

Evaluation radiologique: l'immersion des déchets dans les mers arctiques

Résumé des résultats d'une étude financée par l'AIEA sur l'impact radiologique du rejet de déchets radioactifs de haute activité dans les mers arctiques

Il y a presque cinq ans, en 1992, l'annonce que l'ex-Union soviétique avait déversé des déchets radioactifs dans les eaux peu profondes des mers arctiques pendant une trentaine d'années fit la manchette des journaux et causa un grand émoi, surtout dans les pays riverains de l'océan Arctique.

L'AIEA a réagi à cette situation, à l'échelle mondiale, en proposant une étude internationale pour évaluer les répercussions de ces rejets sur la santé et l'environnement. Le projet fut appuyé par la Quinzième réunion consultative des Parties contractantes à la Convention pour la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières (Convention de Londres de 1972) qui relève de l'Organisation maritime internationale (OMI), à Londres. La réunion consultative demanda que l'étude comprît un examen des mesures correctives possibles, comme la récupération et l'entreposage terrestre des déchets.

Peu de temps après, en 1993, l'AIEA lança le Projet international d'évaluation des mers arctiques (IASAP)*, dont les principaux objectifs étaient, d'une part, d'évaluer les risques que couraient l'homme et l'environnement par suite du rejet de déchets radioactifs dans les mers de Barents et de Kara et, d'autre part, de dire après examen si les mesures correctives possibles étaient nécessaires et justifiées. L'étude, qui regroupait plus de 50 experts venus de 14 pays et qui était placée sous la direction d'un groupe consultatif international, s'est achevée à la fin de 1996. Financée en partie par des fonds extrabudgétaires fournis par les Etats-Unis, le projet était coordonné avec les travaux du Groupe d'experts russo-norvégien sur la contamination radioactive des régions

nordiques. Le présent article résume les résultats et conclusions de l'IASAP à partir de la synthèse du rapport final de l'étude.

Portée de l'étude

Par l'entremise d'un programme de recherche coordonnée, de contrats techniques, de l'apport de consultants et d'autres mécanismes, l'étude a pu puiser à même une grande variété de compétences dans diverses disciplines. La stratégie adoptée s'est attachée principalement à:

- Examiner la situation radiologique actuelle dans les eaux arctiques afin d'évaluer les preuves de fuites à partir des déchets immergés;
- Prévoir les fuites futures possibles à partir des déchets immergés, notamment en s'attachant tout particulièrement aux objets solides de haute activité qui contiennent la plupart des radionucléides des déchets;
- Modéliser le transport des nucléides immergés dans l'environnement et évaluer l'impact radiologique connexe sur l'homme et le biote;
- Effectuer une étude sur la faisabilité, les coûts et les avantages de mesures correctives possibles appliquées à un type sélectionné d'objet rejeté de haute activité.

D'après les informations contenues dans le «Livre blanc du Président de Russie» (Faits et problèmes liés à l'immersion de déchets radioactifs dans les mers limitrophes du territoire de la Fédération de Russie, 1993), on estime que la quantité totale de déchets radioactifs immergés dans les mers arctiques était d'environ 90 PBq (90×10^{15} Bq) au moment du rejet. Les articles immergés comprennent six réacteurs de sous-marins nucléaires

Le présent article s'inspire de la synthèse de l'étude de l'IASAP qui a été rédigée par le Groupe consultatif du projet. Mme K.-L. Sjöblom, de la Section de la sûreté des déchets de la Division de la sûreté radiologique et de la sûreté des déchets de l'AIEA, était administrateur du projet de l'IASAP.

*L'historique de l'étude effectuée dans le cadre de l'IASAP et les premiers résultats obtenus ont été exposés dans un article de K.-L. Sjöblom et G.S. Linsley dans le *Bulletin de l'AIEA*, vol. 37, n° 2 (1995).

et un assemblage de blindage du réacteur d'un brise-glace, contenant tous du combustible irradié; dix réacteurs vidés de leur combustible, ainsi que des déchets solides et liquides de faible activité. De la quantité totale estimée, 89 PBq étaient contenus dans des déchets de haute activité comprenant des réacteurs avec ou sans combustible irradié. Les déchets solides, notamment les réacteurs mentionnés plus haut, ont été immergés dans la mer de Kara, principalement dans les eaux peu profondes des fjords de Nouvelle-Zemble où la profondeur varie entre 12 et 135 mètres au point d'immersion, et dans la fosse de Nouvelle-Zemble où la profondeur peut atteindre 380 mètres. Les déchets liquides de faible activité ont été immergés au large, dans les mers de Barents et de Kara.

D'autres informations concernant le caractère des déchets ont été obtenues à partir des contrats techniques accordés à des instituts russes. Les données disponibles, toutefois, continuent de souffrir d'importantes lacunes. Il est toujours impossible, par exemple, de localiser ou d'identifier correctement tous les déchets de haute activité immergés. Plus encore, certaines informations se rapportant notamment à la construction des réacteurs des sous-marins immergés et à leur sorte de combustible sont toujours protégées. Ainsi, les conclusions de l'étude de l'IASAP ne sont valables que dans le contexte des renseignements disponibles au moment où elle a été achevée.

