



RÉSIDUS RADIOACTIFS DE LA GUERRE FROIDE: L'HÉRITAGE RADIOLOGIQUE

ABEL J. GONZALEZ

L'un des traits dominants de la période historique connue sous le nom de "guerre froide" a été la production et les essais à grande échelle d'armes nucléaires. Ces activités militaires ont entraîné une production sans précédent de substances radioactives. Une partie de ces "résidus de la guerre froide" s'est retrouvée dans l'atmosphère et a été dispersée dans le monde. Certains d'entre eux sont restés dans des états relativement isolés dans des milieux géologiques souterrains sur le site de production ou d'essai. D'autres ont contaminé des zones parfois accessibles aux humains.

S'ajoutent à ce tableau d'autres scènes de l'héritage de la guerre froide. D'importantes quantités de déchets radioactifs et de produits dérivés sont stockés, déchets provenant de la production de matières destinées aux armes nucléaires. Ils devraient, un jour ou l'autre, être convertis à des fins pacifiques ou être expédiés en vue de leur élimination définitive.

En outre, les installations de production de matières nucléaires à vocation militaire, les sites d'essais nucléaires, et les navires à propulsion nucléaire seront tous, à plus ou moins brève échéance, déclassés — sur la seule péninsule de Kola, cent sous-marins nucléaires hors service attendent leur déclassement définitif. Ce processus va accroître l'accumulation de résidus radioactifs.

Il semble, aujourd'hui, que la guerre froide soit devenue juste un

autre chapitre de l'histoire. Le *Traité interdisant les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, dans l'espace extra-atmosphérique et sous l'eau* a marqué la fin des essais d'armes nucléaires dans l'environnement et le *Traité d'interdiction complète des essais nucléaires* va peut-être mettre fin définitivement aux essais d'armes nucléaires. D'autres traités limiteront et, souhaitons-le, interdiront la production de matières nucléaires.

Tout cela est de bon augure. Il reste à notre génération, toutefois, de résoudre le problème des résidus radioactifs de la guerre froide, problème qui exige une action efficaces.

Au cours de la décennie écoulée, l'AIEA a été priée d'aider davantage les pays à assumer cet héritage de la guerre froide. Plusieurs évaluations scientifiques des situations radiologiques créées par la guerre froide ont été réalisées par des experts désignés par l'AIEA sur des sites d'essais nucléaires, des installations de production de matières nucléaires et des sites de décharge.

Le présent numéro du *Bulletin de l'AIEA* met en lumière ces activités de coopération dans le contexte de l'évolution de la situation et des préoccupations qui se font jour à l'échelon international.

Photo: contrôle de la radioactivité de noix de coco sur l'atoll de Mururoa pendant une étude réalisée par l'AIEA.

L'ÉVALUATION DES RÉSIDUS DE LA GUERRE FROIDE

L'AIEA exerce une responsabilité unique au sein du système des Nations Unies: elle est la seule organisation spécifiquement autorisée par ses statuts à fixer des normes internationales concernant la protection de la santé (contre les rayonnements ionisants) et à assurer leur application à la demande d'un État.

Il y a quelques années, l'AIEA — en collaboration avec cinq autres organisations internationales — a fixé de nouvelles normes internationales de radioprotection (*voir Bulletin de l'AIEA, Vol. 40, n° 2, juin 1998*). Ces normes ont essentiellement pour objet de contrôler l'exposition aux rayonnements liée aux activités pacifiques. Les principes qui sous-tendent ces normes, cependant, peuvent également s'appliquer à l'évaluation rétrospective des situations radiologiques créées par des activités militaires non réglementées telles que des essais d'armes nucléaires.

Ces dernières années, plusieurs États ont demandé à l'AIEA d'évaluer, par rapport à ses normes internationales de radioprotection, des situations radiologiques découlant d'activités datant de la

M. González est directeur de la Division de la radioprotection et de la sûreté des déchets de l'AIEA.

guerre froide. L'objectif était de protéger la santé publique et, en dernier ressort, de remettre en état l'environnement contaminé pour qu'il puisse être exploité par l'homme. Les études réalisées comme suite à ces demandes ont été la réponse apportée par l'Agence à l'héritage radiologique de la guerre froide (voir encadré et graphique, pages 4 et 5). Des évaluations ont été sollicitées par le Kazakhstan pour le site de Semipalatinsk; par les Îles Marshall pour Bikini; et, plus récemment, par la France pour Mururoa et Fangataufa en Polynésie française. Sur ces sites, des "expériences nucléaires" ont été effectuées pendant la période de la guerre froide. Ces expériences, qui ont consisté en des essais d'armes nucléaires (à fission et à fusion) et en des essais de sûreté d'armes nucléaires, ont été effectués aussi bien dans l'atmosphère qu'en sous-sol (voir encadrés pages 6, 8 et 9). L'un des sites d'essais étudiés a été un vaste polygone continental; trois autres étaient des atolls (voir encadré page 7). Un autre site étudié a été la mer de Kara dans l'Arctique, où d'importantes quantités de résidus radioactifs ont été immergés.

LES DIMENSIONS DU PROBLÈME

Aussi complètes ces études de l'AIEA peuvent-elles paraître, elles ne représentent qu'un catalogue incomplet et limité de l'héritage radiologique de la guerre froide.

Depuis le bombardement atomique d'Hiroshima et de Nagasaki au Japon jusqu'aux essais récents effectués par l'Inde et le Pakistan, plus de 2400 essais d'armes nucléaires ont eu lieu dans le monde. En outre, d'importantes quantités de matières nucléaires ont été produites à des fins militaires. Toutes ces activités ont produit d'énormes quantités de résidus radioactifs. Leurs niveaux et effets ont été étudiés par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des

rayonnements ionisants (UNSCEAR), qui en a régulièrement rendu compte à l'Assemblée générale des Nations Unies.

LES ESSAIS D'ARMEMENTS NUCLÉAIRES

D'après l'UNSCEAR, il existe — outre les sites étudiés par l'AIEA — plusieurs autres régions où des essais d'armes nucléaires ont été effectués et où il est possible que subsistent des résidus radioactifs.

Il s'agit notamment de sites situés dans les régions suivantes: Algérie (Reggane et In-Ekker); Australie (Monte Bello, Emu et Maralinga); Chine (Lop Nor); Îles Marshall (atoll d'Enwetak); Fédération de Russie (Nouvelle Zemle, Totsk et Kapoustine Yar); États-Unis d'Amérique (Nevada et Amchitka/Alaska); divers endroits des océans Pacifique et Atlantique dont les îles Malden, Christmas et Johnston, ainsi que les sites indiens et pakistanais où des essais ont été effectués récemment.

