Fondation Cousteau

MISSION SCIENTIFIQUE

DE LA CALYPSO

SUR LE SITE

D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES

DE MURUROA

Fondation Cousteau

25, Av. de Wagram - F. 75017 Paris - Telex 641 856 F Requins - Téléphone (1) 47.66.02.46

MISSION SCIENTIFIQUE

DE LA CALYPSO

SUR LE SITE

D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES

DE MURUROA

Novembre 1988

Association sans but lucratif (Loi du 1er juillet 1901)

Face à l'énergie nucléaire,
la lampe d'argile du poète suffira-t-elle à son propos ?
- Oui, si d'argile se souvient l'homme.

Saint John Perse

Discours de Stockholm pour l'acceptation du prix Nobel de littérature.
10 décembre 1960

SOMMAIRE

I INTRODUCTION

II LES EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES EN POLYNESIE FRANCAISE

II.1 Les expérimentations nucléaires à travers le monde

II.2 La Polynésie Française

II.3 Principaux organismes français intervenant dans les expérimentations nucléaires

II.4 L'atoll de Mururoa
- II.4.1 Présentation géographique et historique
- II.4.2 Evolution géologique
- II.4.3 Structure
  - a) Le socle corallien
  - b) La zone de volcanisme aérien
  - c) La zone de volcanisme sous-marin
- II.4.4 Hydrologie : circulation de l'eau dans les socles volcaniques et coralliens

II.5 Déroulement schématique d'un essai nucléaire souterrain

III LA CALYPSO SUR LE SITE DE MURUROA

III.1 Observations sous-marines

III.2 Mesures radiologiques sur le site de Mururoa

III.3 Résultats : Nature des radioéléments
- III.3.1 Sédiments
- III.3.2 Plancton
- III.3.3 Radioéléments dissous

III.4 Distribution de la radioactivité mesurée
- III.4.1 Homogénéité des sédiments recueillis
- III.4.2 Radioactivité du plancton
- III.4.3 Radioactivité des eaux
  - a) Radioéléments naturels
  - b) Radioéléments artificiels

III.5 Origines des radioéléments
- III.5.1 Les sédiments et le plancton
  - a) Influence des retombées atmosphériques
  - b) Influence des essais nucléaires locaux
  - c) Les causes accidentelles
- III.5.2 Les radioéléments artificiels dissous
  - a) Isotopes du Césium
  - b) Isotopes du Plutonium
  - c) Autres radioéléments

III.6 Apports au Pacifique
- III.6.1 Echange des eaux
- III.6.2 Concentrations
- III.6.3 Résultats

III.7 Comparaisons mesures Fondation Cousteau/SMSR

IV EVALUATION DES RISQUES DES TIRS NUCLEAIRES SOUTERRAINS

IV.1 Structure géologique de l'atoll
IV.1.1 Le socle corallien
IV.1.2 Le socle volcanique

IV.2 Risques de contamination radioactive
IV.2.1 Retour des éléments les plus volatifs
IV.2.2 Retour des éléments "moyennement" solubles
IV.2.3 Retour des éléments les moins solubles

IV.3 Evaluation de l'activité des nucléides contenus dans le basalte de l'atoll de Mururoa

V CONCLUSIONS DE LA MISSION DE LA FONDATION COUSTEAU

V.1 Radioactivité actuelle des eaux du lagon

V.2 Vieillissement accéléré de l'atoll

V.3 Risques de pollution radioactive à moyen et long termes

ANNEXE 1 : CHRONOLOGIE DES EVENEMENTS

ANNEXE 2 : TRAITEMENT ET ANALYSE DES ECHANTILLONS

ANNEXE 3 : LA MISSION TAZIEFF DE 1982 ET LA MISSION ATKINSON DE 1983

ANNEXE 4 : BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE 5 : DEFINITIONS ET UNITES

I - INTRODUCTION

* Depuis 1985 la Fondation Cousteau a entrepris un ensemble de nouvelles missions à travers le monde afin d'observer, filmer, enregistrer, étudier l'influence de l'homme sur l'environnement. La Calypso a sillonné la mer des Caraïbes puis a rejoint la Nouvelle Zélande avant d'arriver en Polynésie. Pendant ce temps, Alcyone naviguait au Cap Horn avant de remonter le long des côtes de l'Amérique du Sud pour atteindre la mer de Cortez puis la mer de Béring et l'Alaska. Les campagnes se sont poursuivies en Australie, en Nouvelle Guinée, et continueront à Bornéo et en mer de Chine. Les images tournées au cours de ces missions feront l'objet d'une vingtaine de films de télévision s'inscrivant dans une nouvelle série intitulée : "A la Redécouverte du Monde".

* Au cours de la préparation des missions dans le Pacifique Sud, il nous est apparu que le Centre d'Experimentations du Pacifique (CEP), installé sur l'atoll de Mururoa, avait une influence considérable sur cette région depuis les 25 dernières années. *De nombreux pays entourant la Polynésie Française demandent l'interruption des essais nucléaires qui ont lieu actuellement sur l'atoll de Mururoa en invoquant les risques de pollution radioactive.*

* Les responsables du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et de la Direction des Centres d'Expérimentations Nucléaires (DIRCEN) essayent depuis la fin des essais nucléaires atmosphériques en 1975 de rassurer les populations locales et les dirigeants politiques des pays voisins sans vraiment y parvenir. Il faut dire que la plupart des informations sont classées "*secret défense*". Cependant, les responsables politiques français ont autorisé par le passé deux missions scientifiques à se rendre sur l'atoll de Mururoa : la Mission Tazieff de 1982 qui assista à un tir nucléaire souterrain, et la Mission Atkinson de 1983 (voir annexe 3).

* Le Commandant Cousteau a obtenu du Ministre de la Défense Monsieur A. Giraud l'autorisation d'organiser une mission scientifique et cinématographique de 5 jours, du 20 au 25 juin 1987, autour et dans l'atoll de Mururoa. Une expérimentation nucléaire eut lieu le 21 juin. La Calypso pénétra à l'intérieur du lagon le lendemain du tir afin de prélever des échantillons d'eau, de sédiment et de plancton. Des plongées en scaphandre autonome et en sous-marin ont été organisées jusqu'à une profondeur de 230 m.

De nombreuses questions ont été posées aux principaux responsables opérationnels et scientifiques du CEA et de la DIRCEN au cours de cette mission exploratoire. Les résultats des analyses, les observations sous-marines, les interviews et la synthèse des différentes études précédemment entreprises font l'objet de ce rapport.

II - LES EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES EN POLYNESIE FRANCAISE

II.1 Les expérimentations nucléaires à travers le monde

En dehors de la France

* Depuis la première explosion nucléaire d'Alamogordo dans le désert du Nouveau Mexique en 1945, *plus de 460 tirs nucléaires atmosphériques ont été réalisés à travers le monde.* Les Etats Unis, l'Union Soviétique et la Grande Bretagne ont arrêté leurs essais nucléaires atmosphériques l'année du moratoire de Moscou en 1963.

La dose d'exposition individuelle reçue de sources naturelles est voisine de 150 à 200 mrem/an suivant les régions. La radioactivité artificielle due aux retombées des essais nucléaires atmosphériques atteint 2 à 3 % de la radioactivité naturelle. Cette contamination, même si elle est faible, persistera pendant de nombreuses décennies.

D'autre part, la puissance totale des tirs nucléaires atmosphériques pratiqués par les différents pays aurait dépassé *550 mégatonnes* soit 220 Mt en énergie de fission (rendement de fission estimé en moyenne à 0,4) *dont 11 Mt pour la France.*

* La plupart des pays pratiquent aujourd'hui des experimentations nucléaires souterraines. Plus de 1150 tirs souterrains auraient déjà été réalisés.