Les résultats de l'étude de l'IASAP seront publiés dans le rapport intitulé *Assessment of the Impact of Radioactive Waste Dumping in the Arctic Seas — Report of the International Arctic Seas Assessment Project (IASAP)*. En outre, des rapports présentant les résultats de trois différents groupes de travail seront publiés séparément; ils couvrent: (i) la description écologique et radiologique des mers arctiques; (ii) l'évaluation du terme source; (iii) la modélisation et l'évaluation des doses. La synthèse de l'étude a été distribuée aux Parties contractantes à la Convention de Londres de 1972 comme convenu à la Quinzième réunion consultative.

La situation radiologique actuelle

La situation radiologique actuelle dans les mers arctiques a été examinée en analysant les informations recueillies durant une série conjointe de croisières d'exploration russo-norvégiennes et d'expéditions internationales dans la mer de Kara. D'autres études océanographiques et radiogéochimiques, dont plusieurs se rattachent au thème de l'étude de l'IASAP, ont fourni de nouvelles informations sur les conditions et les processus physiques, chimiques, radiochimiques et biologiques des mers arctiques*. Au large, la mer de Kara est relativement peu contaminée, comparativement

à certaines autres régions marines, étant donné que les radionucléides artificiels qui s'y trouvent proviennent en majeure partie des dépôts atmosphériques directs et de l'entraînement par ruissellement des retombées mondiales dues aux essais nucléaires, des rejets des usines de retraitement en Europe occidentale et des retombées de l'accident de Tchernobyl.

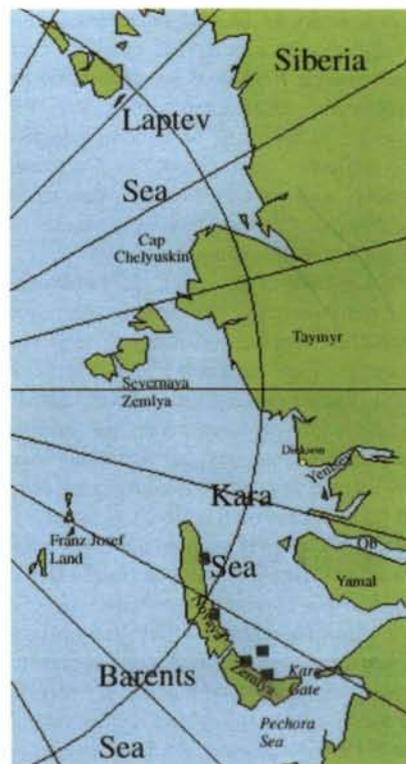
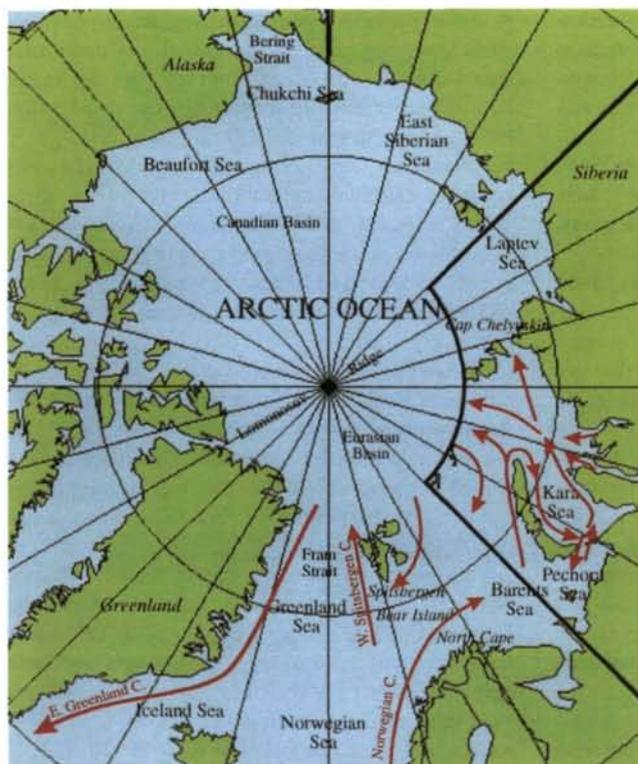
Divers relevés de matières dans l'environnement laissent supposer que les doses annuelles individuelles dues aux radionucléides artificiels dans les mers de Barents et de Kara ne sont que de l'ordre de 1 à 20 microsieverts (μSv). Dans deux des fjords où les déchets de haute et de faible activité ont été immergés, on a mesuré des niveaux élevés de radionucléides dans des sédiments situés à quelques mètres des conteneurs de déchets de faible activité, ce qui pousse à croire que des fuites se sont produites. Toutefois, ces dernières n'ont pas provoqué d'augmentation mesurable des radionucléides aux limites extérieures des fjords ou, au large, dans la mer de Kara. Ainsi, pour le moment, l'impact radiologique des déchets immergés demeure négligeable.