Le site d'essai du Nevada a été le théâtre de 84 essais nucléaires atmosphériques; 81 essais ont été effectués entre 1951 et 1958, et trois autres en 1962. Plus de 900 essais souterrains, dont on a appris que 32 avaient produit des résidus consécutifs à une ventilation, ont eu lieu entre 1951 et 1992. L'essai souterrain le plus important aux États-Unis a eu lieu en 1971 à Amchitka (Alaska).

En Nouvelle Zemle, région arctique vaste et isolée, un important programme d'essais atmosphériques a été mis en œuvre. On y a effectué plusieurs essais à haute altitude, au moins un essai à la surface terrestre, deux essais à la surface de la mer, trois essais sous-marins et plusieurs essais souterrains.

Les essais effectués dans le Pacifique (îles Malden et Christmas) en 1957 et 1958 ont consisté en des explosions

déclenchées au dessus de l'océan ou en des explosions d'engins suspendus au dessus de la terre par des ballons. Douze essais, essentiellement des essais de surface, ont également été effectués entre 1952 et 1957 sur trois sites australiens: îles Monte Bello, Emu et Maralinga. Plusieurs essais de sûreté effectués sur les sites de Maralinga et d'Emu ont entraîné la dispersion de plutonium sur de vastes zones.

En Algérie, les essais nucléaires ont compris des essais à faible rendement effectués sur les sites de Reggane et In-Ekker (Sahara algérien) en 1960 et 1961.

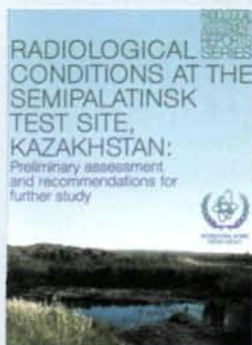
Les essais effectués sur le site de Lop Nor en Chine occidentale ont consisté en 22 essais atmosphériques réalisés entre 1964 et 1980, tandis que les essais souterrains se sont poursuivis jusqu'en 1996. Toujours en Asie, un engin nucléaire a été testé en Inde en 1974, et des essais ont eu lieu en mai 1998 tant en Inde qu'au Pakistan.

Pour résumer, 2408 expériences nucléaires ont été signalées à l'UNSCEAR, dont 541 essais atmosphériques et 1867 essais souterrains. Le rendement* total de l'ensemble des essais s'est élevé à 530 mégatonnes: 440 mégatonnes pour les essais atmosphériques et 90 mégatonnes pour les essais souterrains. Le rendement est la quantité d'énergie produite par l'explosion nucléaire. La connaissance des rendements et d'autres paramètres d'essais permet aux scientifiques d'établir l'activité* et la composition

*Le terme "rendement" est généralement exprimé en kilotonnes ou mégatonnes, une kilotonne équivalant à 1000 tonnes de trinitrotoluène (TNT) et une mégatonne équivalant à un million de tonnes de TNT. Pour éviter toute ambiguïté, il a été convenu qu'une kilotonne équivalait exactement à la libération d'une énergie explosive de 10^{12} calories.

ÉVALUER L'HÉRITAGE DE LA GUERRE FROIDE: LA RÉPONSE DE L'AIEA

Au cours des décennies passées, les pays se sont tournés vers l'AIEA pour évaluer les effets radiologiques des essais nucléaires passés et des pratiques de rejet. Ont notamment été réalisées les évaluations suivantes:



Semipalatinsk (Kazakhstan). En 1993, le Gouvernement kazakh a informé l'AIEA de sa préoccupation concernant la situation radiologique à Semipalatinsk, où des essais d'armes nucléaires ont été effectués de 1949 à 1989. Il a sollicité une assistance, et une évaluation préliminaire de Semipalatinsk a ensuite été effectuée (voir article page 12). Plus de 450 essais atmosphériques et souterrains ont

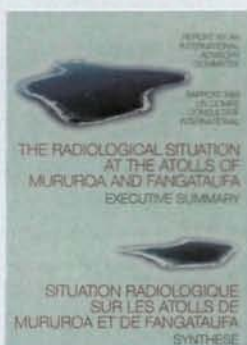
été réalisés sur ce site. Bien que l'étude préliminaire de l'AIEA ait pu offrir des assurances raisonnables quant à la sûreté de la population résidente permanente de la région, elle a fait ressortir des niveaux très élevés de résidus radioactifs dans de vastes zones du site proprement dit: des doses de rayonnements pouvant atteindre 140 mSv par an seraient reçues si le site était habité en permanence. Ces observations ne tiennent pas compte des conséquences radiologiques potentielles des essais souterrains effectués à Semipalatinsk, que l'étude de l'AIEA n'a pas évaluées.

Atoll de Bikini (Îles Marshall). En 1994, le gouvernement de la République des Îles Marshall — archipel de l'océan

Pacifique composé d'environ trente atolls et de quelques îles récifales — a sollicité l'assistance de l'AIEA. Cette demande avait pour objet de réaliser une étude internationale indépendante de la situation radiologique prévalant sur l'atoll de Bikini, et d'étudier et de recommander des stratégies concernant l'éventuelle réhabilitation de l'atoll par les Bikinien. Un important

programme d'essais a été réalisé à cet endroit. Avant le début des essais, les Bikinien avaient été évacués loin de leur lieu de résidence sur l'atoll de Bikini — l'île de Bikini — et ils étaient maintenant désireux de retourner sur leur terre natale.

L'étude de l'AIEA, qui a été publiée récemment, a conclu que l'île de Bikini ne devrait pas être habitée de nouveau en permanence dans les conditions radiologiques actuelles, car les doses de rayonnement individuelles pouvaient atteindre des niveaux aussi élevés que 15 mSv par an, d'autant plus que des mesures correctives relativement simples, telles que la fertilisation des sols, pouvaient facilement atténuer ces doses. Si ces mesures étaient prises, l'étude a conclu que l'île de Bikini pouvait être habitée de nouveau en toute sûreté (voir article page 15).