En France

* Le dernier tir souterrain français à In Ecker (Sahara) a eu lieu en février 1966. Depuis, les tirs nucléaires français sont effectués sur l'atoll de Mururoa et de Fangataufa dans le Pacifique Sud. *Depuis 1963, la France a procédé à plus de 140 tirs nucléaires souterrains dont 11 dans le Sahara.* Aucune explosion n'a eu lieu sur l'atoll de Fangataufa depuis 1975. Entre 1960 et 1975, la France avait procédé à 44 essais nucléaires atmosphériques.

* *La puissance des tirs n'est jamais officiellement divulguée par les autorités du CEA- DIRCEN.* Par contre, les secousses sismiques occasionnées par les explosions sont enregistrées par différents pays. Les explosions françaises sont enregistrées et analysées par le Laboratoire de Séismologie de Nouvelle Zélande (New Zeland Seismological Laboratory), le Bureau des Ressources Minérales (BMR) de Camberra en Australie, le United States Geological Survey (USGS) et le Centre de Séismologie International (ISC).

Le tableau de la page suivante a été obtenu à partir des données fournies par ces différents organismes.

Suivant les sources officieuses, *l'estimation de la puissance totale des tirs nucléaires souterrains* qui ont déjà eu lieu à Mururoa varie de 1000 kt pour atteindre une valeur maximale d'environ 2500 kt, soit 2,5 Mt.

Quoi qu'il en soit, on constate que la puissance des tirs a considérablement diminué depuis les tirs atmosphériques des années 60. *La tendance générale à la miniaturisation des bombes ne devrait pas conduire dans le futur proche à une augmentation de la puissance des tirs, bien que des essais ponctuels de fortes puissances puissent être envisagés.*

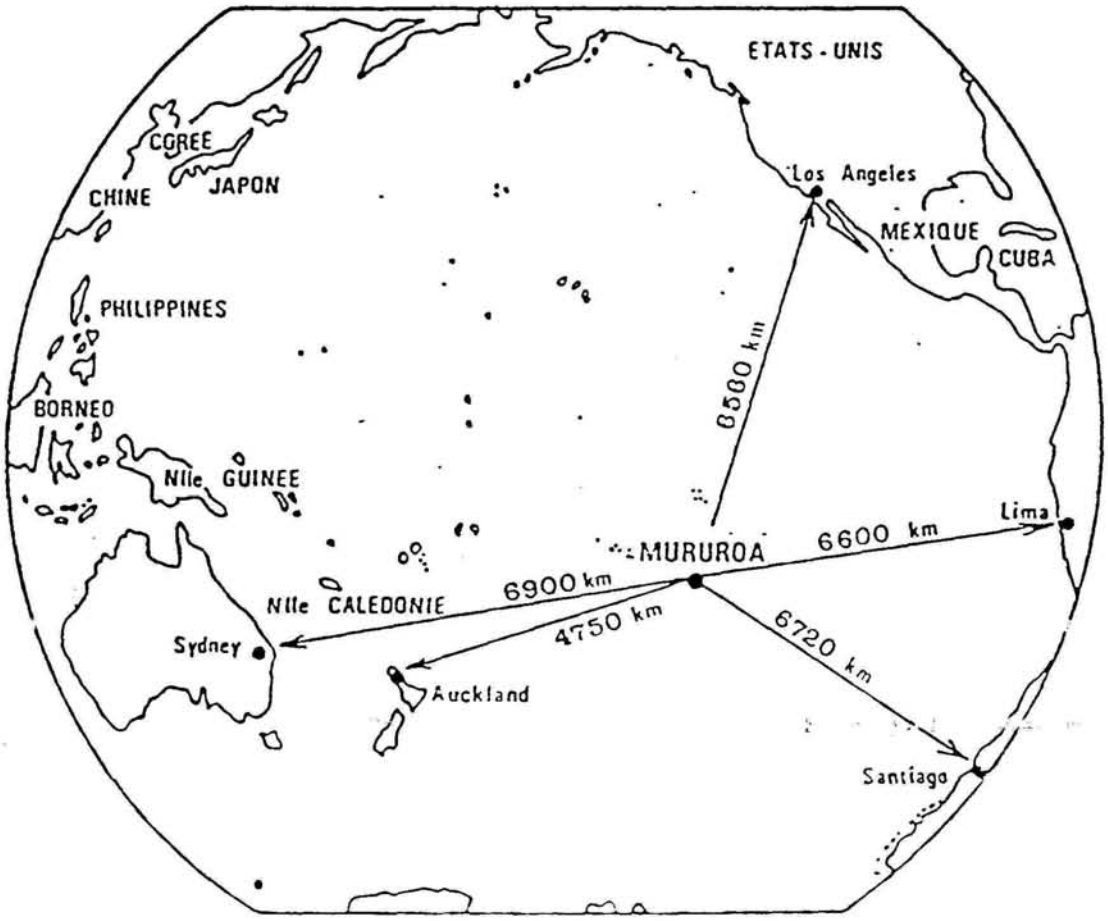
Date de l'expérimentation	Puissance estimée par le laboratoire de séismologie de Nlle Zélande (kt)	Estimation du BMR à partir des données du USGS et ISC (kt)		
		Moy.	Min.	Max.
5 juin 1975	5			
26 nove 1975	5			
11 juil 1976	15			
19 févr 1977	8	13	6	36
19 mars 1977	30	60	28	167
6 juil 1977	10	13	6	36
12 nove 1977	5			
24 nove 1977	50	100	46	280
17 déce 1977	10			
27 févr 1978	1			
22 mars 1978	6	5	2	13
26 juil 1978	5			
2 nove 1978	2			
30 nove 1978	60	60	28	167
17 déce 1978	8			
19 déce 1978	6	6	3	17
1 mars 1979	9			
9 mars 1979	8			
24 mars 1979	16	6	3	17
4 avri 1979	10	4	2	10
18 juin 1979	5	4	2	10
29 juin 1979	20	22	10	60
25 juil 1979	140	100	46	280
28 juil 1979	7	2	1	5
22 nove 1979	5			
23 févr 1980	2			
3 mars 1980	6			
23 mars 1980	30	46	22	129
1 avri 1980	20	10	5	28
4 avri 1980	5			
16 juin 1980	20	22	10	60
21 juin 1980	4			
6 juil 1980	10			
19 juil 1980	50	60	28	167
25 nove 1980	2-5			
3 déce 1980	30	36	17	100
27 févr 1981	3			
6 mai 1981	2			
28 mars 1981	5-10	4	2	10
10 avri 1981	10	5	2	13
8 juil 1981	20	17	8	46
11 juil 1981	10			
18 juil 1981	2			
[illegible]	10-15	17	8	46
11 nove 1981	2	2	1	6
5 déce 1981	8-10	3	1	8
8 déce 1981	15	13	6	36

Date de l'expérimentation	Puissance estimée par le laboratoire de séismologie de Nlle Zélande (kt)	Estimation du BMR à partir des données du USGS et ISC (kt)		
		Moy.	Min.	Max.
20 mars 1982	15	6	3	17
27 juin 1982	1			
1 juil 1982	20			
21 juil 1982	2			
25 juil 1982	70	36	17	100
19 avri 1983	50	36	17	100
25 mai 1983	70	77	36	215
28 juin 1983	50	22	10	60
20 juil 1983	10			
4 août 1983	8	13	6	36
3 déce 1983	6			
7 déce 1983	15			
8 mai 1984	20			
12 mai 1984	50			
12 juin 1984	5			
16 juin 1984	35			
27 Octo 1984	6			

Tiré du rapport Atkinson 1984

II.2 La Polynésie Française

* La Polynésie Française est constituée d'un très grand nombre d'îles réparties et isolées dans le Pacifique Sud.



Tiré C.E.A.-DIRCEN 1984

* La Polynésie est constituée des archipels des Marquises, des Tuamotou, de la Société (Iles du Vent et Iles Sous le Vent), des Gambiers, et des Australes.