La situation radiologique future

L'évaluation des risques de fuites futures possibles à partir des déchets immergés a porté principalement sur les objets de haute activité contenant la majeure partie des déchets radioactifs. Les débits de rejet de ces déchets ont été estimés et des doses de rayonnement correspondantes pour l'homme et le biote ont été évaluées à l'aide de modèles mathématiques de transfert de radionucléides dans l'environnement.

Stock des sources et débits de rejet. Les caractéristiques des réacteurs immergés et leur historique d'exploitation ont été examinés de façon très approfondie afin d'élaborer des scénarios pertinents des débits de rejet comme données d'entrée pour la modélisation des voies de transport et d'exposition en vue d'estimer l'exposition des êtres humains et du biote. Ces informations, basées sur les historiques d'exploitation de réacteurs et les spectres neutroniques estimés, ont permis de calculer les quantités de produits de fission, de produits d'activation et d'actinides présentes dans les réacteurs et assemblages combustibles immergés. On en a conclu que la quantité totale de radionucléides des objets rejetés de haute activité lors de l'immersion était de 37 PBq. La différence entre cette valeur et le calcul estimatif préliminaire de 89 PBq mentionné dans le Livre blanc russe peut s'expliquer par les données plus exactes que les autorités russes

* Pour plus de renseignements concernant les études écologiques des mers arctiques, voir l'article de P. Povinec, I. Osvath et M. Baxter dans le *Bulletin de l'AIEA*, vol. 37, n° 2 (1995).



L'océan
Arctique
et les mers
de Barents
et de Kara

La carte de droite montre les lieux d'immersion de déchets de haute activité sur la côte orientale de la Nouvelle-Zemble; la carte de gauche montre les principaux courants marins à prendre en considération pour l'évaluation radiologique des mers arctiques. (AIEA-LEM)

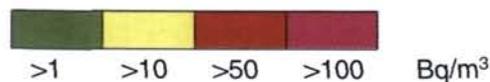
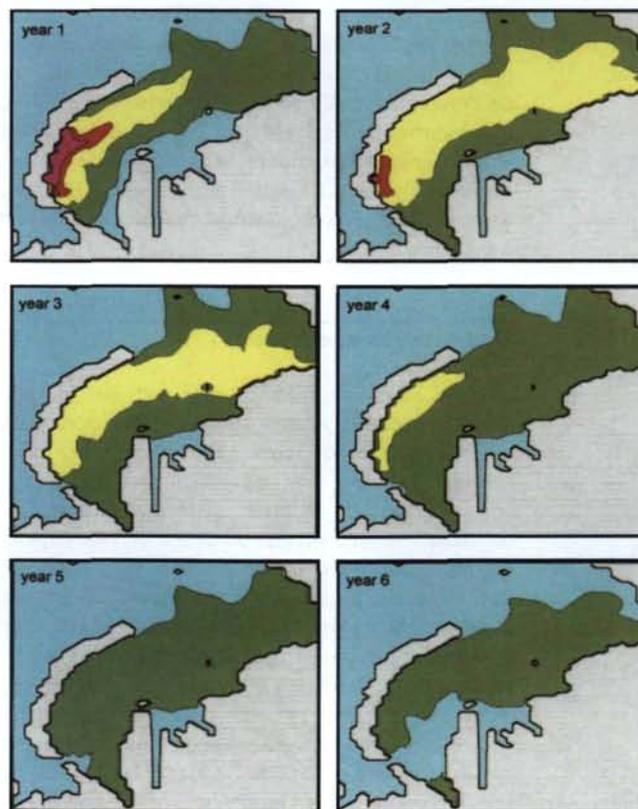


Photo: Des océanographes prélèvent des échantillons d'eau des mers arctiques pour les analyser (AIEA-LEM). Graphiques: Concentrations prévues de césium 137 dans l'eau de mer au cours des six premières années suivant des rejets instantanés dans tous les lieux d'immersion. Cette sorte de prévision a été utilisée pour déterminer les populations susceptibles d'être exposées. (Ingo Harms/AIEA-LEM)

ont fournies à l'IASAP sur le dossier d'exploitation réelle des réacteurs. La quantité correspondante présente en 1994 dans les déchets de haute activité immergés a été estimée à 4,7 PBq répartis comme suit: 86 % de produits de fission, 12 % de produits d'activation et 2 % d'actinides. Les principaux radionucléides dans ces catégories sont le strontium 90, le césium 137, le nickel 63 et le plutonium 241, respectivement.

