

# RÉSIDUS RADIOACTIFS PROVENANT DES ESSAIS D'ARMES NUCLEAIRES SOUTERRAINS: EVALUATION DE MURUROA LA MIGRATION DES RADIONUCLEIDES DANS LA GEOSPHERE

ROBERT FRY, DES LEVINS ET ERNST WARNECKE

**A**près avoir mis fin à ses essais nucléaires atmosphériques en 1974, le Gouvernement français a effectué, entre 1975 and 1996, 147 autres expériences nucléaires sous les atolls de Mururoa et de Fangataufa. Sur ce nombre, dix étaient des essais de sûreté (destinés à simuler les conditions d'un accident) au rendement faible, voire nul.

On n'a fait exploser, dans le sous-sol de Mururoa et de Fangataufa, aucun engin nucléaire à très haut rendement. Aucun n'a excédé 150 kilotonnes et la libération totale d'énergie produite par tous les essais souterrains s'est élevée, selon les autorités françaises, à 3,2 mégatonnes (*voir tableau page 32*). Il s'est produit dans le monde plus de 1800 essais nucléaires souterrains d'un rendement total de 90 mégatonnes, soit trente fois celui signalé pour les essais français.

Lors des essais nucléaires atmosphériques, la plupart des matières radioactives se dispersent dans l'atmosphère supérieure et se déposent, en fin de compte, dans le monde sous la forme de retombées. Les matières radioactives résiduelles provenant des essais souterrains, en revanche, sont largement confinées dans la roche hôte, même s'il existe un risque de libération de radionucléides dans l'environnement local. Pour évaluer les conséquences radiologiques des essais souterrains, il est nécessaire d'estimer les futures quantités de radionucléides passant de la géosphère dans l'environnement accessible sur des périodes de temps couvrant généralement 10000 ans ou plus.

L'estimation des vitesses de libération des radionucléides à partir de la géosphère a été l'une des tâches les plus complexes et ardues de l'étude globale qui a été faite de la situation prévalant sur les atolls de Mururoa et de Fangataufa. Bien que la géologie des atolls soit à de nombreux égards singulière, la méthodologie utilisée dans le cadre de l'étude peut s'appliquer à l'évaluation de la migration des radionucléides à partir d'autres sites d'essais souterrains.

## LA GÉOLOGIE DE L'ATOLL

Vus de l'air, les atolls ressemblent à des anneaux de corail dépassant de quelques mètres seulement le niveau de la mer. En réalité, il s'agit de massifs monts volcaniques surgissant d'une profondeur d'environ quatre kilomètres et recouverts de plusieurs centaines de mètres de roche carbonatée (provenant d'accrétions coralliennes).

Les éruptions volcaniques qui ont conduit à la formation des atolls se sont produites il y a environ 11 millions d'années. Alimentés par un point chaud situé dans l'écorce terrestre, les volcans ont pris de l'importance, atteignant la surface de l'océan et continuant, pendant quelque temps, comme volcans subaériens. Lorsque l'activité volcanique a cessé, les structures se sont lentement affaissées en raison de leur énorme poids et de la situation isostatique de la plaque Pacifique sous-jacente. Pendant les périodes de glaciation, le niveau de la mer a parfois baissé de 120 mètres, tuant les coraux et exposant le carbonate aux effets de l'érosion

et de la lixiviation par l'eau de pluie. Il est très probable que les karsts (zones interconnectées hautement perméables), que l'on trouve dans les roches carbonatées, se sont formés pendant ces périodes de glaciation.

Aujourd'hui, les roches volcaniques sont parfois recouvertes de 450 mètres de roche carbonatée, dont les parties inférieures ont été transformées en dolomite par des processus d'échange diagénétique avec l'eau de mer environnante.

La base volcanique de l'atoll consiste en un vaste réseau de fissures essentiellement linéaires de différentes tailles. Ces passages conducteurs ont été créés par divers mécanismes: intrusions magmatiques à grande échelle, processus de contraction lors du refroidissement et fissures plus importantes (levées et seuils) produites par des injections magmatiques qui ont eu lieu après le refroidissement de la masse rocheuse volcanique initiale. Ce réseau de fissures est la principale voie de passage de l'eau (et des radionucléides).

Les surfaces de ces passages basaltiques initialement importants

---

*M. Fry a assuré les fonctions de directeur technique de l'AIEA pour l'Étude de la situation radiologique des atolls de Mururoa et de Fangataufa. M. Levins, de l'Australian Nuclear Science and Technology Organization, a présidé le Groupe spécial B. M. Warnecke, fonctionnaire de la Division de la radioprotection et de la sûreté des déchets de l'AIEA, a participé au Groupe de travail 3.*

sont altérées chimiquement par l'écoulement de l'eau et peuvent, au fil du temps, devenir partiellement obstruées par des produits d'altération tels que des argiles et de la calcite. Ces produits d'altération occupent généralement une grande superficie et retiennent très bien certains radionucléides, en particulier les actinides. Ils jouent donc un rôle important dans le ralentissement de la migration des radionucléides dans la géosphère.