Mururoa et Fangataufa (Polynésie française). En août 1995, la France a été le premier pays disposant de l'arme nucléaire à demander à l'AIEA d'évaluer un site d'essais nucléaires, à savoir la situation radiologique prévalant sur les atolls de Mururoa et de Fangataufa en Polynésie française. La France avait effectué 193 expériences nucléaires sur ces atolls. Comme suite à la demande française, l'AIEA a

organisé l'Étude de la situation radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa — étude qui devait devenir l'une des plus importantes évaluations radiologiques jamais effectuées dans le cadre du système des Nations Unies (voir articles pages 21, 24, 30, 34 et 38). Cette étude a récemment été achevée et publiée par l'AIEA en huit volumes (voir encadré page 23).

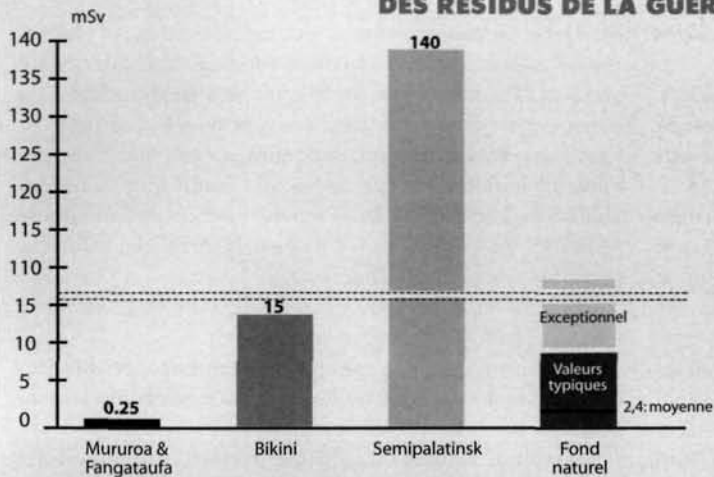
Les résultats de l'étude ont été encourageants: les atolls, qui n'ont jamais été habités en permanence, pourrait l'être en toute sûreté à l'avenir car les doses les plus élevées de rayonnements chuteront en dessous du niveau négligeable de 0,25 mSv par an dans les conditions hypothétiques d'habitation les plus extrêmes.



Mers arctiques (Fédération de Russie). En 1993, la Présidence de la Fédération de Russie a fait rapport sur les immersions de déchets radioactifs opérés par l'ex-Union soviétique en mer de Kara. La quantité de matières radioactives immergées estimée par la suite s'est révélée énorme: environ 37 petabecquerels. L'annonce russe a suscité de vives préoccupations, notamment parmi les Parties

contractantes à la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières vis-à-vis desquelles l'AIEA a des obligations techniques particulières. En conséquence, un projet international d'évaluation a été entrepris et récemment achevé (voir article page 18). Bien que la quantité de matières radioactives soit importante, les résultats du projet ne se sont pas révélés alarmants pour la santé et la sûreté publiques. L'étude a montré qu'essentiellement en raison de l'énorme capacité de dispersion des eaux des océans et de l'isolement de la mer de Kara, les doses de rayonnement potentielles pour les humains seraient minimales. Seul le personnel militaire patrouillant les fjords à proximité des sites d'immersion risquaient de recevoir des doses supérieures aux niveaux de fond naturels.

DOSES DE RAYONNEMENT ANNUELLES MAXIMALES PROVENANT DES RÉSIDUS DE LA GUERRE FROIDE



Le graphique montre les doses de rayonnement annuelles maximales que recevraient d'hypothétiques individus habitant les sites étudiés par l'AIEA. Il convient de noter que toute comparaison des résultats de ces études par des personnes non qualifiées peut être trompeuse, en raison des différentes caractéristiques des tests et des sites où ces tests ont été effectués ainsi qu'en raison de l'hypothèse utilisée.

À titre de référence, les doses de fond naturelles annuelles par an sont également indiquées. Les doses sont exprimées en millisieverts, ainsi qu'on l'explique ci-après.

La dose de rayonnement est l'énergie absorbée à partir de rayonnements par masse unitaire de matière. Aux fins de la radioprotection, cette dose est pondérée par deux facteurs. Le premier tient compte de la mesure dans laquelle un type donné de rayonnement produit des effets sur la santé. Le second tient compte des différences de sensibilité des organes humains aux rayonnements. L'unité de dose est le joule par kilogramme, mais le terme sievert (Sv) est utilisé comme unité de dose pondérée. Le présent graphique utilise le millisievert (mSv), qui équivaut à un millième de sievert. La dose moyenne absorbée dans le monde par les individus du fait des rayonnements de fond naturels est de 2,4 mSv par an.

isotopique des résidus radioactifs produits par l'essai.

Le rendement de 440 mégatonnes produit par les explosions atmosphériques a libéré dans l'environnement la quantité impressionnante de milliers d'exabecquerels de radioactivité (voir tableau page 6). Cette radioactivité s'est dispersée et déposée sous forme de retombées, en partie locales et en partie mondiales (voir encadré page 9).

Les résidus radioactifs provenant des 90 mégatonnes explosées en sous-sol sont globalement confinés dans les formations géologiques. Toutefois, ils risquent au cours des siècles de se déplacer à travers la géosphère et de gagner, pour finir, l'environnement (voir encadré page 8).

L'héritage radiologique des essais nucléaires offre de multiples facettes. Il est imputable, pour l'essentiel, aux matières radioactives résiduelles provenant d'essais de sûreté d'armes nucléaires ainsi qu'aux retombées locales causées par les essais atmosphériques. Cet héritage englobe en outre la migration potentielle des résidus radioactifs et les opérations de ventilation effectuées à l'issue d'essais souterrains.

LA PRODUCTION DE MATIÈRES DESTINÉES AUX ARMEMENTS

La production d'armes nucléaires nécessite certaines quantités

d'uranium enrichi ou de plutonium, pour les engins à fission, et de tritium et de deutérium pour les engins à fusion. Le cycle du combustible, dans les applications militaires, est analogue à celui des programmes civils de production d'énergie électrique: extraction et concentration de l'uranium, enrichissement de l'uranium, fabrication du combustible, exploitation de réacteurs de production des matériaux et retraitement du combustible, principalement pour séparer le plutonium. L'une des principales différences, cependant, est que les programmes civils relevaient généralement d'organes de réglementation indépendants, ce qui n'était pas le cas des programmes militaires.

Des radionucléides ont été libérés à différents stades du cycle de production de matières nucléaires militaires, mais surtout lors du retraitement du combustible et de la séparation du plutonium.