Les débits de rejet de radionucléides dans l'environnement dépendront de l'intégrité des matières formant la structure des réacteurs, des barrières ajoutées avant l'immersion et du combustible nucléaire lui-même. Pour chaque article de haute activité immergé, la construction et la composition des barrières ont été examinées en détail, les points faibles ont été déterminés et les meilleures estimations des vitesses de corrosion et de la durée de vie des barrières ont été utilisées pour calculer les taux de rejet. Des événements extérieurs, comme la collision avec des navires ou, plus généralement, l'érosion glaciaire des fjords à la suite du refroidissement de la planète, pourraient endommager l'enveloppe de sécurité, ce qui entraînerait des fuites plus rapides de radionucléides dans l'environnement. Pour représenter correctement la fourchette possible de débits de rejet dans l'environnement, trois scénarios de fuite ont été retenus:

- Le scénario le plus réaliste — la corrosion progressive des barrières, des conteneurs de déchets et du combustible lui-même provoque une fuite;

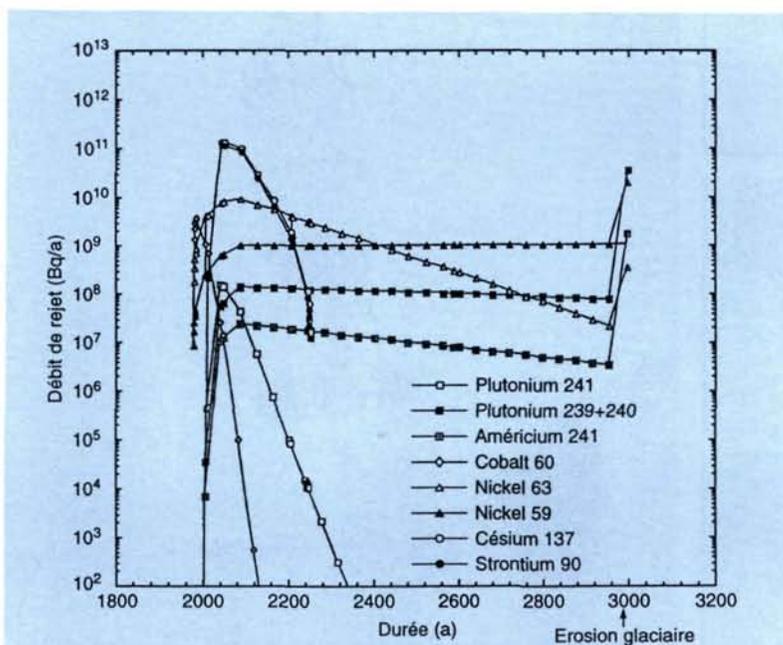
- Le scénario du pire cas envisageable — à la suite de la corrosion progressive normale, la dislocation catastrophique de deux sources sur le même lieu d'immersion (le conteneur de combustible et le compartiment du réacteur du brise-glace) se produit en 2050, ce qui provoque la libération accélérée des autres radionucléides de ces sources;

- Le scénario des changements climatiques — la corrosion normale se poursuit jusqu'en l'an 3000 et est suivie de la libération instantanée des autres radionucléides de toutes les sources, à cause de l'érosion glaciaire.

Il convient de noter qu'aucune tentative n'a été faite pour assigner des probabilités aux événements mentionnés dans les scénarios du pire cas envisageable et des changements climatiques, et que les conséquences ont été évaluées en supposant que ces événements se produiraient au cours de l'année indiquée.

S'agissant du scénario le plus réaliste, le débit de rejet combiné de toutes les sources culmine à environ 3 000 GBq/a ($1 \text{ GBq} = 10^9 \text{ Bq}$) pour les 100 prochaines années et comporte une seconde pointe d'environ 2 100 GBq/a dans quelque 300 ans. Pour la majeure partie du temps qui reste, les débits totaux de rejet varient entre 2 et 20 GBq/a. Selon le scénario du pire cas envisageable, une pointe de rejet de 110 000 GBq se produirait, suivie de rejets de l'ordre de 100 à 1 000 GBq/a pour les quelques centaines d'années suivantes à cause de la libération accélérée de radionucléides provenant du conteneur de combustible et du compartiment du réacteur du brise-glace. Dans le scénario des changements climatiques, selon lequel l'érosion glaciaire provoquerait une libération instantanée de tous les autres déchets dans 1 000 ans, le rejet dans l'environnement atteindrait environ 6 600 GBq.

Exemples de débits de rejet prévus



Le graphique montre des exemples de débits de rejet prévus dans le cas du scénario des changements climatiques appliqué à un réacteur unique immergé dans la fosse de Nouvelle-Zemble. On suppose que le rejet de différents radionucléides serait causé par la corrosion jusqu'en l'an 3000, puis que toutes les barrières éclateraient, par érosion glaciaire, entraînant le rejet de tous les autres radionucléides. (Neil Lynn, Royal Naval College, R.-U./Akira Wada, Nihon University, Japon)

Modélisation et évaluation

Les débits de rejet estimés ont été utilisés, avec des modèles mathématiques du comportement des radionucléides dans l'environnement, pour estimer la dose de rayonnement reçue par les personnes et le biote. Différentes stratégies de modélisation ont été adoptées et des experts de plusieurs pays et de l'AIEA ont participé aux travaux. De grands efforts ont été consacrés à la synthèse des informations existantes sur l'écologie marine, l'océanographie et la sédimentologie de la région cible pour qu'elles servent de base au développement des modèles. Il a été établi que certains processus étaient spécifiques à la région et qu'il pouvait par conséquent être utile de les incorporer aux modèles. Vu la nécessité d'élaborer des prévisions pour des échelles spatiales et temporelles très diverses, différents modèles de dispersion des radionucléides à l'intérieur et à l'extérieur de l'océan Arctique ont été mis au point.