D'origines volcanique, les 105 îles ont une morphologie différente en fonction de leur âge, depuis les îles volcaniques hautes et jeunes jusqu'aux atolls.

* La population est jeune et est en majorité âgée de moins de vingt ans. Elle est caractérisée par un fort métissage culturel et humain : 66 % de Maoris, 17 % de Demis, 11 % d'Européens et 6 % de Chinois.

184 000 habitants ont été recensés en 1983. L'agglomération de Papeete et des communes voisines comptait 116 000 habitants. 140 000 habitants sont concentrés sur le seul archipel de la Société.

** La création du Centre d'Expérimentations du Pacifique (CEP) et l'implantation du CEA en 1962 ont bouleversé la vie de la Polynésie Française.* Les habitudes existantes ont été radicalement transformées et le déclin des cultures traditionnelles s'est accéléré. L'injection massive de capitaux a permis la création de nouvelles infrastructures et a provoqué un appel considérable de main d'oeuvre métropolitaine et locale. L'exode rural s'est accéléré et le déséquilibre entre Tahiti et les autres îles s'est aggravé.

L'essor engendré par le CEP a avivé les inégalités, et la population locale souvent maintenue à l'écart subit les évènements plus qu'elle n'y prend part. Ce sont surtout les Demis et la population chinoise qui bénéficient des retombées du CEP.

** Le Produit Intérieur Brut était de l'ordre de 12 000 MF* en 1986. Les importations étaient évaluées à 5096 MF en 1986 et *les exportations hors matériels militaires à 90 MF.* Le taux de couverture est inférieur à 2 %. *La dépense globale Armée-CEA évaluée à 1814 MF représente environ 15 % du PIB pour 1986.*

Les droits et taxes sur les importations payées par les Armées et le CEA s'élevaient en 1986 à 332 MF, ce qui représentait 17 % des recettes du Territoire (1870 MF).

L'apport du tourisme était évalué à 840 MF en 1986, soit 7 % du PIB.

II.3 Principaux organismes français intervenant dans les expérimentations nucléaires

* *La préparation de l'engin testé et son expérimentation technique sont de la responsabilité du CEA/Direction des Applications Militaires. La préparation et le soutien des expérimentations sont assurés par la Direction des Centres d'Expérimentations Nucléaires (DIRCEN)* dont dépendent en particulier le Centre d'Expérimentations du Pacifique (CEP), le Service Mixte de Contrôle Biologique (SMCB) implanté à Montlhéry, et le Service Mixte de Sécurité Radiologique (SMSR) implanté également à Montlhéry.

* *Le SMCB a pour mission d'assurer, dans les zones intéressées par les expérimentations nucléaires, la surveillance radiologique des êtres vivants,* des denrées alimentaires et des eaux de boisson utilisées par l'homme. Les principaux laboratoires sont installés à Montlhéry, une antenne du SMCB existe à Mahina, près de Papeete. Le navire Marara est chargé d'effectuer tous les prélèvements marins.

* *Le SMSR a pour mission d'assurer la sécurité radiologique des expérimentations* et la protection des populations au cours des essais nucléaires. Cet organisme est chargé de vérifier l'absence de contamination lors des essais et en cas de contamination de proposer des mesures de protection à prendre. Des laboratoires sont installés à Montlhéry et l'antenne de Mururoa est chargée d'assurer la protection radiologique du site.

II.4 L'atoll de Mururoa

Les moyens d'étude exceptionnels dont disposent les scientifiques du CEA et l'importance des études géologiques font que Mururoa est un des atolls les mieux étudiés du monde.

II.4.1 Présentation géographique et historique

L'atoll de Mururoa (21°50' de latitude Sud et 138°55' de longitude Ouest) est situé dans la partie sud-est de l'archipel des Tuamotu, l'un des cinq archipels (Marquises, Tuamotu, Société, Gambiers, Australes) qui constituent la Polynésie Française.

Mururoa s'élève de plus de 3 000 m au dessus de la croûte océanique âgée de 55 millions d'années environ. L'atoll mesure 25 km de long sur son grand axe (est-ouest) et 9 km dans sa partie la plus large (axe nord-sud). *La couronne récifale, de 65 km de long, dépasse rarement 400 m de large et a 2 m de hauteur moyenne.* Une passe s'ouvre largement (près de 5 km) sur le côté nord-ouest de l'atoll. La profondeur maximum du lagon est de 52 m (profondeur moyenne 40 m). Très schématiquement, l'atoll de Mururoa peut être assimilé à un cône volcanique de 3 000 m de haut dont le sommet est un plateau d'environ 125 km2.

Mururoa est situé à 100 km de Turéia, l'île habitée la plus proche, à 400 km au nord des Gambiers, et à 1 200 km de Tahiti. *Mururoa était inhabité avant l'installation du personnel du CEP.*

De 1966 à 1974, les campagnes de tirs atmosphériques ont été réalisées au dessus des atolls de Fangataufa et de Mururoa. *Les conséquences de ces essais sur les sites sont considérées comme nulles par les autorités.* Aussi, une base "vie" permanente a-t-elle été installée à l'extrémité Est de l'atoll. 1500 à 3000 personnes, militaires et civils, vivent dans cette base.

A partir de 1981 les tirs de moyenne et forte énergies étaient exécutés en zone centrale et les tirs de faible énergie continuaient à être exécutés sur la couronne, *mais depuis 1987 tous les tirs sont effectués sous le lagon.*

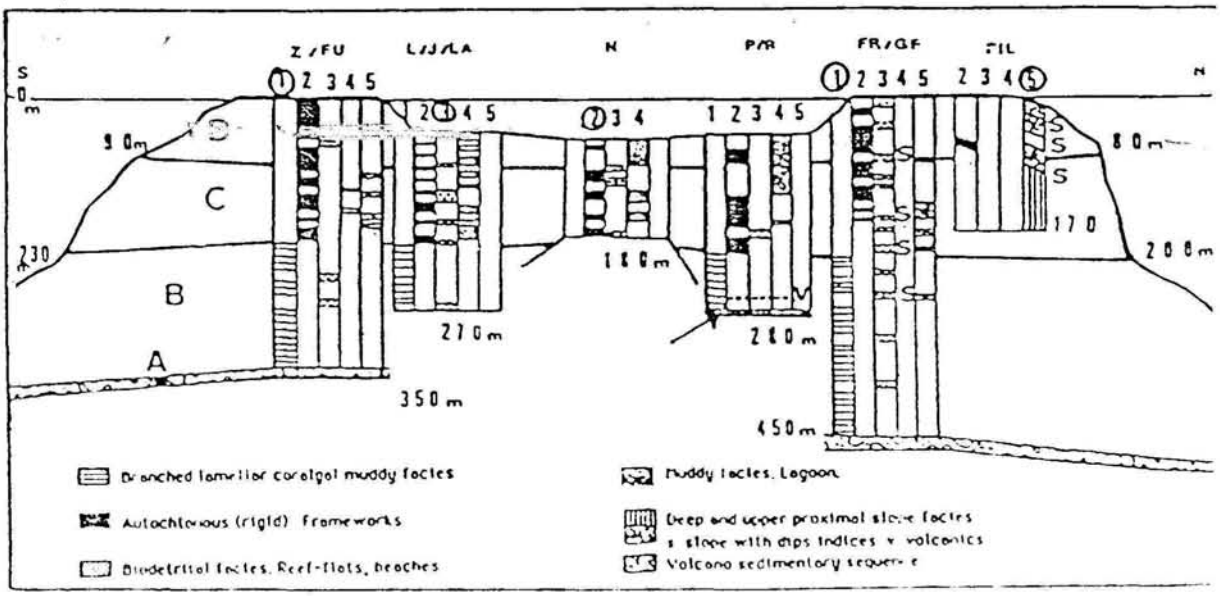
Cependant, la décision a été prise de rouvrir pour la fin de 1988 le champ de tir de Fangataufa.