Aux États-Unis, les usines de production de matières nucléaires à vocation militaire se situent

**Le terme "activité" (ou "radioactivité") d'une substance radioactive exprime la vitesse de transformation nucléaire de radionucléides émettant des rayonnements. Il correspond au nombre de transformations se produisant dans cette matière par unité de temps. L'unité d'activité est la seconde réciproque, appelée becquerel (Bq). Étant donné qu'un Bq exprime une très faible activité, on utilise les multiples suivants: 1000 Bq ou kilobecquerel (kBq); 1000000 Bq ou mégabecquerel (MBq); 1×10^9 Bq ou gigabecquerel (GBq); 1×10^{12} Bq ou terabecquerel (TBq); 1×10^{15} Bq ou petabecquerel (PBq); 1×10^{18} Bq ou exabecquerel (EBq). Afin de saisir l'échelle du becquerel, on notera qu'il est recommandé, dans le Codex Alimentarius, que la radioactivité des aliments ne dépasse pas 1000 becquerels de césium environ, ou un becquerel de plutonium, par kilogramme d'aliment.*

LES "EXPÉRIENCES NUCLÉAIRES"

Les expériences nucléaires ont été de deux ordres: *essais nucléaires* et *essais de sûreté*.

■ Dans un **essai nucléaire**, on fait exploser un engin nucléaire, ce qui libère d'importantes quantités d'énergie. L'explosion est produite par fission nucléaire, par fusion nucléaire, ou par une combinaison des deux.

— Dans un **engin à fission**, deux masses sous-critiques de matière fissile (uranium-235 et du plutonium-239, par exemple) sont réunies pour produire une masse surcritique. Le noyau lourd se divise en deux parties (les produits de fission) qui émettent ensuite des neutrons, libérant une énergie équivalant à la différence entre la masse propre du noyau originel et la masse propre des produits de fission et des neutrons.

— Dans un **engin à fusion**, des noyaux atomiques de faible numéro atomique fusionnent pour former un noyau plus lourd libérant d'importantes quantités d'énergie. La réaction devient auto-entretenue à très hautes températures, qui sont obtenues à l'aide d'un engin à fission interne entouré de matière hydrogénée légère (deutérium et deutériure de lithium, par exemple).

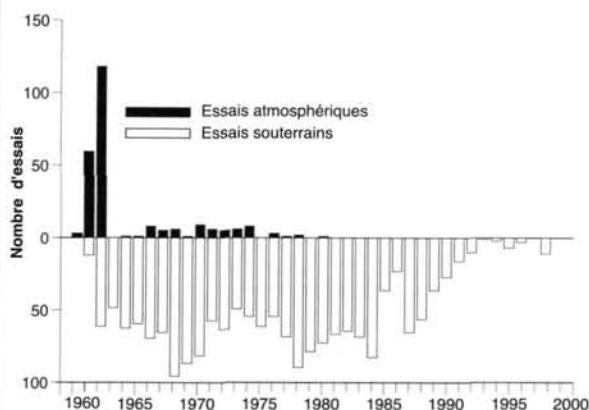
■ Dans un **essai de sûreté**, des engins nucléaires plus ou moins élaborés sont soumis aux conditions simulées d'un accident. Pendant ces essais, le cœur de l'arme nucléaire est détruit par des explosifs conventionnels, ce qui ne s'accompagne d'aucune ou, dans quelques cas, que d'une très faible libération d'énergie de fission. Tandis que les résidus radioactifs d'un **essai nucléaire** sont les produits de fission et de fusion, les résidus radioactifs d'un **essai de sûreté** sont la matière fissionnable proprement dite.

Des essais nucléaires et des essais de sûreté ont été réalisés aussi bien dans l'atmosphère qu'en sous-sol.

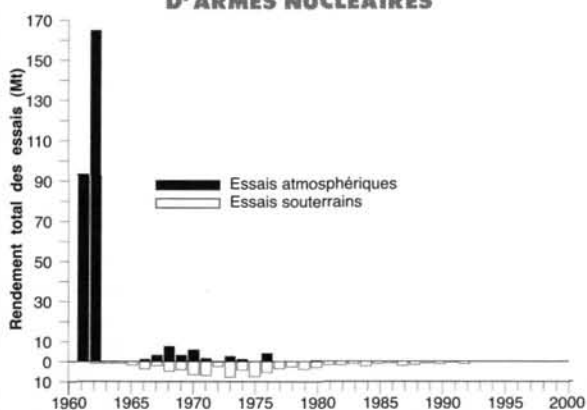
Le tableau et les graphiques présentent des données correspondant à des essais nucléaires qui ont été effectués depuis 1960.

Le tableau couvre l'activité de dix-neuf radionucléides produits, libérés dans l'atmosphère, et dispersés dans le monde lors d'essais nucléaires atmosphériques. Les données indiquent la libération normalisée correspondant aux engins à fission et fusion et l'activité totale libérée par l'ensemble des tests dans le

RÉPARTITION DES EXPÉRIENCES NUCLÉAIRES



RÉPARTITION DES RENDEMENTS DES ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES



ACTIVITÉS DES RADIONUCLÉIDES PRODUITS LORS D'EXPLOSIONS NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES

Radionucléide/période	Activité estimative (retombées locales exclues)			Activité estimative (retombées locales exclues)		
	Libération normalisée (Pbq/mégatonne)		Activité totale des essais réalisés dans le monde (EBq)	Libération normalisée (Pbq/mégatonne)		Activité totale des essais réalisés dans le monde (EBq)
	Fission	Fusion		Fission	Fusion	
Tritium	12,32 ans	0,026	740	240		
Carbone-14	5730 ans		0,67	0,22		
Manganèse-54	312,5 jours	-	15,9	5,2		
Fer-55	2,74 ans	-	6,1	2		
Strontium-89	50,55 jours	590	-	91,4		
Strontium-90	28,6 ans	3,90	-	0,604		
Yttrium-91	58,51 jours	748	-	116		
Zirconium-95	64,03 jours	922	-	143		
Ruthénium-103	39,25 jours	1540	-	238		
Ruthénium-106	371,6 jours	76,4	-	11,8		
Antimoine-125	2,73 ans	3,38	-	0,524		
Iode-131	8,02 jours	4200	-	651		
Césium-137	30,14 ans	5,89	-	0,912		
Barium-140	12,75 jours	4730	-	732		
Cérium-141	32,50 jours	1640	-	254		
Cérium-144	284,90 jours	191	-	29,6		
Plutonium-239	24,100 ans	-	-	0,00652		
Plutonium-240	6560 ans	-	-	0,00435		
Plutonium-241	14,40 ans	-	-	0,142		

Note: à des fins de simplification, on part de l'hypothèse que tout le carbone-14 est produit par fusion. Source: UNSCEAR.