Doses individuelles annuelles totales maximales reçues par certains groupes de population
(Doses en microsieverts)

Scénario	Doses annuelles reçues par les consommateurs de fruits de mer (Groupes 1 et 3)	Doses annuelles reçues par les militaires (Groupe 2)
Scénario le plus réaliste	< 0,1	700
Scénario du pire cas envisageable	< 1	4000
Scénario des changements climatiques	0,3	3000

Notes:

1 microsievert = 10^{-6} Sv.

Pour remettre les choses en perspective, les doses annuelles aux groupes critiques 1 et 3 dues au polonium 210 naturel contenu dans les fruits de mer sont de 500 et 100 μ Sv, respectivement.

La dose annuelle moyenne totale imputable au fond naturel de rayonnement à travers le monde est de 240 μ Sv.

Deux principales stratégies de modélisation ont été adoptées: les modèles compartimentés et les modèles de circulation hydrodynamique. De plus, un modèle hybride (utilisant la structure compartimentée, mais à une échelle spatiale à haute résolution) a été développé et appliqué. En modélisant la dispersion par advection et par diffusion, les modèles compartimentés fournissent des prévisions de longue durée, de spatialité moyenne et de champ lointain, tandis que les modèles hydrodynamiques donnent des résultats à résolution locale et de courte durée.

Une attention particulière a été accordée à l'une des voies de transfert les moins quantifiées, à savoir le transfert mer-glace. Un simple calcul exemplaire ou étude de portée a montré que, dans le cas des sources de déchets radioactifs examinées ici, le transfert mer-glace ne contribuerait que faiblement à la dose individuelle comparativement au transfert des radionucléides dans l'eau.

Pour estimer les doses individuelles, trois groupes de population ont été retenus. Le calcul des doses individuelles a porté sur les laps de temps couvrant les débits de dose individuels maximaux dans chacun des trois scénarios à l'étude. Les trois groupes de population choisis se caractérisent comme suit:

Groupe 1. Personnes habitant soit les estuaires de l'Ob et de l'Iénisséi, soit les péninsules de Taïmyr et de Yamal, et s'alimentant surtout de poissons, mammifères marins, oiseaux de mer et leurs œufs, pris localement dans la mer de Kara. Elles passent environ 250 heures par année sur le bord de mer et leurs habitudes sont typiques des collectivités qui dépendent du poisson dans d'autres pays riverains de l'océan Arctique.

Groupe 2. Population hypothétique de militaires patrouillant, pour des périodes supposées de 100 heures par année, les estrans des fjords où des matières radioactives ont été immergées. Les voies d'exposition examinées comprennent l'irradiation externe et l'inhalation d'embruns et de sédiments remis en suspension.

Groupe 3. Population de consommateurs de fruits de mer considérée comme représentative de

la population de la Russie septentrionale, habitant la péninsule de Kola et se nourrissant de poissons, mollusques et crustacés pêchés dans la mer de Barents. Aucune attention n'a été accordée à la consommation d'algues ou de mammifères marins, ni à l'irradiation externe.

Doses individuelles annuelles totales maximales reçues par certains groupes de population

Les doses individuelles annuelles totales reçues par chaque groupe critique de consommateurs de fruits de mer (groupes 1 et 3) des trois scénarios sont faibles et très inférieures aux variations des doses dues au fond naturel de rayonnement (voir tableau). Les doses reçues par le groupe critique hypothétique de militaires patrouillant les fjords (groupe 2) sont plus élevées, mais comparables néanmoins aux doses dues au fond naturel de rayonnement.

Les doses collectives ont été estimées seulement dans le cas du scénario le plus réaliste de débit de rejet. La dose collective reçue par la population mondiale par suite de la dispersion de radionucléides (autres que le carbone 14 et l'iode 129) dans les océans du globe a été estimée pour deux périodes de temps: (i) jusqu'à 2050 pour fournir des informations sur la dose collective reçue par la génération actuelle; (ii) les 1 000 prochaines années, soit un laps de temps qui couvre les rejets maximaux estimés.

Vu les incertitudes croissantes entourant les prévisions des événements, processus et développements futurs, il n'a pas été jugé utile d'étendre l'évaluation au-delà de 1 000 ans. Les doses collectives estimées pour les deux périodes de temps sont de 0,01 et de 1 homme-Sv, respectivement. Les estimations illustrent partiellement la distribution temporelle de la dose.