II.4.2 Evolution géologique

L'archipel des Tuamotu est étiré le long d'un axe nord-ouest, sud-est. *L'alignement des îles sur cet axe est dû au déplacement du fond océanique vers le nord-ouest, à la vitesse moyenne de 11 cm par an.* Le point chaud à l'origine de chacune des îles est situé au sud de Pitcairn dont le volcanisme date d'environ 0,5 million d'années. Entre Pitcairn et Mururoa, les îles Gambiers fournissent une bonne idée de ce que devait être Mururoa, il y a 4 à 5 millions d'années. L'activité volcanique de Mururoa date de 8 à 9 millions d'années. *L'activité sismique a virtuellement cessé depuis 6 millions d'années.* C'est à peu près à cette époque que, le volcanisme effusif aérien de type Hawaien ayant totalement cessé, un récif frangeant s'est installé sur le pourtour de l'île. *L'érosion et la subsidence ont parallèlement provoqué la disparition du cône volcanique sous les flots et la formation de l'atoll actuel.*

II.4.3 Structure

Les travaux de D. Buigues de 1982 à 1985 apportent l'essentiel des informations nécessaires à la compréhension de la structure géologique de l'atoll de Mururoa.



Distribution des faciès sédimentaires

Schématiquement, la structure de l'atoll se divise en 3 unités successives :

- *Le socle corallien*, dont l'épaisseur varie de 450 m sous la couronne corallienne nord-est, à 180 m au centre du lagon, et 350 m sous la couronne corallienne sud-ouest.
- *Une zone de volcanisme aérien* d'environ 250 m d'épaisseur située sous le corail.
- *Une zone de volcanisme sous-marin* à partir de 550 m de profondeur. Cette zone est enracinée dans un basalte mantellique profond.

Les 3 grandes zones sont elles-mêmes hétérogènes.

a) Le socle corallien

Les forages qui ont été effectués sur un axe NE->SW à travers l'atoll montrent que *la séquence calcaire n'est ni homogène en épaisseur (180 m, ou 450 m), ni dans la distribution des faciès qui la constituent.* En effet, le début de la colonisation par les algues calcaires et les coraux s'est fait sur les flancs érodés du volcan émergé. Suivant les endroits, des formes coralliennes branchues ou massives se sont développées. Dans les zones abritées se sont déposés des produits d'érosion. Il résulte une grande hétérogénéité de ce premier facies sédimentaire qui couvre sur 250 m d'épaisseur toute la partie périphérique : conglomérats constitués de matériels détritiques grossiers, jouxtant ou succèdant à des zones de coraux en place très massifs. Il n'en est évidemment pas de même au centre du lagon puisque le sommet du volcan est resté émergé beaucoup plus longtemps.

Dans la partie centrale du lagon, on trouve directement sur le socle volcanique soit un facies détritique constitué de débris de branches de coraux et de sable, soit des structures plus massives constituées de coraux en place.

Grossièrement, *dans le lagon* (excepté dans la partie centrale), on a successivement : un fond de sable calcaire corallien, qui peut atteindre 150 m d'épaisseur, puis une couche de 50 m environ constituée de calcaire consolidé, de sable et débris grossiers plus ou moins recimentés, enfin une assise de dolomies (carbonates de calcium et de magnésium dissous puis recristallisés) d'environ 70 m d'épaisseur qui s'est formée pendant les périodes de régression marine. Au cours de ces périodes, l'assise calcaire a subi d'importants phénomènes d'érosion et de dissolution de type karstique à l'origine d'importantes cavités et failles de dissolution. Par endroits, le niveau inférieur de ce socle corallien est occupé par des sables et des débris coralliens détritiques.

Outre la complexité des structures, le fait essentiel reste *l'absence de continuité des structures sédimentaires sur l'ensemble de l'atoll* ; ce qui implique que l'on ne puisse *tirer de loi générale sur la géologie et l'hydrologie interne du socle. La porosité du socle corallien est élevée. Son coefficient varie de 30 à 15 % dans les niveaux supérieurs et de 30 à 10 % dans les niveaux inférieurs.*

b) La zone de volcanisme aérien

Cette zone assez hétérogène est constituée de scories, de cendres, de lapillis et de coulées de lave plus ou moins alvéolée. On note des successions de coulées de laves effusives et explosives (comme on peut le voir aujourd'hui aux Gambiers). Ces matériaux volcaniques sont parfois mêlés à des matériaux carbonés soit détritiques, soit de la calcite qui a cristallisé dans les fissures entamant cette couche. Par exemple, à 280 m de profondeur on trouve mêlés aux structures coralliennes d'importants dépôts de cendres volcaniques.

La porosité moyenne de cette zone est d'autant plus difficile à déterminer que ses matériaux sont très hétérogènes. Elle *varie de 6 à 30 %.*

Une couche de transition, définie par le Pr Goguel (1982), séparerait la zone carbonatée de la zone de volcanisme aérien. Cette couche de transition serait essentiellement constituée de matériaux argileux. Cependant les sondages font apparaître que son épaisseur varie énormément puisqu'elle peut atteindre 45 m sous la couronne récifale et être quasiment inexistante sous le lagon. *Des sondages réalisés dans la zone Zoé ont montré "des intercalations de calcaires récifaux au milieu des produits volcaniques".*

c) La zone de volcanisme sous-marin

Cette zone est la plus homogène. Elle est constituée d'autoclastites et de hyaloclastites (schématiquement, la lave en se refroidissant brutalement au contact de l'eau de mer donne des verres plus ou moins fissurés et éclatés). Cette zone de volcanisme sous-marin est recoupée par des "dykes" (filons) qui entament verticalement les structures en s'injectant, puis se solidifiant dans les fissures (comme on peut le voir sur le volcan sous-marin Mac Donald). Leur verticalité rend difficile les interprétations des recherches sismiques.

La porosité de cette zone serait de 6 %.

Tout ceci met en évidence l'hétérogénéité des structures tant au niveau de la structure globale de l'île que de celle de chacune des entités géologiques et des éléments qui les constituent.

Soulignons l'extrême variabilité de l'épaisseur des différentes zones (en particulier, de la fameuse couche intermédiaire argileuse). Cette variabilité interdit de déterminer un modèle global, suffisamment précis, pour calculer à priori la profondeur exacte du tir en fonction de sa puissance et des marges de sécurité que s'imposent les responsables du CEP. *Chaque forage est un cas particulier et doit donc être réajusté en fonction de la réalité géologique mise en évidence à cette occasion.*

II.4.4 Hydrologie : circulation de l'eau dans les socles volcaniques et coralliens

M. Rougerie et al ont publié en 1984 une étude portant sur la circulation de l'eau dans le lagon et sur la circulation de l'eau à travers les différents socles.

En particulier, il est montré qu'"à 450 m les températures dans l'océan et dans les puits sont identiques : 11,5°± 0,2°". Ceci montre l'intensité des échanges latéraux à l'intérieur du socle corallien.

Les vitesses de migration verticale de l'eau et des sels minéraux (nitrates, silicates) à travers le socle corallien ont été calculées, non pas en estimant la structure, la nature et la porosité de chacune des roches traversées, mais en faisant un bilan de consommation des sels nutritifs. Cette mesure est d'autant plus intéressante qu'elle s'affranchit du parcours de l'eau à travers les roches, c'est-à-dire des supputations sur la perméabilité globale des structures traversées.

La vitesse de migration verticale varie, suivant les sels minéraux considérés et l'époque de l'année, entre 1 et 10 mm/h à travers les 450 premiers mètres. Au début de l'hiver, lorsque le renouvellement de l'eau du lagon se fait en 23 jours, la "pompe" est très forte, et la vitesse est de 10 mm/h pour les nitrates. On obtient donc la vitesse de 90 m/an dans les 450 premiers mètres.