11 millions d'années
Des éruptions volcaniques créent de nouvelles îles sous l'océan.



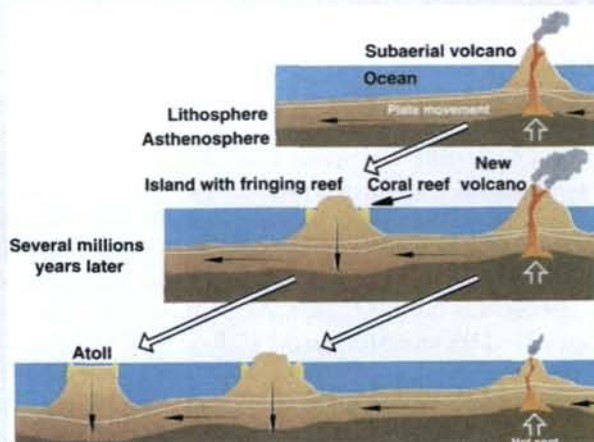
10 millions d'années
L'activité volcanique cesse et la végétation apparaît.



5 millions d'années
À mesure que l'île s'affaisse, des récifs coralliens se développent sur ses flancs.



Aujourd'hui
L'île est devenue un atoll - étroite ceinture de récif corallien entourant un lagon.



EXPÉRIENCES NUCLÉAIRES SUR DES ATOLLS

De nombreuses expériences nucléaires étudiées par l'AIEA ont été effectuées sur des *atolls* — récifs coralliens de forme circulaire entourant un lagon. Le récif forme une ceinture étroite dépassant de quelques mètres seulement le niveau de la mer. En de nombreux endroits, des chenaux irréguliers appelés "hoas" ont été creusés par l'océan, créant ainsi une chaîne d'îlots appelés "motus". Les atolls sont le résultat de volcans qui, il y a des millions d'années, ont surgi de la mer, créant des îles qui se sont ensuite lentement affaissées. Les ceintures ont été formées par des dépôts de coraux morts qui se sont accumulés autour des îles à mesure que celles-ci s'affaissaient sous l'eau. Malgré son origine volcanique, un atoll ne comporte aucun risque d'éruption volcanique. Cela s'explique par le fait que l'île originelle, à mesure qu'elle s'affaissait, a été éloignée du "point chaud" volcanique par la dérive des plaques géotectoniques terrestres.

notamment à Fernald, dans l'Ohio (traitement des matériaux), à Oak Ridge dans le Tennessee (enrichissement, séparation, laboratoires), à Rocky Flats au Colorado (fabrication de composantes d'armes), à Hanford dans l'État de Washington (production de plutonium) et à Savannah River en Caroline du Sud (production de plutonium). En Fédération de Russie, les installations se situent notamment à Tchéliabinsk, à Krasnoïarsk et à Tomsk. Au Royaume-Uni, elles se situent à Springfield (traitement de l'uranium et fabrication du combustible), à Capenhurst (enrichissement), à Sellafield (réacteurs de production et

retraitement), à Aldermaston (fabrication d'armes) et à Harwell (recherche). Des réacteurs de production de plutonium ont été exploités à Sellafield (deux réacteurs modérés par graphite et refroidis par gaz, connus sous le nom de piles de Windscale), puis à Calder Hall sur le site de Sellafield et à Chapelcross en Écosse. Un incendie, dont on a beaucoup parlé, dans l'un des réacteurs de Windscale en 1957 a entraîné la libération de radionucléides. En France, le premier réacteur expérimental, nommé EL1 ou Zoé, a divergé en 1948 et une usine de retraitement pilote a été mise en service en 1954. Un deuxième réacteur expérimental,

EL2, a été construit au centre de Saclay. Entre 1956 et 1959, trois réacteurs de production plus importants ont été mis en service au complexe de Marcoule sur le Rhône. Ces réacteurs modérés par graphite et refroidis par gaz ont respectivement fonctionné jusqu'en 1968, 1980 et 1984. Une importante usine de retraitement a également été construite et mise en service sur le site de Marcoule en 1958. Deux autres usines de retraitement ont été construites à La Hague, dans le nord de la France.

En Chine, le premier réacteur expérimental a été construit à Beijing, et une usine d'enrichissement d'uranium a été

ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES SOUTERRAINS

Les essais d'armes nucléaires souterrains ont commencé en 1951. Après 1963, lorsque le traité d'interdiction partielle des essais d'armes nucléaires a interdit les essais atmosphériques, d'importants programmes d'essais souterrains ont été mis sur pied. Le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, même s'il n'a pas encore été ratifié par tous les pays, pourra effectivement mettre un terme à la pratique des essais nucléaires souterrains.

Le nombre total d'essais souterrains a grandement dépassé celui des essais atmosphériques, même si leur rendement total a été nettement inférieur.

Les essais souterrains ont été, pour la plupart, d'un rendement inférieur, en particulier lorsqu'on s'efforçait de confiner les débris nucléaires. À court terme, ce n'est que lorsqu'on a ventilé ou diffusé des gaz à la suite de ces essais, comme cela a parfois été le cas, qu'il a pu se produire une contamination de l'environnement.

Plusieurs essais ont consisté en une détonation simultanée de charges nucléaires dans des puits ou des tunnels soit uniques, soit séparés. Ces essais dits "en salve" ont été effectués pour des raisons de rendement ou d'économie. Ils empêchaient également toute détection à distance par des systèmes de mesure sismique.

Le nombre total d'essais souterrains enregistrés par l'UNSCEAR pour tous les pays s'élève à 1867. On ne dispose pas toujours du

rendement de chaque essai, mais on estime à 90 mégatonnes le rendement total. Il serait souhaitable de disposer de données plus complètes sur les essais au cours desquels une ventilation a été effectuée, et d'une estimation des quantités de matières radioactives dispersées alors dans l'environnement.

Les essais souterrains ont généralement été effectués dans des socles géologiquement appropriés à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres, mais certains d'entre eux ont eu lieu dans des emplacements inappropriés.

Chaque explosion produit une chaleur intense et des pressions élevées:

En quelques dizaines de microsecondes, les réactions nucléaires sont terminées. L'énergie produite par les rayonnements vaporise la roche, ce qui entraîne une forte accumulation de pression et une onde de choc intense.