Des modèles appropriés de circulation mondiale ont servi à estimer les doses collectives dues au carbone 14 et à l'iode 129, deux radionucléides de longue période qui circulent partout dans

Principales conclusions du Projet international d'évaluation des mers arctiques

- **La surveillance a montré que les rejets provenant d'objets immergés identifiés sont faibles et localisés dans le voisinage immédiat des lieux d'immersion.** En général, les niveaux de radionucléides artificiels dans les mers de Barents et de Kara sont faibles et les doses de rayonnement correspondantes sont négligeables comparativement à celles qui découlent de sources naturelles. Les mesures faites dans l'environnement laissent supposer que les doses individuelles annuelles actuelles dues aux radionucléides artificiels dans les mers de Barents et de Kara vont de 1 à 20 μ Sv au maximum. Ces doses sont principalement imputables aux retombées mondiales des essais nucléaires, aux rejets des usines de retraitement de combustible nucléaire en Europe occidentale et aux retombées de l'accident nucléaire de Tchernobyl.
- **Les doses futures prévues aux personnes du public dans des groupes de populations locales types dues aux déchets radioactifs immergés dans la mer de Kara sont très faibles (moins de 1 μ Sv).** Les doses futures prévues à un groupe hypothétique de militaires patrouillant les estrans des fjords où des déchets radioactifs ont été immergés sont plus élevées (jusqu'à 4 000 μ Sv), mais du même ordre que la dose moyenne due au fond naturel de rayonnement.
- **Les doses à la faune marine sont négligeables, étant inférieures de plusieurs ordres de grandeur à celles qui pourraient avoir des effets préjudiciables sur les populations fauniques.** En outre, elles ne concernent qu'une faible proportion des populations fauniques locales.
- **Pour des motifs purement radiologiques, les mesures correctives ne se justifient pas.** Les contrôles de l'occupation des plages et de l'utilisation des ressources marines et des infrastructures sur la côte des fjords de la Nouvelle-Zemble utilisés comme lieux d'immersion doivent toutefois être maintenus. Cette condition est motivée par le souci de tenir compte de l'éventualité d'une perturbation fortuite ou d'une récupération des déchets radioactifs de haute activité ainsi que d'assurer la protection radiologique du groupe hypothétique d'individus occupant les plages adjacentes des fjords.

Recommandations du Projet international d'évaluation des mers arctiques

- Il faudrait s'efforcer de localiser et d'identifier les déchets de haute activité.
- Il faudrait maintenir le contrôle institutionnel de l'accès non seulement dans les milieux terrestre et marin des fjords de la Nouvelle-Zemble où des déchets ont été immergés, mais aussi dans leurs environs, ainsi que des activités qui s'y déroulent.
- Si à un moment donné de l'avenir il est proposé de mettre fin au contrôle institutionnel de zones situées dans les fjords ou leurs environs, il faudra d'abord procéder à une évaluation des doses que recevrait tout nouveau groupe d'individus susceptible d'être exposé.
- Dans le but de déceler tout changement d'état des déchets de haute activité immergés, il faudrait envisager de mettre sur pied un programme limité de surveillance écologique sur les lieux d'immersion.

les milieux aquatique, atmosphérique et terrestre. En supposant que la quantité totale de carbone 14 présente dans les déchets a été immergée vers l'an 2000 et en intégrant la dose à la population mondiale sur les 1 000 prochaines années (c'est-à-dire jusqu'en l'an 3000), on en arrive à une dose collective d'environ 8 homme-Sv. La valeur correspondante pour l'iode 129 est bien inférieure puisqu'elle n'est que de 0,0001 homme-Sv. Ainsi, la dose collective totale imputable à tous les radionucléides contenus

dans les déchets immergés que recevrait la population mondiale au cours des 1 000 prochaines années serait de l'ordre de 10 homme-Sv. Par contraste, la dose collective annuelle à la population mondiale due au polonium 210 naturel dans l'océan estimée dans d'autres études est plus élevée d'environ trois ordres de grandeur. Il est aussi instructif de comparer la dose collective imputable aux déchets immergés dans la mer de Kara avec la dose collective imputable aux déchets de faible activité immergés dans le nord-est de l'Atlantique. Dans ce dernier cas, la dose collective à la population mondiale serait de 1 homme-Sv sur une période de 50 ans et de 3 000 homme-Sv sur une période de 1 000 ans.

Les débits de dose de rayonnement ont été estimés pour une gamme de populations d'organismes sauvages, allant du zooplancton aux baleines, et se sont révélés très faibles. Les débits de dose les plus élevés que cette évaluation ait prévus sont d'environ 0,1 milligray par heure (mGy/h), soit un débit de dose qui est considéré comme peu susceptible de provoquer des effets préjudiciables sur les taux de morbidité, de mortalité, de fécondité et de mutation qui pourraient influencer sur le maintien d'une population en bonne santé. Il convient aussi de faire remarquer que seule une faible proportion de la population biotique des écosystèmes locaux pourrait être affectée par les rejets.

