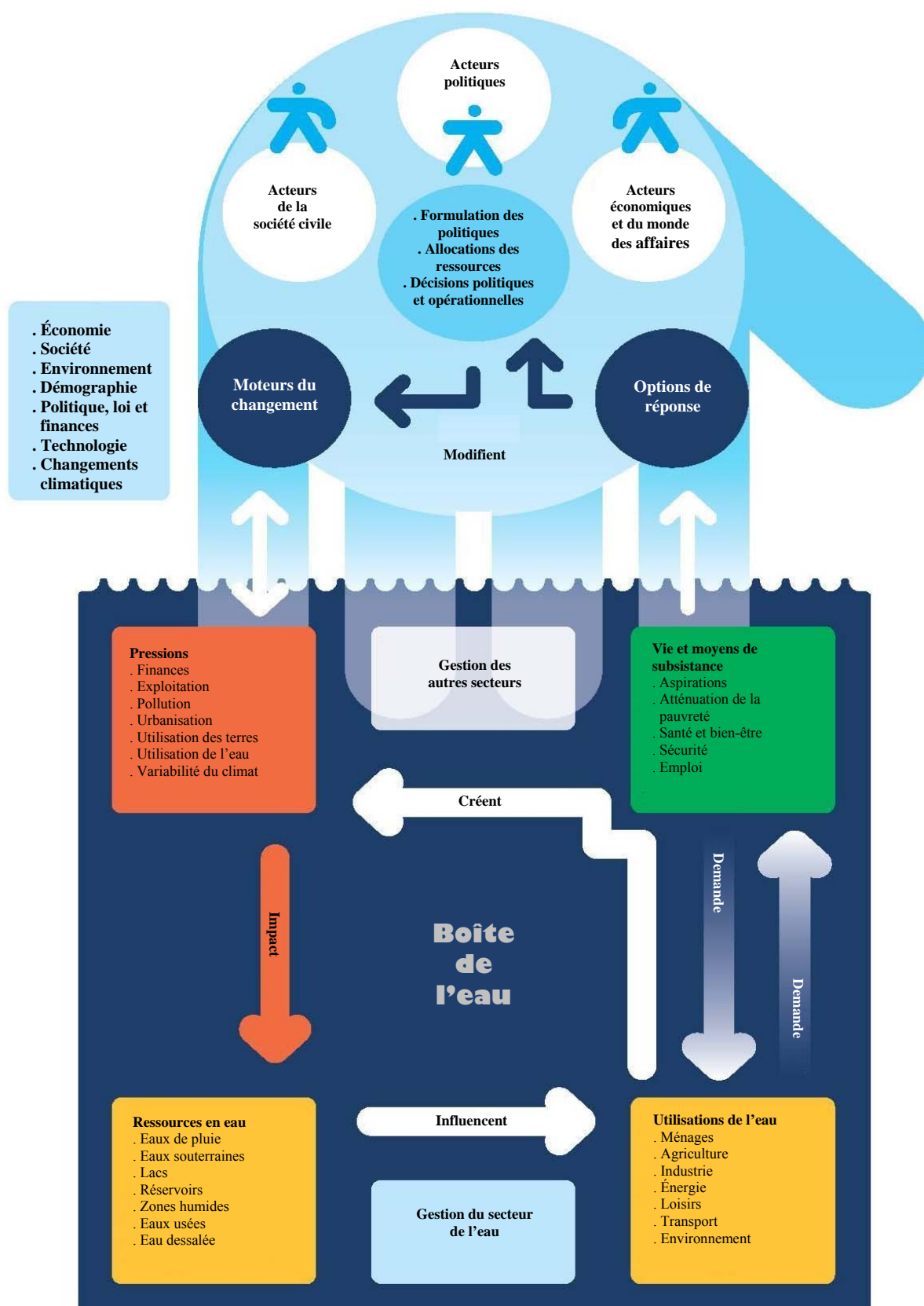


FIG. H-1. Facteurs et processus sociaux, politiques et économiques dont dépend la durabilité des ressources en eau (source : troisième Rapport sur la mise en valeur des ressources en eau de la planète des Nations Unies, 2009).