En quelques centaines de microsecondes, l'onde de choc transforme la roche

environnante et la chaleur produite vaporise et fait fondre le sol et les matières environnantes.

En quelques dizaines de millisecondes, la cavité se stabilise et la lave fondue coule vers le fond pour former un bassin lenticulaire appelé "ménisque", qui piège la plupart des radionucléides réfractaires.

En quelques minutes à quelques heures, la roche fondue se solidifie et le plafond de la cavité s'effondre, formant une cavité grossièrement cylindrique. Lorsqu'il refroidit, le sol fondu se solidifie en une lave vitreuse. Enfin, la cavité remplie d'éboulis se remplit d'eau, qui s'infiltre à travers le sol environnant.

Les matières radioactives résiduelles provenant des essais nucléaires souterrains sont, pour la plupart, piégées dans la lave. Certains radionucléides, toutefois, se déposent sur les éboulis et peuvent se mélanger à l'eau présente dans la cavité.

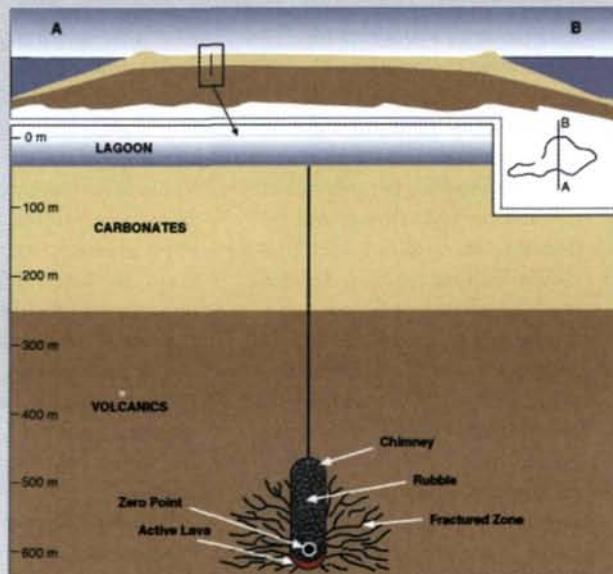
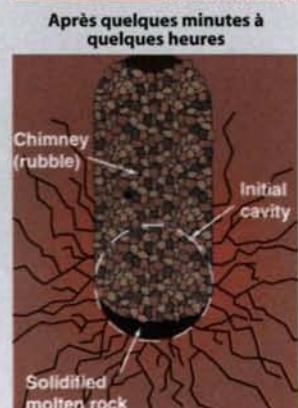
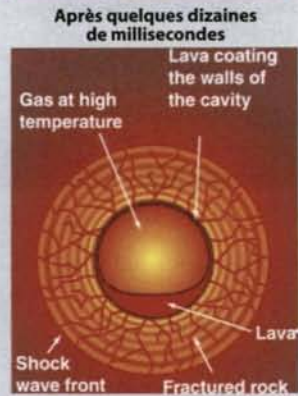
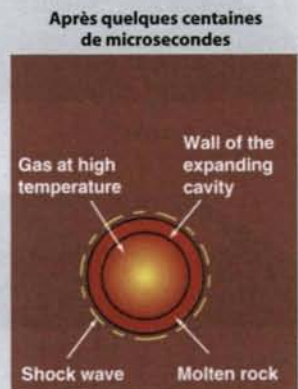
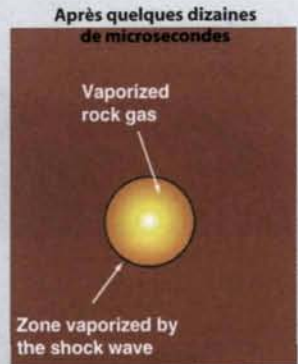


Figure: essai souterrain effectué dans un atoll.



ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES

Des essais d'armes nucléaires atmosphériques ont été effectués en différents endroits à la surface et dans l'atmosphère terrestres. Les engins nucléaires ont notamment été montés sur des tours, placés dans des barges flottant sur l'océan, suspendus à des ballons, lâchés d'avions et lancés à haute altitude par des fusées.

Le nombre d'essais atmosphériques a culminé pendant les périodes 1951-1958 et 1961-1962. En 1959, il a été déclaré un moratoire qui a, en règle générale, été respecté en 1960. Les années les plus importantes en termes de rendement total des explosions ont été 1962, 1961, 1958 et 1954.

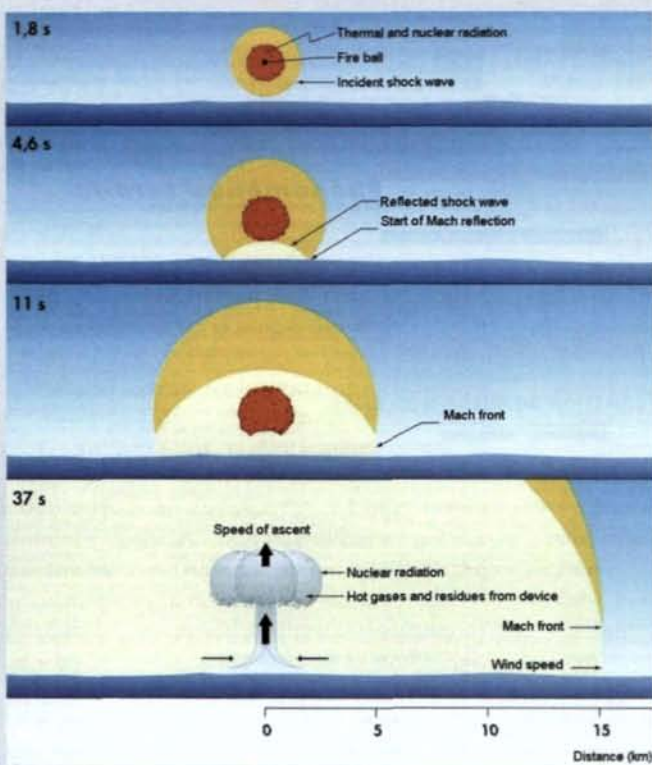
Le nombre total d'essais atmosphériques effectués par l'ensemble des pays s'est élevé à 541, pour un rendement total de 440 mégatonnes. Vingt-cinq essais atmosphériques ont représenté près de 66% du rendement total de tous les essais.