"Cette conlusion ne tient pas compte des phénomènes de convection qui vont favoriser les échanges et renforcer les flux verticaux." (Rougerie et al, 1984).

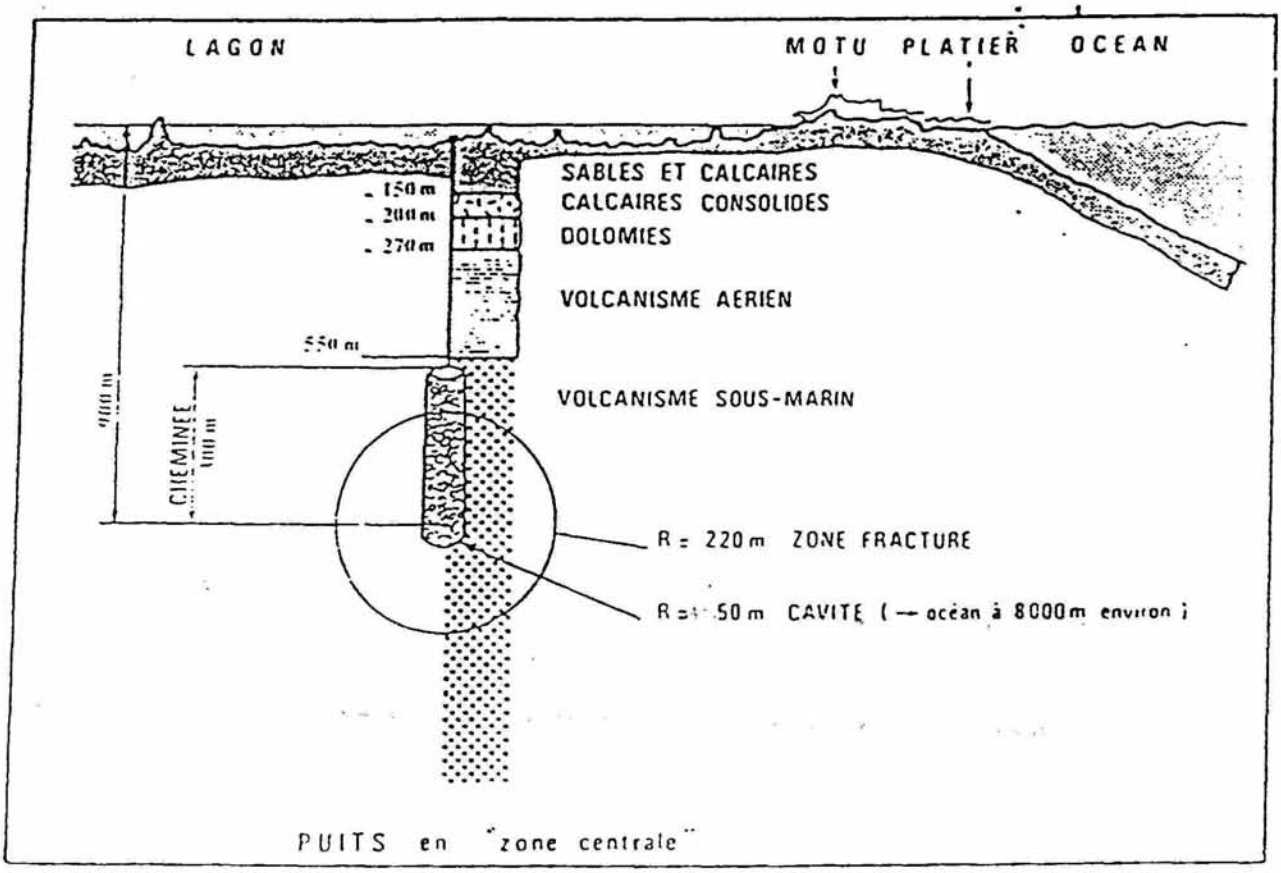
En aucun cas l'assise coralliennne ne constitue une barrière à la migration verticale des radioéléments artificiels. En moins de 5 ans l'épaisseur de corail est traversée par de l'eau qui était à moins de 500 m de profondeur.

L'assise coralienne n'est pas prise en compte par le C.E.A. pour les calculs de confinement des radioéléments artificiels créés par les essais nucléaires.

II.5 Déroulement schématique d'un essai nucléaire souterrain

Aujourd'hui *les essais se font sous le lagon* et nécessitent une technique de forage offshore. *Le choix du site et la profondeur du puits se font en fonction des résultats des explorations sismiques*, de l'emplacement des fractures connues, des essais précédents et bien sûr de la puissance de l'engin testé. Suivant la nature des roches rencontrées, les parois du puits sont parfois consolidées et cimentées. L'engin

nucléaire et les appareils de mesure sont enfermés dans un conteneur cylindrique étanche de 18 m de haut et pesant une cinquantaine de tonnes. Ce cylindre est descendu dans le puits de forage (1,5 m de diamètre) *à une profondeur moyenne de 800 à 1000 m (c'est-à-dire dans le socle volcanique)*. Le puits est alors rebouché avec les éléments issus du forage et avec du béton. *Ce bouchon est théoriquement étanche.*



PUITS en "zone centrale"

* Les appareils de mesure enregistrent les paramètres de l'explosion et prennent quelques photos avant la désintégration (1/1000ème de seconde). *L'explosion provoque instantanément la formation d'une cavité sphérique* : Les roches encaissantes les plus proches sont vaporisées sous l'effet de la brutale augmentation de pression et de température (plusieurs millions de degrés) ; *au delà, la roche est fondue ; au delà encore la roche est fracturée.* Le rayon de la cavité est fonction de la puissance du tir.

Par exemple, pour des tirs effectués à 800 m de profondeur, on obtient les valeurs théoriques suivantes, en considérant que le milieu est parfaitement homogène, ce qui est loin d'être le cas comme le montrent les chapitres précédents (source : U.S. Atomic Energy Commission Formulae) :

Puissance du tir (kt)	Rayon de la cavité (m)	Hauteur de la cheminée (m)	Rayon de la zone fracturée (m)	Rayon de la zone fracturée (source CEA)
10	21	84	151	105
50	37	148	266	185
100	47	188	338	235
200	54	216	389	270

Si l'on se reporte au schéma présentant la distribution des faciès sédimentaires (Buigues), on se rend parfaitement compte qu'un puits de 800 m n'a pas la même signification s'il est creusé dans la partie nord-est ou au centre du lagon.

La détermination de la profondeur des tirs tient compte des inhomogénéités de terrain.

* *Le refroidissement et la chute de pression ont deux conséquences importantes :*

- *La vitrification de la lave dans laquelle seraient piégés environ 75 % des produits de fission (ne sont pas piégés les éléments les plus volatils : gaz rares, iode, tritium...), la totalité des produits d'activation et de fusion (plutonium, neptunium, américium) ;*

- *L'effondrement de proche en proche de la partie supérieure de la cavité.* L'éboulement s'arrête de lui-même car le volume des matériaux éboulés est rapidement supérieur au volume de la cavité et de sa cheminée.
  Il est important de noter que l'augmentation de volume qui empêche l'effondrement de gagner la surface vient des vides entre les blocs détachés. *Le délai et la durée de l'effondrement de la cheminée sont variables et fonction en particulier de la puissance du tir.*

La température de la cavité décroit lentement après avoir atteint initialement des millions de degrés. Quelques jours après l'explosion, la température est voisine de 40°, 250 jours après elle est encore de 30°, il faut attendre 20 ans pour retrouver la température de 20°.

Ces vides, fractures et interstices entre les roches éboulées de la cheminée, ainsi que la cavité se rempliraient d'eau interstitielle au bout de quelques jours.