## ESSAIS NUCLEAIRES ET EMBLEMES

Une explosion nucléaire souterraine provoque la fusion et la vaporisation de la roche volcanique des atolls dans le voisinage immédiat de la détonation pour former une cavité grossièrement sphérique et, au fond de cette cavité, un bassin lenticulaire de roche volcanique fondue qui se refroidit pour former une lave vitreuse.

La masse de matières vaporisées lors d'une explosion nucléaire est d'environ 80 tonnes par kilotonne de rendement. La quantité de lave formée varie de 500 à 1000 tonnes par kilotonne de rendement en fonction de la nature de la roche et de son taux d'humidité.

Les autorités françaises n'ont pas indiqué à l'équipe chargée de l'étude l'emplacement exact de chacun des 147 essais souterrains. Elles ont en revanche fourni un plan de chaque atoll indiquant les zones d'essais, le nombre d'essais effectués, leur rendement maximum et le rendement total de chaque zone.

Tous les essais nucléaires ont été effectués dans la roche volcanique à des profondeurs comprises entre 500 et 1100 mètres. Sur les dix essais de sûreté, tous ont été effectués dans une même zone de Mururoa et sept ont eu lieu dans les roches carbonatées à des profondeurs supérieures à 280 mètres. Trois des essais de sûreté

effectués dans les roches carbonatées avaient un faible rendement nucléaire.

Lors des essais, on n'est pas toujours parvenu à contenir avec la même efficacité les radionucléides produits par l'explosion nucléaire. Pour faciliter le calcul, les termes sources discrets ont été regroupés en sept catégories:

**Catégorie 1.** Cent-vingt et un essais normaux pour lesquels il existait une épaisseur suffisante de roche volcanique essentiellement intacte au dessus de chaque cheminée d'essai pour garantir un bon confinement.

**Catégorie 2.** Quatre essais en présence d'une épaisseur de couverture apparemment suffisante mais également d'insuffisances dans la couverture volcanique.

**Catégorie 3.** Douze essais lors desquels la cavité/cheminée a atteint le haut de la roche volcanique.

**Catégorie 4.** Trois essais de sûreté ayant produit un rendement de fission (très faible), à au moins 280 mètres de profondeur dans la roche carbonatée.

**Catégorie 5.** Quatre essais de sûreté effectués à au moins 280 mètres de profondeur dans la roche carbonatée et n'ayant produit aucun rendement de fission.

**Catégorie 6.** Trois essais de sûreté effectués dans la roche volcanique et n'ayant produit aucun rendement de fission.

**Catégorie 7.** Deux puits de stockage de déchets creusés en profondeur dans la roche volcanique et dans lesquels on a placé des déchets contenant 3,7 kilogrammes de plutonium.

Dans la pratique, on a observé que la libération de radionucléides dans la biosphère pouvait être essentiellement attribuée à quatre catégories: les catégories 2, 3, 4 et 5.

## INVENTAIRE DES RADIONUCLÉIDES

La première étape, pour estimer la vitesse de migration des

radionucléides, consiste à calculer l'inventaire des radionucléides présents dans le sous-sol. Les scientifiques français ont indiqué les valeurs limites supérieures de rendement de chaque zone d'essais. Ces valeurs ont été vérifiées indépendamment à l'aide de données indépendantes fournies pour chaque essai par la station sismologique de Rarotonga (Îles Cook). On a constaté une excellente concordance entre les données françaises et les estimations de l'AIEA, ce qui donnait à penser que les limites supérieures françaises étaient véritablement très proches des valeurs réelles.

L'inventaire des radionucléides a été estimé sur la base des rendements en émettant quelques hypothèses raisonnables concernant la proportion d'énergie produite par la fission du plutonium-239, de l'uranium-235 et de l'uranium-238 ainsi que par la fusion des isotopes d'hydrogène. Ces estimations concordaient également de façon satisfaisante avec les informations fournies par les autorités françaises (*voir tableau page suivante*).

## HYDROGÉOLOGIE DES ATOLLS

Les zones volcanique et carbonatée de l'atoll sont toutes deux saturées d'eau. Pour l'essentiel, la circulation des eaux souterraines de l'atoll est régie par des forces de volume dues au flux géothermique chauffant le système par le bas. Les eaux froides et plus denses de l'océan pénètrent en profondeur par les flancs de l'atoll, s'écoulent vers les régions centrales plus chaudes, se réchauffent progressivement, deviennent plus légères et remontent vers le lagon. La grande perméabilité des formations carbonatées permet d'importants flux centripètes et quasi-horizontaux d'eau froide.