Mesures correctives

Faisabilité et coûts. Une étude préliminaire de la faisabilité et des coûts a porté sur cinq mesures

correctives visant le conteneur de combustible irradié du brise-glace nucléaire. Cette source a été choisie précisément parce qu'elle contenait la quantité la plus importante de radionucléides parmi les objets immergés, et que sa construction était la mieux documentée et comprenait des barrières de confinement pour la première fois.

Les cinq options retenues au départ pour faire l'objet d'une évaluation étaient les suivantes:

Option 1. Injecter des matériaux en vue de réduire la corrosion et d'assurer un barrière supplémentaire contre les fuites.

Option 2. Enrober *in situ* l'objet au moyen de béton ou de tout autre matériau approprié.

Option 3. Récupérer l'objet pour le placer dans un milieu terrestre.

Option 4. Evacuer l'objet dans une grotte sous-marine sur la côte de la Nouvelle-Zemble.

Option 5. Récupérer l'objet et le transporter sous l'eau vers les fonds océaniques.

Après avoir examiné ces options en détail, des experts en récupération ont éliminé les options 1, 4 et 5. L'option 1 a été abandonnée parce que le colis de combustible irradié a déjà été rempli d'un polymère spécial, le furfurol (F), ce qui pourrait compliquer l'injection d'un nouveau matériau. L'option 4 a été écartée parce que la création d'une grotte sous-marine reviendrait trop cher pour une seule source et devrait se justifier dans un contexte plus vaste. L'option 5 a aussi été mise de côté parce que, tout d'abord, l'obtention d'une autorisation en vertu de la Convention de Londres de 1972 demeure douteuse pour une activité qui exige la réimmersion d'un déchet de haute activité dans l'océan et que le transport sous l'eau en haute mer risquerait indûment d'entraîner la perte du colis en route vers son nouveau lieu d'immersion.

L'évaluation finale des mesures correctives s'est donc réduite aux deux options qui restaient, soit l'enrobage *in situ* et la récupération avant le traitement ou l'évacuation sur la terre ferme. Les deux options ont été jugées techniquement faisables. On a estimé que le coût des opérations marines varierait entre 6 et 10 millions de dollars des Etats-Unis. Il est important de signaler, dans le cas de l'option de récupération, que des coûts supplémentaires importants viendraient s'ajouter à ceux qui sont mentionnés ici, afin de couvrir le transport, le traitement, l'entreposage et/ou l'évacuation sur la terre ferme. La radioexposition du personnel chargé des mesures correctives a été prise en compte, de même que la possibilité d'un accident de criticité. L'évaluation a conclu que, à condition de prendre les précautions voulues et de mener les études techniques proposées comme base pour réaliser les mesures correctives, les risques radiologiques auxquels le personnel chargé de l'application de ces mesures serait exposé ne devraient pas être importants.

Considérations sur la radioprotection et justification de l'intervention. Les concepts fondamentaux de radioprotection qui s'appliquent au projet sont ceux que la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) recommande et qui font partie des Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements (BSS) de l'AIEA et d'autres organismes internationaux. Ces documents font état de deux catégories de situations où l'homme peut être exposé aux rayonnements: (i) les situations où les mesures de protection sont planifiées à l'avance, avant que les sources de rayonnements soient utilisées et (ii) les autres situations où les sources sont déjà utilisées et où les mesures correctives doivent être envisagées rétrospectivement. On qualifie normalement ces deux situations de «pratiques» et d'«interventions», respectivement.

La situation examinée dans l'étude de l'IASAP relève des interventions. Dans ce cas précis, l'intervention s'appliquerait en principe à la source ou, par suite d'un rejet de radionucléides, aux voies d'exposition dans l'environnement par lesquelles l'homme pourrait lui-même être exposé aux rayonnements. L'intervention appliquée à la source pourrait consister, par exemple, à mettre en place des barrières de protection supplémentaires autour des objets rejetés pour prévenir tout rejet de radionucléides. L'intervention appliquée aux voies d'exposition dans l'environnement pourrait consister à réduire la consommation des denrées contaminées et/ou à limiter l'accès aux régions contaminées. Dans les deux cas, il faut que les mesures correctives soient justifiées selon le principe que l'intervention doit produire plus de bien que de mal, c'est-à-dire que les avantages de l'intervention, y compris la réduction du détriment radiologique, doivent être supérieurs aux désavantages correspondants, y compris le coût et le détriment pour ceux qui se chargent des mesures correctives. En outre, la forme et l'étendue de l'intervention doivent être optimisées pour produire le maximum d'avantages nets.