III LA CALYPSO SUR LE SITE DE MURUROA

La Calypso a pénétré à l'intérieur du lagon de Mururoa le 22 juin 1987 le lendemain d'un tir nucléaire souterrain, afin de prélever des échantillons d'eau, de sédiments et de plancton.

Les prétraitements ont été effectués sur le site, puis chaque échantillon a été divisé en trois lots afin de permettre des analyses séparées. Les échantillons de la Fondation Cousteau ont été analysés par l'Institut de Biogéochimie Marine de l'Ecole Normale Supérieure de Paris dirigé par Monsieur J.M. MARTIN Directeur de Recherche au C.N.R.S. Les échantillons du CEA furent analysés par les laboratoires du SMSR de Mururoa et de Montlhéry. Le troisième lot devait servir de témoin en cas de résultats contradictoires.

Parallèlement, plusieurs plongées tant en scaphandre autonome qu'en sous-marin (soucoupe plongeante SP 350) ont été réalisées dans le lagon et sur la pente corallienne externe de l'atoll, et cela de la surface jusqu'à une profondeur de 230 m.

III.1 Observations sous-marines

Deux plongées en scaphandre autonome jusqu'à 50 m de profondeur et *une plongée en sous-marin SP 350* jusqu'à une profondeur de 230 m ont été effectuées sur la pente externe de l'atoll *dans la zone "Zoé"*. Dans cette zone, située dans la partie sud de l'atoll, avait eu lieu en 1979 un important glissement de la partie externe et immergée de l'atoll qui avait provoqué un mini-tsunami. *Les plongées ont permis de constater, filmer et photographier les fractures et éboulements qui affectent cette partie de l'atoll.*

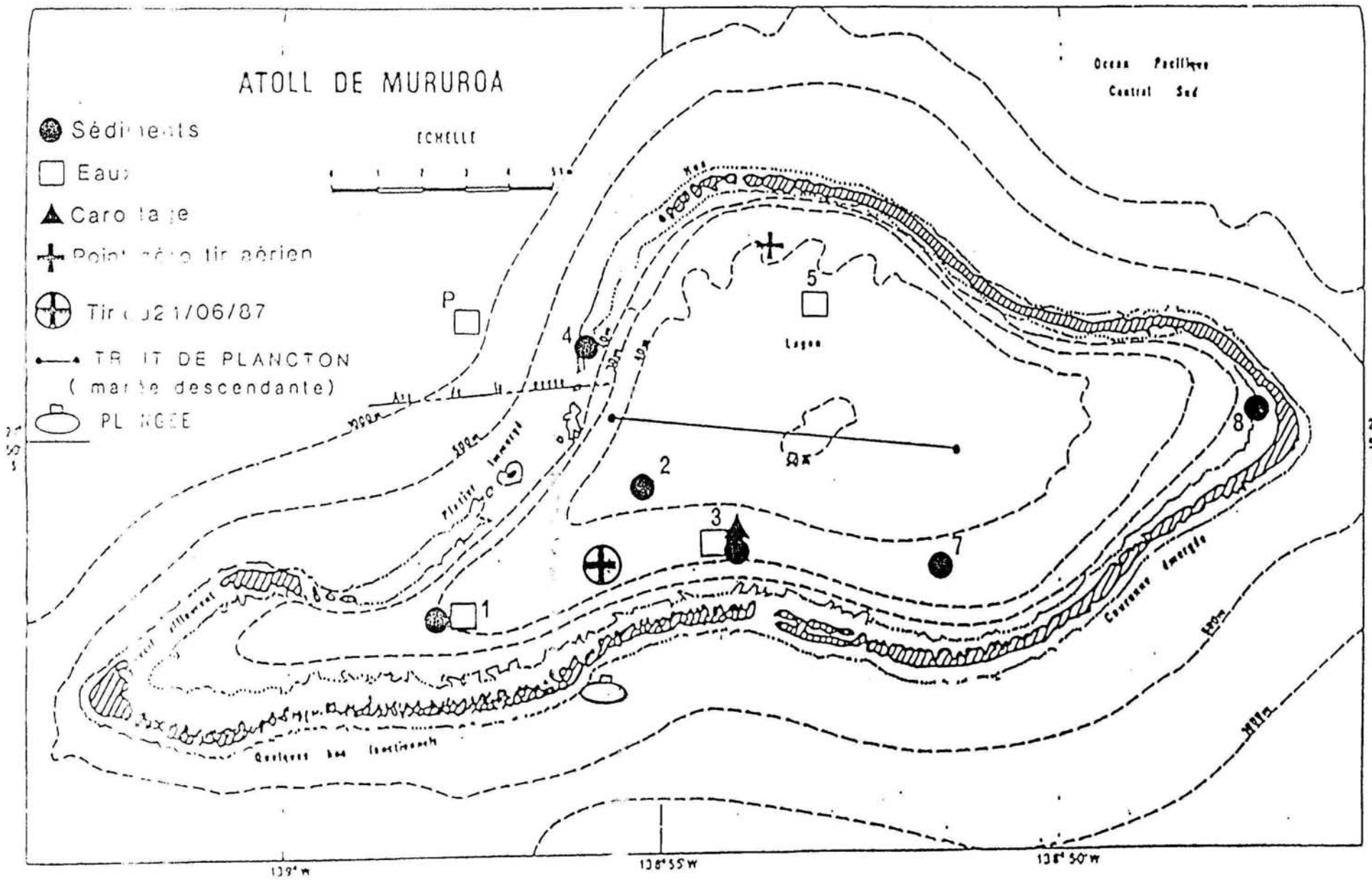
Les failles, fractures de moindre importance et éboulis de blocs calcaires sont visibles jusqu'à 180 m de profondeur. Les failles affectent verticalement, transversalement (perpendiculairement à la côte) et longitudinalement (parallèlement à la côte) *la pente externe qui s'est déjà effondrée sur une centaine de mètres.* En effet, la morphologie classique de la pente externe a été modifiée, car elle s'est effondrée au niveau de la plateforme récifale externe (5-10 m). Elle se présente maintenant comme une falaise verticale jusqu'à 48 m. A cette profondeur, une première plateforme d'une dizaine de mètres de large est encombrée de blocs rocheux éboulés de toutes tailles, anciens et récents. *Les blocs calcaires récents présentent des bords anguleux [illegible] et coupants. Ils ne sont pas colonisés par les algues ou par des invertébrés sessiles (hydraires, éponges, coraux), mais sont blanchâtres et ne présentent aucune altération apparente.*

Des failles très larges (30 à 100 cm) déjà anciennes (bords érodés et colonisés par des algues, des hydraires et des coraux) recoupent longitudinalement le récif. Elles séparent, parallèlement à la côte, d'énormes "tranches" rocheuses de plusieurs centaines de m3. D'autres failles anciennes de moindre importance (quelques millimètres, voire centimètres de large) recoupent transversalement le récif.

Enfin, un réseau de fractures de quelques millimètres, voire centimètres, de largeur affecte la zone comprise entre 5 et 50 m. *Ces fractures sont récentes* (bords tranchants, non colonisés) et suffisamment profondes pour que l'on puisse détacher sans difficulté à la main des blocs d'une trentaine de centimètres. Des blocs beaucoup plus gros (m3) paraissent susceptibles de se détacher.

Au cours de cette plongée, on a pu observer et filmer le résultat du glissement de terrain d'un volume de l'ordre du million de m3 qui avait créé le mini-tsunami de 1979. Ce glissement a été provoqué par un tir déclenché sur la périphérie de l'atoll.

Le réseau de fractures et les éboulis de blocs calcaires récents, non colonisés que nous avons observés en plongée, sont vraisemblablement dus aux tirs effectués dans les mois précédents et/ou au cours de notre mission. Leur existence prouve que les ébranlements liés aux essais réalisés sous le lagon (et non plus sous la couronne récifale) sont suffisamment importants pour provoquer des fissurations de la couronne calcaire.