H.1. L'information avant l'action

119. Le cinquième Forum mondial de l'eau a, entre autres messages clés, mis l'accent sur « l'information avant l'action » (c'est-à-dire bien connaître le fonctionnement d'un système hydrologique particulier pour prendre ensuite les mesures de gestion appropriées) dans le cadre de son thème « Surmonter les divergences, pour l'eau ». Pour s'adapter aux conséquences des changements climatiques ou les atténuer, il est essentiel d'abord de comprendre la situation et le fonctionnement d'une ressource en eau donnée dans les conditions actuelles. Le cinquième Forum mondial de l'eau²⁸ a fait trois recommandations clés pertinentes pour l'application des technologies nucléaires :

- ✓ mieux comprendre les effets des changements mondiaux sur les ressources en eau, les processus hydrologiques naturels et les écosystèmes ;
- ✓ élaborer, mettre en œuvre et renforcer les plans et programmes transnationaux, nationaux et/ou infranationaux pour anticiper les effets possibles des changements mondiaux et y remédier ;
- ✓ accroître l'appui à la recherche dans le domaine de l'eau en vue de l'utilisation et de la gestion durables de l'eau, et promouvoir la coopération entre les organismes internationaux.

H.2. Recours aux isotopes stables pour connaître la disponibilité et la qualité des eaux souterraines

120. Les méthodes d'isotopes stables sont de plus en plus utilisées pour comprendre la répartition spatiale des différents processus qui influent sur la disponibilité et la qualité des eaux souterraines tant au niveau local qu'au niveau mondial. Cette méthode est illustrée à la figure H-2 où une carte des valeurs d'oxygène 18 dans les eaux souterraines dans la région de Los Naranjos au Mexique montre l'importance de la recharge en altitude dans le nord-ouest de la zone d'étude (couleurs bleues) et les effets de l'infiltration d'eau de surface à plus faible altitude dans le reste de la zone (couleurs rouges et oranges). Ces informations fournissent des données références clés pour évaluer l'impact des changements climatiques et d'autres facteurs sur les ressources locales en eaux souterraines.