En fonction de l'altitude de l'explosion, les résidus radioactifs ont pénétré l'environnement local, régional ou planétaire. Ils ont produit les doses collectives de rayonnement d'origine humaine les plus élevées enregistrées à ce jour.

Résidus radioactifs. Les résidus radioactifs provenant d'un essai nucléaire atmosphérique se répartissent entre les surfaces terrestres ou aquatiques locales et les régions troposphérique et stratosphérique de l'atmosphère. Leur dépôt dépend du type, du lieu et du rendement de chaque essai.

La partie des résidus radioactifs qui se dépose localement autour du site est appelée "retombées locales". Le reste se disperse dans l'atmosphère sous forme de retombées troposphériques et stratosphériques.

Les retombées locales provenant des essais de surface peuvent comprendre jusqu'à 50% de la production de résidus radioactifs et comprennent



d'importantes particules radioactives sous forme d'aérosols. Ces particules se déposent dans un rayon d'environ 100 kilomètres autour du site d'essai.

Généralement, lorsque l'altitude de la détonation est suffisamment élevée, la boule de feu créée par l'explosion n'atteint pas le niveau du sol. Cela minimise la production de retombées locales (voir figure).

Les retombées troposphériques consistent en des

aérosols de plus petite taille qui ne sont pas transportés à travers la tropopause après l'explosion et qui se déposent pour une durée de séjour moyenne pouvant atteindre un mois. Pendant ce temps, les débris, même s'ils ne sont pas bien mélangés, se dispersent en latitude suivant une trajectoire régie par la direction des vents. Du point de vue de l'exposition humaine, les retombées troposphériques jouent un rôle important car elles renferment des radionucléides ayant une période comprise entre quelques jours et deux mois.

Les retombées stratosphériques, qui forment une grande partie des retombées totales, sont le fait de particules transportées vers la stratosphère. Elles donnent ultérieurement lieu à des retombées planétaires se produisant, pour la plus grande partie, dans l'hémisphère d'injection. Les retombées stratosphériques représentent la majeure partie des résidus de produits de fission à longue période dans le monde.

Ces dernières années, des informations plus détaillées sur les essais d'armes nucléaires atmosphériques ont vu le jour. On a, en particulier, corrigé le nombre et le rendement des explosions et l'on a estimé les résidus radioactifs déposés par les retombées locales.

construite à Lanzhou dans la province de Gansu. Le réacteur de production a été mis en service en 1967, et l'usine de retraitement en 1968. Des activités de production de plutonium et de retraitement ont été mises en œuvre au complexe de Jinquan, également dans la province de Gansu, où des armes ont été assemblées. Des activités de production et de retraitement ont également eu lieu à Guangyuan, dans la province de Sichun, où des installations plus importantes ont été construites.

Dans le monde, certains des sites de production de matières nucléaires à vocation militaire ont intégré des activités liées à des programmes civils de production d'énergie nucléaire. Sur certains d'entre eux ont lieu des activités de démantèlement d'armes nucléaires.

Des quantités relativement élevées de résidus radioactifs ont été libérées dans l'environnement pendant les premières années d'exploitation de certaines de ces installations alors que de fortes pressions s'exerçaient pour faire respecter les calendriers de production et que les contrôles étaient parfois lâches. De surcroît, plusieurs accidents se sont combinés pour accroître le volume des rejets, en particulier dans l'ancienne Union soviétique (*voir encadré page suivante*).

Les quantités de résidus radioactifs provenant de la production de matières nucléaires à vocation militaire ne sont pas pleinement connues. L'UNSCEAR continue de rassembler et de publier les informations fournies par les États.

LES PERSPECTIVES

L'évolution récente de la situation permet d'être optimiste en ce qui concerne la production et la manipulation des résidus de la guerre froide:

■ Le 22 septembre 1995, la Conférence générale de l'AIEA a abordé la question des conséquences radiologiques des essais d'armes nucléaires. Dans une résolution qui fera date, elle a appelé tous les États concernés à assumer leurs responsabilités, c'est-à-dire de faire en sorte que les sites où des essais nucléaires ont été effectués soient surveillés scrupuleusement et de prendre les mesures appropriées pour éviter tout effet néfaste sur la santé, la sûreté et l'environnement pouvant résulter de ces essais.

■ En septembre 1998, la Conférence générale de l'AIEA — tout en rappelant sa résolution de 1995 et en se félicitant des conclusions encourageantes de l'étude consacrée à Mururoa et à Fangataufa — a souligné que ces conclusions ne devaient pas servir à justifier la mise au point et les essais d'armes nucléaires, et elle a prié le directeur général de l'AIEA de rendre compte de l'évolution de la situation dans ce domaine.

■ La Conférence générale de 1998 a en outre instamment prié tous les États d'adhérer au Traité d'interdiction complète des essais nucléaires. Elle a également exhorté tous les États, en particulier ceux ayant les moyens de produire des matières fissiles, à soutenir les négociations menées en vue de l'élaboration d'un traité interdisant la production de matières fissiles destinés à des armes nucléaires ou à d'autres engins explosifs nucléaires. Enfin, la Conférence sur le désarmement a décidé d'engager des négociations concernant ce traité.

■ Les représentants américains et russes participant à la Conférence générale de l'AIEA en 1998 ont décidé d'attirer des entreprises commerciales dans dix villes nucléaires russes. Aux termes de cet accord, les États-Unis feront profiter les dix villes russes de leur expérience des entreprises privées et mettront en rapport des

entreprises privées américaines et des installations russes correspondantes pour fabriquer, commercialiser et vendre des produits commerciaux. Une démarche analogue a été tentée dans des villes nucléaires américaines telles que Hanford et Oak Ridge.

■ Un accord récent conclu entre la Norvège et la Russie institue une coopération dans plusieurs domaines. Il porte sur le déclassé du combustible nucléaire usé provenant de sous-marins à propulsion nucléaire; la mise en service d'une installation de stockage temporaire dans la baie d'Andreïeva à Mourmansk (péninsule de Kola); la mise en service d'installations de stockage provisoire de résidus radioactifs à Tchéliabinsk et sur un chantier naval à Severodvinsk (Arkhangel'sk); et le démantèlement, à Mourmansk, d'une structure flottante stockant actuellement plus de 600 conteneurs endommagés et dangereux de combustible nucléaire usé provenant de navires à propulsion nucléaire.