Il convient d'étudier un certain nombre de facteurs avant de décider des mesures correctives nécessaires. Du point de vue de la radioprotection, les aspects les plus importants sont les suivants:

- Les doses reçues et les risques encourus par les individus le plus exposés (le groupe critique) dans l'hypothèse où des mesures ne seraient pas prises, ainsi que la façon dont leur situation pourrait être améliorée si de telles mesures étaient prises;
- L'impact total sur la santé des populations exposées et les moyens d'éviter cet impact en prenant les mesures correctives voulues. L'impact total sur la santé est proportionnel à la dose collective, c'est-à-dire à la somme des doses individuelles reçues par la population exposée.

Les déchets radioactifs de haute activité immergés dans la mer de Kara et les fjords adjacents

sont placés dans des colis séparés qui peuvent fuir au bout d'un certain temps. Ils engendrent donc un risque d'exposition chronique préoccupant dans la mesure où la dose future aux individus exposés pourrait augmenter par suite de rejets de radionucléides contenus dans les déchets immergés. Selon la condition physique des sources, il semble préférable d'intervenir (assainir) à leur niveau plutôt que de le faire plus tard à un moment quelconque au niveau des voies d'exposition dans l'environnement. La condition préalable de toute intervention est qu'elle soit à la fois justifiée et optimisée.

A l'heure actuelle, il n'existe aucun critère international pour obliger à corriger des situations d'expositions chroniques, sauf dans le cas d'expositions du public au radon, un gaz radioactif naturel, où la ligne de conduite internationale est d'adopter un niveau d'action si la dose annuelle supplémentaire est de l'ordre de 3 à 10 mSv (3 000 à 10 000 µSv). La CIPR, comme l'AIEA, est en train d'élaborer des lignes directrices pour d'autres types d'interventions.

On prévoit que les déchets radioactifs dans les mers de Barents et de Kara entraîneront des doses annuelles futures de moins de 1 µSv aux individus des groupes de population riverains. On estime aussi que le risque de cancer mortel provoqué par une dose de 1 µSv est d'environ 5×10^{-8} , ce qui est négligeable. Les membres des populations locales ne courent donc pas de risque important à cause des déchets immergés. Les doses futures que recevraient les membres du groupe hypothétique de militaires patrouillant les estrans des fjords de Nouvelle-Zemble sont plus élevées que les doses prévues pour les autres membres du public et sont comparables aux doses dues au fond naturel de rayonnement. (La dose de rayonnement annuelle moyenne due au fond naturel de rayonnement, y compris l'exposition au radon, est de 2 400 µSv.) Compte tenu du fait que les doses que recevrait ce groupe hypothétique pourraient être contrôlées au besoin, aucune des doses individuelles calculées ne fait apparaître la nécessité de prévoir des mesures correctives.

Bien que le risque couru par chaque individu puisse être négligeable, lorsqu'il est réparti sur la population entière, certains effets sanitaires imputables à l'exposition supplémentaire sont prévisibles. On considère que ces effets sont proportionnels à la dose collective imputable aux déchets radioactifs immergés. La dose collective à la population mondiale au cours des 1 000 prochaines années due aux déchets radioactifs immergés dans les mers de Barents et de Kara est de l'ordre de 10 homme·Sv. Cette dose collective estimée est faible, mais peut néanmoins être examinée plus à fond avant de décider des mesures correctives nécessaires. Une méthode simplifiée permettant de tenir compte de la dose collective dans la prise de décision est d'assigner une valeur

monétaire au détriment sanitaire évitable si la mesure corrective était appliquée. Si cette méthode indiquait que la mesure corrective était justifiée, une analyse plus détaillée des éléments de la dose collective s'imposerait. Ainsi, il est possible de montrer que l'application à la source unique la plus grande (le colis de combustible irradié du brise-glace nucléaire) de mesures correctives d'un coût supérieur à 200 000 dollars des Etats-Unis n'offrirait pas des avantages suffisants pour être justifiée. Comme l'application de chacune des mesures correctives proposées coûterait plusieurs millions de dollars des Etats-Unis, il est clair que, du point de vue de la dose collective, les mesures correctives ne se justifient pas.

En somme, du strict point de vue de la radio-protection, y compris les doses et le biote, les mesures correctives appliquées aux déchets radioactifs immergés ne sont pas justifiées. Toutefois, pour éviter toute perturbation fortuite ou récupération possible des déchets immergés et étant donné que les doses potentielles au groupe hypothétique de militaires patrouillant les fjords de Nouvelle-Zemble utilisés comme lieux d'immersion ne sont pas négligeables, cette conclusion dépend du maintien d'une forme quelconque de contrôle institutionnel de l'accès et des activités dans le voisinage de ces fjords.

En dernier lieu, il convient de noter que l'étude de l'IASAP n'a porté que sur les aspects radiologiques de la prise de décision concernant la nécessité de prendre des mesures correctives. Les considérations d'ordre politique, économique et social qui doivent occuper une place importante dans le processus décisionnel n'ont pas été abordées et relèvent essentiellement des gouvernements sous la juridiction et la responsabilité desquels se trouvent les déchets radioactifs déversés.