²⁸ Voir <http://www.worldwaterforum5.org/>

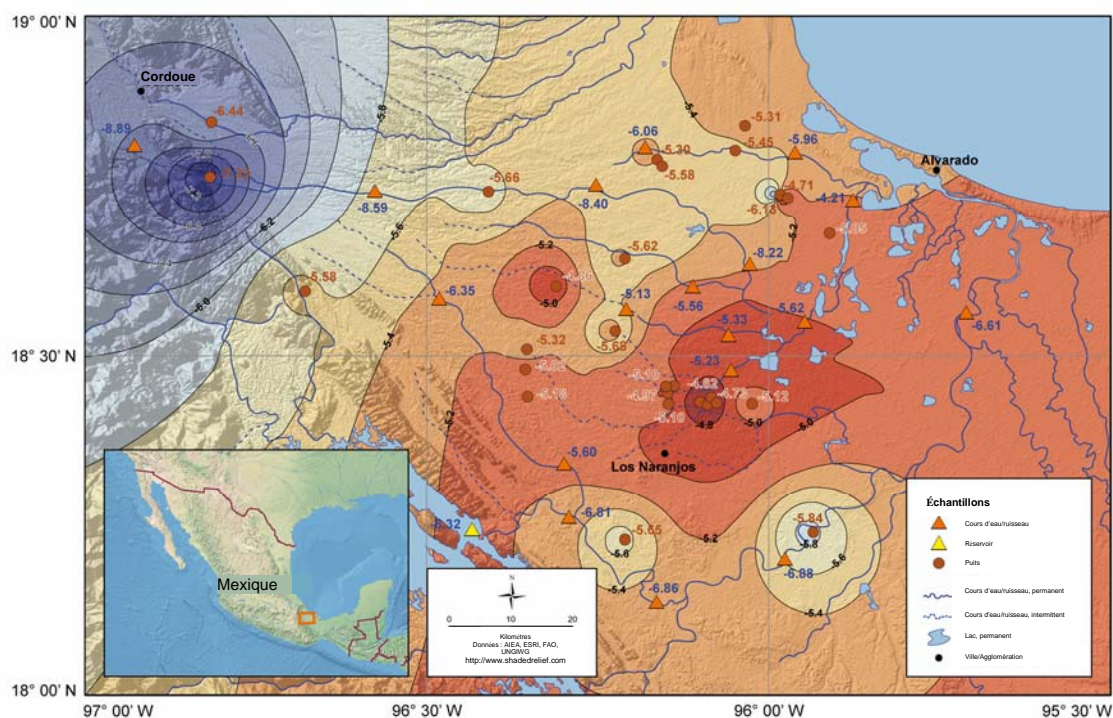


FIG. H-2. Interpolation des valeurs de l'oxygène 18 pour la région de Los Naranjos au Mexique. Les valeurs des isotopes les plus négatives (couleurs bleues en haut à gauche) indiquent des recharges à haute altitude. Les couleurs rouges et oranges indiquent des contributions de recharge à faible altitude et mixtes.

121. Étant donné que l'hydrologie isotopique aide à améliorer l'évaluation des ressources en eau, elle joue aussi un rôle dans la planification énergétique. Le personnel du programme sur les ressources en eau de l'Agence, de la Section de la gestion des sols et de l'eau et de la nutrition des plantes de la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, et de la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire coopèrent dans le cadre d'une initiative liée à la planification concernant le climat, les sols, l'énergie et l'eau. Lorsqu'une méthode appropriée sera élaborée, elle sera utilisée pour aider les États Membres à évaluer les effets combinés d'un large éventail de facteurs, y compris les changements économiques, sociaux, environnementaux, démographiques, politiques, juridiques, financiers, technologiques et climatiques. La planification concernant le climat, les sols, l'énergie et l'eau facilitera aussi la coopération entre les différents ministères et organismes gouvernementaux en vue de l'élaboration de solutions intégrées pour la mise en valeur durable des ressources en eau et de l'énergie.

I. Production de radio-isotopes et technologie des rayonnements

I.1. Radio-isotopes et radiopharmaceutiques

I.1.1. Production et disponibilité de radio-isotopes

122. En 2009, la demande sans cesse croissante de radio-isotopes destinés à des applications médicales et industrielles ainsi que les progrès des technologies connexes ont retenu l'attention dans le

monde entier compte tenu des graves pénuries d'approvisionnement en isotopes à usage médical, notamment le molybdène-99 produit par fission. Les radio-isotopes utilisés dans les applications médicales et industrielles restent essentiellement produits dans les réacteurs, mais les capacités de production à partir des cyclotrons continuent aussi à augmenter, principalement en raison de l'établissement de centres régionaux de production de radio-isotopes à très courte période pour la tomographie à émission de positons (PET). Cette tendance et les autres progrès récents dans l'élaboration des radiopharmaceutiques ont été mis en évidence lors de trois grandes réunions internationales tenues en 2009²⁹.

123. Le nombre croissant de cyclotrons installés exclusivement pour la production de traceurs TEP montre l'intérêt croissant suscité par l'utilisation de la TEP et de la TEP/TDM (tomodensitométrie). On estime qu'il y a actuellement quelque 650 cyclotrons et 2 200 systèmes TEP opérationnels dans le monde. L'utilisation clinique continue d'être dominée par les applications bien établies du fluorodésoxyglucose (FDG) marqué au fluor 18 chez les malades du cancer, mais un accent croissant est mis aussi sur les problèmes et les prescriptions de l'élaboration et de l'utilisation d'autres radiopharmaceutiques TEP. L'amélioration de la disponibilité des générateurs au germanium 68 et au gallium 68 et le nombre croissant de centres de TEP ont entraîné une augmentation de l'élaboration de radiopharmaceutiques à base de gallium 68, y compris des modules de synthèse automatisés connexes. L'idée d'utiliser des radio-isotopes TEP de période relativement plus longue pour étudier certains processus biologiques et de distribution plus longs a conduit de nombreux centres à explorer la possibilité de produire des traceurs TEP, par exemple des produits du cuivre 64 et de l'iode 124, pendant les périodes creuses de l'exploitation des cyclotrons médicaux existants. Une autre raison de l'intérêt témoigné pour ces produits est que ce sont des outils fiables permettant d'obtenir des données dosimétriques en vue d'applications thérapeutiques utilisant des radio-isotopes thérapeutiques analogues.