L'AIEA continue, dans ce contexte mondial évolutif, d'aider les pays à gérer l'héritage radiologique de la guerre froide. Il est encourageant de noter que les organisations non gouvernementales soucieuses de protection de l'environnement appuient les efforts déployés par l'Agence*.

Lors de la Conférence de 1998 consacrée à l'étude de la situation radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa, le directeur général de l'AIEA, Mohamed ElBaradei, a résumé

**Lors de la Conférence de l'AIEA sur l'Étude de Mururoa tenue en 1998, le représentant de Greenpeace International a déclaré que "l'Étude pourrait servir de modèle pour des études analogues d'anciens sites d'essais nucléaires".*

PRODUCTION DE MATIÈRES NUCLÉAIRES DANS L'ANCIENNE UNION SOVIÉTIQUE

Trois sites de l'ancienne Union soviétique ont été d'importants centres de production de matières destinées aux armements nucléaires:

■ Le complexe de production de matières nucléaires **Mayak** est situé dans la région de Tchéliabinsk, entre les villes de Kychtym et de Kasli, à proximité de la rive orientale du lac Irtyach. L'exploitation de réacteurs à uranium-graphite pour la production de plutonium et d'une usine de retraitement a commencé en 1948. Des rejets relativement importants de matières radioactives dans la rivière Techa proche se sont produits entre 1949 et 1956. Un contrôle des rejets, initialement inexistant, a été introduit au début des années 60. Plus de 100 PBq de produits de fission et d'isotopes de plutonium ont été rejetés sous forme d'effluents dans l'atmosphère et dans la rivière Techa entre 1949 et 1956. En avril-mai 1951, une forte inondation a entraîné la contamination de la plaine alluviale utilisée pour l'élevage et la fenaison. En 1956, les habitants des sections les plus élevées de la rivière se sont installés ailleurs et la partie la plus contaminée de la plaine alluviale a été enclose. Pour certains habitants, cependant, la contamination de la rivière Techa est restée une source importante d'exposition jusqu'à ce jour.

Le 29 septembre 1957, une panne du système de refroidissement d'un réservoir de stockage contenant des déchets radioactifs liquides a entraîné une explosion chimique et à une importante libération de radionucléides. L'activité totale dispersée hors-site sur le territoire des régions de Tchéliabinsk, de Sverdlovsk et de Tioumen s'est élevée à environ 74 PBq. Une nouvelle contamination par des résidus radioactifs liés à l'exploitation du complexe Mayak s'est produite en 1967, lorsque le niveau de l'eau du lac Karachai, qui avait été utilisé pour l'élimination des déchets, a baissé, le vent entraînant une resuspension des sédiments contaminés de la côte.

■ Le complexe de production de matières nucléaires de **Krasnoïarsk** est situé à environ 40 kilomètres de la ville de Krasnoïarsk. Le premier réacteur de Krasnoïarsk (à cycle direct) a été commandé en 1958, le deuxième en 1961 et le troisième (en circuit fermé) en 1964. Une usine radiochimique de retraitement du combustible irradié a été mise en exploitation en 1964. Les rejets de déchets radioactifs provenant du complexe de Krasnoïarsk se jettent dans le fleuve Ienisseï. Une contamination par les éléments traces peut être observée depuis Krasnoïarsk jusqu'à l'estuaire du fleuve quelque 2000 kilomètres en aval. En 1992, deux des trois réacteurs du complexe de Krasnoïarsk ont été mis hors service. Cette mesure a considérablement réduit les quantités de rejets radioactifs déversés dans l'Ienisseï.

■ Le complexe de **Tomsk** est situé sur la rive droite de la rivière Tom à 15 kilomètres au nord de la ville de Tomsk. Il a été commandé en 1953 et est le plus grand complexe destiné à la production de plutonium, d'uranium et d'éléments transuraniens de la Fédération de Russie. Le complexe de Tomsk comprend des réacteurs de production d'uranium-graphite, des installations d'enrichissement et de fabrication de combustible, et une usine de retraitement. Les radionucléides présents dans les déchets liquides pénètrent dans la rivière Tom, qui se jette dans le fleuve Ob. Entre 1990 et 1992, trois des réacteurs du complexe de Tomsk ont été mis hors service, ce qui a considérablement réduit les quantités de rejets radioactifs déversés dans la rivière Tom.

Le 6 avril 1993, un accident s'est produit à l'usine radiochimique, entraînant la libération de matières radioactives. Les conséquences radiologiques de l'accident ont été évaluées par l'AIEA. Une fine trace de faible contamination radioactive de 35 à 45 kilomètres de long s'est formée vers le nord-est. Le village de Georgievka est le seul endroit habité de la région.

ainsi le rôle joué par l'Agence: si la responsabilité de la sûreté incombe en premier lieu aux gouvernements nationaux, l'AIEA joue un rôle fondamental sous la forme de trois activités complémentaires: "élaboration d'accords internationaux juridiquement contraignants et suivi de leur application; établissement d'un ensemble complet de normes de sûreté non contraignantes; et offre d'une aide à l'application de ces normes".

Le rôle de l'AIEA, en matière d'évaluation radiologique, a ajouté le Dr ElBaradei, "consiste à être objective et scientifiquement crédible", en soulignant que l'Agence demeure disposée à

répondre à toute nouvelle demande dans ce domaine.

Épilogue: vers la fin de 1998, le Gouvernement algérien a soumis à l'AIEA une demande de projet de coopération technique ayant pour objet de "quantifier la contamination radioactive causée par des explosions nucléaires [en Algérie], d'évaluer l'impact radiologique sur la population locale et d'établir un plan de surveillance des anciens sites d'essais nucléaires". Cette demande a été présentée au Conseil des gouverneurs de l'AIEA en décembre 1998 et accueillie favorablement.

Dans le même temps, la communauté internationale commence à tirer de plus amples

enseignements d'un autre héritage radiologique potentiel de la guerre froide: les puissantes sources de rayonnements utilisées autrefois à des fins militaires et qui, aujourd'hui, ne font l'objet d'aucune réglementation ou sont abandonnées. Récemment, la République de Géorgie, confrontée à une situation d'urgence radiologique, a sollicité l'aide de l'AIEA. Deux puissantes sources de rayonnements ont été trouvées, l'une abandonnée le long d'une rivière, l'autre, sans aucune protection, dans la campagne à proximité d'une ville frontalière.

L'an dernier, les autorités géorgiennes ont signalé avoir trouvé plus de cinquante sources de rayonnements abandonnées, probablement d'origine militaire. □