Après une explosion nucléaire, l'hydrologie à proximité de la

cavité/cheminée se modifie du fait de l'augmentation de la perméabilité et du réchauffement de l'eau et de la roche. Il en résulte une augmentation des flux d'eau ascendants entre la cavité/cheminée et l'environnement accessible.

Une fois l'équilibre thermique établi, la température à l'intérieur de la cavité/cheminée est supérieure de quelque 25 à 50° C à la température ambiante. Cette hausse de température est essentiellement indépendante du rendement de l'essai. À l'intérieur de la cavité/cheminée, la température diminue très lentement en quelques centaines d'années sous l'effet combiné de la convection et de la conduction.

S'agissant du flux des eaux souterraines sous l'atoll de Mururoa, les vitesses sont très élevées à proximité de chaque essai et dans les roches carbonatées les plus perméables. Dans la roche carbonatée, le flux dépend également des fluctuations des marées, qui mélangent effectivement l'eau dans la zone carbonatée (en particulier les karsts) et influent ainsi sur la vitesse de libération des radionucléides tant dans le lagon que directement dans l'océan.

## MIGRATION DES RADIONUCLÉIDES

Pour pouvoir migrer dans la géosphère, les radionucléides doivent être présents en phase aqueuse. Du fait des pressions élevées qui prévalent en profondeur, les radionucléides volatils ou gazeux (tritium, gaz nobles et iode) présents initialement en phase gazeuse se dissolvent dans l'eau.

La plupart des radionucléides, cependant, sont soit piégés dans la lave, soit sorbés sur les éboulis. Les données expérimentales montrent les radionucléides se libèrent de la lave et des éboulis suivant différents mécanismes. La lixiviation de la lave est un

## INVENTAIRE DE CERTAINS RADIONUCLÉIDES A LONGUE PERIODE SUR LES ATOLLS DE MURUROA ET DE FANGATAUFA

Radionucléide	Résultats de l'étude (TBq)		
	Mururoa	Fangataufa	Total
Tritium	232 000	48 000	280 000
Carbone-14	25	2,6	28
Chlore-36	1,3	0,4	1,7
Calcium-41	1,0	0,3	1,3
Nickel-59	2,9	0,9	3,8
Nickel-63	340	110	450
Sélénium-79	0,008	0,003	0,011
Krypton-85	670	380	1000
Strontium-90	7300	3500	10 800
Zirconium-93	0,23	0,09	0,32
Technétium-99	1,9	0,6	2,5
Palladium-107	0,18	0,03	0,21
Iode-129	0,0047	0,0014	0,0061
Césium-135	0,20	0,07	0,27
Césium-137	10 700	4100	14 800
Europium-152	230	100	330
Neptunium-237	0,22	0,03	0,25
Plutonium-238	185	15	200
Plutonium-239	1030	70	1100
Plutonium-240	280	20	300
Plutonium-241	6200	620	6800
Américium-241	350	30	380

## COMPARAISON DES ESTIMATIONS DE RENDEMENT DES ESSAIS NUCLÉAIRES SOUTERRAINS

Emplacement	Nombre d'essais	Énergie totale (équivalent kilotonnes TNT)	
		Estimation étude	Valeur française
Ceinture de Mururoa	83	970	<1060
Lagon de Mururoa	54	1443	<1450
Ceinture de Fangataufa	2	39	<20
Lagon de Fangataufa	8	731	<750
Total	147	3183	<3280

processus lent à vitesse limitée, tandis que la libération des radionucléides à partir des éboulis est supposée être un processus dépendant de l'équilibre entre les eaux souterraines et les radionucléides sorbés sur les surfaces solides.

Dans le cadre de l'étude, on a utilisé un modèle de porosité double pour estimer les vitesses de migration des radionucléides de la cavité d'essai vers la formation carbonatée. Des calculs ont été effectués pour 32 radionucléides, en portant une attention particulière aux quatre radionucléides clés: le plutonium-

239, le césium-137, le strontium-90 et le tritium.

Dans le cadre de l'analyse, un programme d'échantillonnage indépendant des eaux souterraines a été mis en œuvre. Ce programme avait pour but de vérifier les résultats de mesures plus importantes réalisées par les scientifiques français et de comparer les prévisions de l'équipe aux concentrations de radionucléides mesurées. Des échantillons d'eau ont été prélevés dans la cavité/cheminée de deux essais et en neuf autres endroits, dans les formations carbonatées.