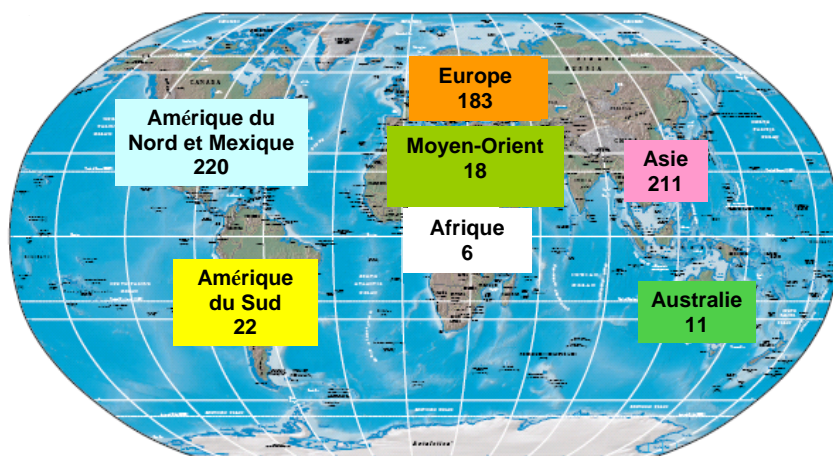


FIG. I-1. Répartition des cyclotrons utilisés pour la production de traceurs TEP (source: Dr. D. Schlyer, Laboratoire national de Brookhaven (États-Unis d'Amérique), d'après les données provenant de quatre grands producteurs de cyclotrons)

²⁹ Réunion annuelle de la Société de médecine nucléaire, à Toronto (Canada) et de l'Association européenne de médecine nucléaire, à Barcelone (Espagne) et colloque biennal international de la Société de radiopharmacologie, à Edmonton (Canada).

124. Les progrès enregistrés en ce qui concerne les méthodes de radiothérapie, par exemple le traitement des tumeurs neuroendocrines à l'aide de peptides marqués au lutétium 177 ou à l'yttrium 90 ont permis d'élaborer des unités automatisées de synthèse et des dispositifs de protection pour la préparation à petite échelle de radiopharmaceutiques thérapeutiques qui nécessitent la manipulation de quantités relativement importantes de radio-isotopes, ainsi que des radio-isotopes TEP équivalents utilisés pour des études dosimétriques. De même, l'intérêt suscité par l'utilisation de radio-isotopes émetteurs alpha pour la thérapie du cancer a permis d'améliorer encore les méthodes de production d'émetteurs alpha à courte période tels que le bismuth 213.

I.1.2. Sécurité des approvisionnements en molybdène 99³⁰

125. Les applications médicales diagnostiques pour les patients ont continué de souffrir de graves pénuries d'approvisionnement de générateurs au molybdène 99 et au technétium 99m produits par fission presque partout dans le monde. Le réacteur à haut flux de Petten (Pays-Bas) est à l'arrêt depuis février 2010 pour travaux de maintenance et de mise à niveau et devrait redémarrer en août 2010. Par ailleurs, le réacteur NRU au Canada a été mis à l'arrêt en mai 2009 pour d'importantes réparations en raison de fuites, et ne devrait reprendre ses opérations que fin juillet 2010 au plus tôt.