Topographie, bathymétrie, stations d'échantillonnage et d'observations
(fond de carte communiqué par le C.E.A.)

III.2 Mesures radiologiques sur le site de Mururoa

Les objectifs de cette campagne de mesures étaient :

- *L'identification des radionucléides émetteurs gamma et les isotopes du plutonium présents dans l'environnement.*
- *La mesure de leurs niveaux d'activité dans le milieu aquatique.*
- *L'estimation du flux de radionucléides sortant du lagon de Mururoa.*
- *L'analyse des risques de pollution radioactive à court, moyen et long termes.*

Au cours de la mission, des prélèvements d'échantillons d'eau, de sédiment et de plancton ont été autorisés en dehors des zones les plus actives qui avaient été contaminées par les tirs atmosphériques sur barge et en ballon.

La localisation des points de prélèvements est reportée sur la figure précédente.

Les prélèvements ont été organisés à partir de la Calypso en présence des scientifiques du SMSR.

* *Eau de mer*

Les 2 prélèvements de 400 litres d'eau océanique, au large de la passe, ont été effectués le 21 juin ; les 6 prélèvements de 200 litres d'eau du lagon le 22 juin. L'eau de mer a été prélevée au moyen d'une pompe de marque Guinard de 0,75 ch, possédant un corps en téflon. L'extrémité du tuyau d'aspiration en caoutchouc armé de 40 mm était lestée par une gueuse de 50 kg. Le tuyau de refoulement était constitué d'un élément soit en plastique armé soit en caoutchouc armé noir relié à un tuyau de type incendie.

Les bidons de 40 litres en plastique étaient préalablement rincés avec l'eau du prélèvement. Les bidons étaient alternativement remplis.

* *Sédiments et carottage*

Les sédiments ont été prélevés par raclage sur 3 cm de profondeur environ par des plongeurs utilisant des boites plastique.

NOUVEL ESSAI À MORUROA

selon Wellington

LA France a procédé hier à sa septième explosion nucléaire de l'année sur l'atoll de Moruroa, ont annoncé à Wellington des scientifiques néo-zélandais.

Warwick Smith, le responsable du Service de recherche scientifique et industriel (DSIR) de l'observatoire de sismologie, a précisé que l'explosion souterraine, qui a eu lieu hier à 06H01, heure locale, avait une puissance de 40 kilotonnes.

Selon les scientifiques du DSIR, la plus forte explosion jamais enregistrée à Moruroa avait une puissance de 140 kilotonnes.

Environ 2 kg de sédiments ont été prélevés à chaque station. Le carottier de 150 kg s'avéra insuffisamment lesté pour prélever des carottes permettant l'analyse par tranches du sédiment. La carotte prélevée et analysée contenait des sédiments prélevés sur une profondeur de 20 cm.

* *Plancton*

Le filet à plancton dont les mailles étaient de 250 microns fut tiré par un Zodiac pendant 1 h 45 le 23 juin au matin à la vitesse de 2 noeuds.

Ceci a permis de récolter 8,9 g de seston.

En annexe 2 sont présentées les méthodes de traitement et d'analyse des échantillons.

III.3 Résultats : Nature des radioéléments

Les activités des radioéléments mesurées sont ramenées à la date des prélèvements (22 et 23 juin 1987).

Il est important de noter, avant la présentation exacte des résultats, que les concentrations mesurées sont très faibles, et cela quelque soit le milieu.

III.3.1 Sédiments

La radioactivité naturelle est représentée par le Ra-226 (famille de U-238), l'Ac-228 (famille du Th-232) et le potassium (1 % de K = 8,3 pCi de K-40), ainsi que par le Be-7, élément cosmogénique apporté par la retombée atmosphérique. En supposant (ce qui n'est pas certain) l'équilibre entre Ra-226 et U-238, et entre Ac-228 et Th-232, leurs activités moyennes (respectivement 347 et environ 7 pCi/kg) correspondraient à 1 ppm d'uranium et 0,03 ppm de thorium.

* Nota : Depuis 1985 l'unité de radioactivité officiellement adoptée au niveau international est le Becquerel (Bq) (voir annexe 5). Toutefois, pour faciliter la lecture du rapport par des non scientifiques, nous avons conservé le Curie (Ci), plus connu, comme unité de radioactivité.

Ce rapport U/Th est fort (33) et très supérieur au rapport moyen des sédiments marins argilo-détritiques (environ 0,2). Cette différence peut résulter de l'affinité bien connue de l'uranium pour les carbonates, et de l'extrême rareté des aluminosilicates (corroborée par les très faibles teneurs en potassium) dans ce milieu sédimentaire particulier. *Les radioéléments de la famille de l'Uranium-238 sont donc responsables de l'essentiel de la radioactivité naturelle des sédiments.*

Ce fort rapport pourrait aussi résulter d'une contamination en uranium, mais les faibles activités en Ra-226 paraissent normales et ne semblent pas confirmer cette hypothèse.

Les radioéléments artificiels détectés comprennent quelques produits de fission et d'activation : Cs-137 (période 30 ans), Co-60 (5,3 ans), Eu-155 (4,9 ans), I-131 (8jours), et des traces de Sb-125 (2,8 ans), ainsi qu'un transuranien, l'Am-241 (433 ans).

Les activités en Ag-110m, Ce-144, Ru-103, Ru-106 et Zr-95 sont systématiquement inférieures aux limites de détection.

L'Iode-131 (période 8,05 jours) n'a pu être mesuré dans les sédiments que par son pic à 364 keV, d'où un risque de confusion en cas d'interférence (il n'y en pas en principe). Afin de vérifier sa nature, l'échantillon de sédiment n°7 a été compté à deux reprises. On a constaté que l'activité brute (non corrigée de la décroissance radioactive) décroissait effectivement avec la période de I-131. Son identification dans les échantillons de sédiments n°3 et 7 ne pose donc aucun problème. Son absence dans les autres échantillons n'a pas pu être confirmée en raison d'un trop long délai entre prélèvement et analyse.

Les concentrations en Pu-239+240 dans les sédiments vont de 300 à 3300 pCi/kg. Elles sont globalement 2 fois supérieures à la somme des activités des émetteurs gamma artificiels. Les rapports d'activité Pu-238/Pu-239+240 varient de 0,12 à 0,30. Les rapports Am-241/Pu239+240 sont assez stables : 0,024 à 0,064.

Résultats en pCi/Kg sec

Prélèvements N°	Profondeur (m)	K (%)	Ra-226	Ac-228	Be-7	Ag-110m	Am-241	Ce-144	Co-58	Co-60	Cs-134	Cs-137
Sed 1	7	0,034	216±16	N.D.	130±20	1,5±0,9	193±9	20±6	1,9	266±16	1,5±0,9	13,5±1,5
Sed 2	8	0,035	586±16	8,9±4,6	80±19	1,0±0,8	70±7	26±7	2,0±1,4	68±2	1,6±0;9	3,8±1
Sed 3	2	0,027	388±15	N.D.	86±14	N.D.	47±6	7,1±5,7	1,5	39±2	1,7±0,8	1,7±0;9
Carotte	2	0,021	404±17	7	40±16	1,6±0,9	36±6	6,9±6,3	1,8	86±2	2,6±0,4	2,7±1
Sed 4	5	0,023	260±16	8,4	122±22	1,6±0,8	43±6	12	2,4±1,5	12,3±1,5	1,8±0,7	1,1
Sed 7	5	0,027	259±13	N.D.	53±11	1,5±0,8	24±5	5,8±5,7	1,5	44±1,7	2,4±0,8	1,28±0,8
Sed 8	5	0,024	269±12	N.D.	68±18	0,5±0,5	10±4	4,3±3,8	1,1±0,9	7,9±1,1	0,58±0,5	0,6±0,45