On a noté une bonne concordance entre les données françaises et les résultats de l'étude. Les concentrations de plutonium se sont révélées être soit proches du seuil de détection, soit indétectables, même à l'intérieur des cavités/cheminées. Il a été conclu que le plutonium est effectivement retenu dans la lave vitreuse formée par l'explosion nucléaire, l'hypothèse initiale selon laquelle 5% de ce plutonium s'est déposé sur les éboulis étant toutefois maintenue à titre conservatoire.

À partir des résultats des prélèvements souterrains, on a procédé à l'estimation des inventaires de radionucléides présents dans certaines zones des formations carbonatées. Les radionucléides présents dans la formation carbonatée peuvent être libérés dans la biosphère soit par le flux ascendant des eaux souterraines vers les lagons, soit par les flux s'écoulant le long des couches karstiques et dans l'océan à une profondeur d'environ 300 mètres.

Bien que les formations carbonatées soient très perméables, elles forment également d'importants réservoirs d'eau, et le temps moyen de séjour est bien plus long que la période de certains radionucléides tels que le tritium, le strontium-90 et le césium-137.

Deux modèles ont été évalués pour décrire la libération dans la biosphère: un modèle de porosité simple et un modèle de mélange.

Dans le modèle de mélange, la vitesse de libération dans les lagons ou l'océan est proportionnelle à l'inventaire présent dans les carbonates. En ce qui concerne la migration vers le lagon, la constante de proportionnalité peut être calculée à partir des estimations de l'inventaire actuel de tritium présent dans les formations carbonatées et des mesures de l'élévation des concentrations de tritium dans les lagons. Cela correspond à une vitesse de libération d'environ

0,12% de l'inventaire par an. S'agissant de la libération des radionucléides dans l'océan, sa vitesse a été estimée à environ 5% par an sur la base de données limitées de dispersion latérale du tritium dans les carbonates.

En utilisant le modèle de mélange pour la libération des radionucléides provenant des carbonates et le modèle de porosité double pour leur migration dans les formations volcaniques, on a estimé les inventaires présents dans le carbonate et les vitesses de libération dans la biosphère sur plusieurs centaines d'années pour le tritium, le strontium-90 et le caesium-137, et sur plus de 100000 ans pour le plutonium-239.

La principale conclusion que l'on peut tirer de ces prévisions est que les futures vitesses de libération du tritium, du strontium-90 et du césium-137 dans les lagons ne seront probablement pas supérieures aux vitesses de libération actuelles. Les vitesses de libération maximales prédites dans les profondeurs de l'océan se sont déjà produites.

En ce qui concerne le plutonium-239, on prévoit que les vitesses de libération les plus élevées en provenance de sources souterraines se produiront dans 5000 à 10000 ans, mais qu'elles seront probablement inférieures aux vitesses actuelles de libération dans les lagons en raison de la lixiviation des sédiments contenant du plutonium.

Les vitesses de libération dans les lagons et l'océan prédites à l'aide des modèles décrits ci-dessus ont été utilisées pour modéliser la dispersion marine des radionucléides et, en dernier ressort, estimer les doses liées à l'exposition à ces radionucléides (voir articles pages 34 et 38).

## CONCLUSIONS

Les principales conclusions de l'évaluation de la migration des

radionucléides à partir des sources souterraines des atolls de Mururoa et de Fangataufa sont les suivantes:

■ Les estimations indépendantes de libération d'énergie et d'inventaires de radionucléides provenant des essais souterrains ont concorde de façon satisfaisante avec les valeurs indiquées par les autorités françaises.

■ Les essais nucléaires se traduisent par une augmentation de la perméabilité de la roche avoisinante.

■ Il existe, dans les roches volcaniques et carbonatées, un flux ascendant naturel des eaux souterraines qui atteint une valeur maximale à proximité immédiate d'un essai nucléaire.

■ L'échantillonnage et l'analyse en sous-sol de l'eau de deux cavités/cheminées font apparaître une très faible concentration de plutonium. La majeure partie (>99%) de ce dernier est effectivement piégée dans la lave vitreuse solidifiée formée après l'explosion nucléaire.

■ Dans les zones carbonatées, certains effets de la marée sont susceptibles d'entraîner une libération de radionucléides directement dans les profondeurs de l'océan.

■ La plupart des radionucléides libérés rapidement proviennent de quelques essais relativement rares au cours desquels il n'existait, au dessus de la cavité/cheminée, aucune couverture volcanique ou une couverture défectueuse.

■ Seule une très faible fraction de l'inventaire de radionucléides passe de la géosphère dans l'environnement accessible. Les vitesses de libération les plus élevées (en termes d'activité) sont imputables au tritium mais n'ont aucune incidence radiologique. Les vitesses de libération d'autres radionucléides sont généralement indétectables dans l'environnement en raison des fortes dilutions observées dans les lagons et l'océan. □