126. Pour compenser partiellement les pénuries, la production du réacteur BR2 de Mol (Belgique) et du réacteur Safari-1 en Afrique du Sud a été augmentée dans la mesure du possible. L'installation de production d'isotopes de Covidien à Petten (Pays-Bas) utilise le réacteur polonais MARIA pour irradier les cibles existantes à l'UHE en vue de produire du molybdène 99 afin d'accroître l'offre. De la même manière, l'installation de protection de l'Institut des radioéléments de Fleurus (Belgique) utilise le réacteur de Řež, en République tchèque, pour irradier des cibles à l'UHE. L'Organisation australienne pour la science et la technologie nucléaires (ANSTO) a achevé la mise en service à chaud de sa nouvelle installation de production qui utilise l'irradiation de cibles d'UFE au réacteur australien de type piscine à eau ordinaire (réacteur OPAL) et a obtenu une approbation réglementaire pour commencer la production régulière à grande échelle, ce qui lui permettra de produire jusqu'à 10 % de la demande mondiale pour l'exportation. Une autre installation de production d'UFE (à partir d'une technologie argentine) construite en Égypte à côté du réacteur ETRR-2 a presque achevé les examens techniques demandés par l'organisme de réglementation et devait recevoir l'autorisation de commencer les essais de mise en service à chaud à la mi-2010.

127. Des appels en faveur de la coopération internationale et d'un appui gouvernemental sont venus de diverses parties prenantes, y compris d'associations professionnelles médicales. À la demande du gouvernement canadien, l'AEN/OCDE a formé le groupe de haut niveau sur la sécurité des approvisionnements en isotopes médicaux en vue d'étudier les questions pertinentes pour l'amélioration de la fiabilité des approvisionnements en molybdène 99.³¹ En outre, l'Association des producteurs d'imagerie et des fournisseurs d'équipements (AIPES) a intensifié son rôle de coordination et de diffusion de l'information sur les plans d'exploitation des réacteurs et les périodes de mise à l'arrêt. À cet égard, l'appui fourni par l'Agence pour promouvoir les associations de réacteurs de recherche a débouché sur une initiative entrepreneuriale à laquelle participent quatre réacteurs d'Asie centrale et d'Europe et une installation de traitement en Hongrie³². Le gouvernement canadien a mis sur pied un groupe de quatre experts chargé de recommander des

³⁰ De plus amples détails sont donnés dans les sections pertinentes du dernier rapport annuel (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) ou à l'adresse : <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>).

³¹ <http://www.nea.fr/html/ndd/med-radio/>

³² L'Agence y siège en qualité d'observateur.

mesures appropriées pour sécuriser les approvisionnements en radio-isotopes pour les utilisations médicales. Ce groupe a rendu son rapport en décembre 2009³³.

I.2. Applications de la technologie des rayonnements

I.2.1. Recours aux faisceaux d'électrons pour stériliser les matériaux d'emballage et les conteneurs

128. Les rayonnements gamma sont utilisés comme moyen sûr et efficace de stérilisation des produits sanitaires jetables, de composants et d'emballages depuis plus de 50 ans. L'irradiation avec des faisceaux d'électrons a été acceptée pour la stérilisation il y a une trentaine d'années, depuis qu'on dispose d'accélérateurs d'électrons plus efficaces et plus fiables. C'est actuellement la méthode de choix pour le traitement des produits volumineux de faible valeur (comme les seringues) et des produits peu volumineux mais de grande valeur (comme les dispositifs cardio-thoraciques).

129. Il existe depuis peu une nouvelle méthodologie basée sur les faisceaux d'électrons mise au point aux États-Unis, et qui constitue une alternative sans produit chimique, pour obtenir des matériaux d'emballage et des conteneurs aseptiques par stérilisation ou désinfection. L'emballage aseptique des jus de fruits, des boissons lactées et d'autres boissons est un des secteurs les plus dynamiques de l'industrie de transformation alimentaire, et les technologies de stérilisation des emballages utilisant peu d'énergie et d'eau tout en possédant les caractéristiques de performance requises suscitent beaucoup d'intérêt. Vingt-sept unités de faisceaux d'électrons de ce type sont actuellement installées ou en construction dans le monde. La technologie la plus récente dans ce domaine utilise des émetteurs de faisceaux d'électrons de faible énergie pour stériliser la paroi interne des bouteilles de boisson (voir figure I-2). Les émetteurs de faisceaux d'électrons peuvent être combinés et configurés de différentes manières et intégrés dans la chaîne de production pour permettre de stériliser les bouteilles, les bouchons, les sacs et les sachets. Selon la configuration, on peut irradier la surface interne ou externe, ou les deux, en quelques secondes. Ainsi, le traitement à haute température et l'utilisation de produits chimiques sont éliminés, de même que le rinçage après traitement chimique, ce qui permet d'économiser de l'énergie et de l'eau, réduit les coûts et simplifie la logistique.

³³ Voir <http://nrcan.gc.ca/eneene/sources/uranuc/pdf/panrep-rapexp-eng.pdf>

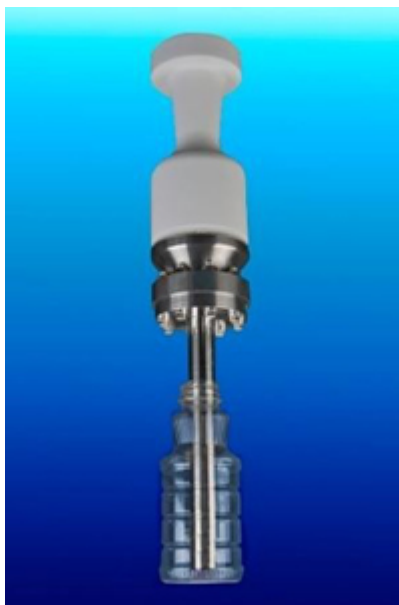


FIG. I.-2. Stérilisation, à l'aide d'un émetteur de faisceaux d'électrons, de la surface interne d'une bouteille de boisson avant son remplissage (<http://www.aeb.com/>).

I.2.2. Radiosynthèse de nanostructures à base de carbone

130. Les nanostructures à base de carbone, telles que les nanotubes de carbone, ont ouvert des possibilités excitantes dans les applications de la nanotechnologie, notamment le passage de la micro à la nanoélectronique à base de silicium. Les méthodes basées sur les faisceaux d'électrons sont particulièrement indiquées pour les tâches telles la soudure de nanotubes de carbone, la modélisation de structures contenant ces nanotubes à l'aide de la lithographie par faisceau d'électrons, la synthèse de fils métalliques confinés dans des nanotubes, et la canalisation des ions pour des applications potentielles dans les systèmes de libération de médicaments et l'industrie électronique. L'an dernier, un groupe de chercheurs du Japon et de la Chine a rapporté qu'en irradiant un nanoflocon de graphite avec un faisceau d'électrons de 120 keV, on peut le transformer en graphène, puis en nanoruban de graphène. En continuant l'irradiation, on obtient finalement un seul brin de carbone qui pourrait être un fil moléculaire parfait. La technologie des faisceaux d'électrons permet ainsi de fabriquer des nanostructures à base de carbone qui ont d'énormes potentialités comme composants ultimes de base de dispositifs moléculaires pour utilisation en médecine et en électronique.

131. Pour faciliter les interactions entre les groupes de chercheurs, ainsi que le transfert de solutions scientifiques à l'industrie et de produits aux utilisateurs finals, un consortium d'entreprises, d'universités et de laboratoires nationaux européens appelé EUMINAFab a été créé.³⁴ Il intègre les technologies, les installations et les compétences, et offre un accès sans frais à 36 installations ayant le personnel d'appui technique nécessaire en micro- et en nanomodélisation, et dans les questions du dépôt de couches minces, de la réplique et de la caractérisation.

³⁴ Un séminaire de l'Agence tenu en Roumanie dans ce domaine sur le thème « Tendances en nanosciences : théorie, expérience, technologie » a porté sur le rôle des techniques d'irradiation en nanotechnologie. Il a été organisé conjointement par le Centre international Abdus Salam de physique théorique (CIPT), l'AIEA, et l'Institut national de physique et de génie nucléaire Horia Hulubei.