Eléments naturels

N.D. = Non détecté

Prélèvements N°	Profondeur (m)	Eu-155	I-131	Mn-54	Ru-103	Ru-106	Sb-125	Zr-95	Pu-(239+240)	$\frac{\text{Pu-238}}{\text{Pu-(239+240)}}$
Sed 1	37	923±8	360	18±1,6	4,5±2,4	29±9	8,5±3	3,5±2,5	3367±70	0,296±0,006
Sed 2	48	290±4	370	1,3±0,8	8,9±2,4	16,3±7,4	9,1±2,8	5,4±2,3	1302±31	0,296±0,01
Sed 3	42	155±4	152±28	1,3	2,2±1,3	16±6,4	12±3	3,1	907±22	0,253±0,010
Carotte	42	122±4	158±119	2,1±0,9	5,5±1,8	14±9	9,3±2,7	3,6±2,2	565±21	0,214±0,014
Sed 4	25	113±4	820±400	2,7±0,8	3,3±2,5	16±8	4,9±2,6	5,4	796±17	0,126±0,006
Sed 7	35	146±4	790±29	0,9	2,3	8,2±6,3	3,6±2,4	2,4±1,7	1006±26	0,301±0,012
Sed 8	15	55±3	1380±420	1	M.D.	9	3,2	2,8±1,5	339±11	0,234±0,016

III.3.2 Plancton (tableau 2)

Tableau n°2 : Activités mesurées dans le plancton à la date du 23 juin 1987

Elément	Concentration	(Résultats en pCi/kg sec)
K en %	< 12	
Ra-226	n.d.	
Ac-228	n.d.	
Be-7	1920 ±	450
Ag-110m	< 63 ±	25
Am-241	220 ±	80
Ce-144	< 380 ±	200
Co-58	< 38 ±	33
Co-60	340 ±	50
Cs-134	n.d.	
Cs-137	70 ±	40
Eu-155	910 ±	120
I-131	22100 ±	800
Ru-103	< 59 ±	29
Ru- 106	< 640 ±	270
Sb-125	< 220 ±	190
Zr-95	< 79 ±	56
Pu-239+240	9686 ±	144
Pu-238 / Pu-239+240	0.109 ±	0.003

Aucun radioélément naturel n'a pu être mesuré dans le plancton (Ra-226, Ac-228, K-40), à l'exception du Be-7 assez abondant (1,9 pCi/g). Cette différence avec les sédiments résulte en partie du manque de sensibilité de la mesure sur une très faible quantité de matière, mais permet aussi de vérifier la rareté de toute matrice minérale (sédiments en suspension) dans l'échantillon recueilli.

Le cortège des radioéléments artificiels est en tout point identique à celui trouvé dans les sédiments.

La concentration en Pu-239+240 dans le plancton est de 9686 ± 144 pCi/kg et reste inférieure à la somme des émetteurs gamma artificiels (23600 pCi/kg dont 22100 pour l'iode 131). Le rapport d'activité Pu-238/Pu-239+240 est de 0.109 ± 0,003. Le rapport Am-241/Pu-239+240 est de 0,023.

L'iode 131 a pu être détecté sans ambiguité dans la mesure où deux pics spécifiques de cet élément ont pu être utilisés.

II.3.3 Radioéléments dissous

Tableau 3 : ACTIVITES MESUREES DANS L'EAU A LA DATE DU 22 JUIN 1987

Résultats en fCi/l

Prélèvements N°	Profondeur	Be-7	Co-60	Cs-134	Cs-137	$\frac{Cs-134}{Cs-137}$
Passe s	1	260±44	< 9,6	≤ 5,1±3,2	133±6	< 0,04
Passe f	45	200±26	2,2±0,9	< 6,0	115±6	< 0,05
P1 - s	1	144±46	< 2,1	≤ 4,6	93±5	≤ 0,05
P1 - f	31	165±66	6,6±2,7	70,2±4,9	293±8	0,24
P3 - s	1	470±40	5,1±1,2	5±3,5	115±5	0,04
P3 - f	35	433±26	4,85±1,5	< 7	112±4	< 0,06
P5 - s	1	280±40	5,7±1,1	28,4±3,5	158±5	0,18
P5 - f	35	229±30	1,5±1,2	< 12	97±3	< 0,12

Prélèvements	Profondeur	Eu-155	Mn-54	Pu-(239+240)	$\frac{Pu-238}{Pu-(239+240)}$
Passe s	1	N.D.	< 1,4	1,05±0,13	0,13±0,04
Passe f	45	N.D.	< 0,8	0,4 ±0,03	0,16±0,03
P1 - s	1	< 7,1	< 2,3	3,4 ±0,2	0,326±0,03
P1 - f	31	< 6,9	< 1,5	3,2 ±0,2	0,241±0,03
P3 - s	1	N.D.	2,1±1	8,4 ±0,6	0,224±0,02
P3 - f	35	N.D.	≤ 2,6±0,9	7,5 ±0,3	0,223±0,01
P5 - s	1	N.D.	N.D.	9,4 ±0,8	0,162±0,02
[illegible]	[illegible]	N.D.	[illegible]	[illegible]	[illegible]

N.D. = Non Détecté

Seuls 4 radioélements ont pu être déterminés systématiquement dans les 4 stations : Be-7, Cs-137, Pu-238 et Pu-239+240. Les autres radioéléments parfois détectés comprennent le Co-60 (maximum 10 fCi/l), le Mn-54 (difficilement mesurable), et le Cs-134. Pour l'Eu-155, on a seulement pu déterminer la limite supérieure de sa concentration à la station n°1. La présence éventuelle d'iode 131 dissous n'a pu être mise en évidence en raison du délai entre prélèvements et comptages et de la nature des extractions chimiques réalisées. L'Am-241 n'a pu être déterminé en spectrométrie gamma, méthode beaucoup moins sensible que la spectrométrie alpha. $fc_1 = 10-15$

Les concentrations en Be-7 varient de 144 à 470 fCi/l. Les différences de concentration entre les eaux de surface et de fond ne sont pas significatives.

A l'inverse des radioéléments précédents, les concentrations en plutonium dissous sont les plus variables : 0,4 à 9,4 fCi/l. Les rapports d'activité Pu-238/Pu-239+240 en moyenne de 0,21 sont plus constants.

La radioactivité naturelle des eaux de mer est principalement produite par le potassium-40. Elle atteint environ 350 000 fCi/l.

III.4 Distribution de la radioactivité mesurée

III.4.1 Homogénéité des sédiments recueillis

Les concentrations en radioéléments peuvent varier avec la nature minéralogique du sédiment, sa granulométrie, sa surface spécifique, etc. Le peu de données actuellement disponibles indique *une bonne homogénéité des échantillons analysés*, ainsi que l'atteste l'assez bonne constance des teneurs en radioéléments naturels (Ra-226, K-40). La présence systématique (sauf dans la carotte) de Be-7 dans les sédiments de surface montre l'absence de mélange important avec des dépôts anciens remaniés dans lesquels ce radioélément de courte période (53 jours) aurait disparu. Ses concentrations sont cependant plus faibles que celles rencontrées habituellement dans les sédiments récents des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord (environ 0,5 à 3 pCi/g), probablement en raison de la faible affinité des carbonates bioclastiques pour la plupart des éléments-traces. Toutefois, les retombées atmosphériques varient fortement avec la latitude. Les concentrations en Be-7 dans l'air à la latitude de Mururoa devraient être plus faibles que celles mesurées à 45°N d'environ 10-40 %, mais l'apport atmosphérique est [illegible] par la pluviométrie et des mesures locales seraient nécessaires pour préciser ce point.

Le faible nombre de prélèvements et la maille trop lâche de l'échantillonnage ne permettent pas d'apprécier en détail la distribution de la radioactivité dans l'ensemble du lagon. Les activités sont maximales au point 1 et tendent à décroître vers l'Est. La distribution des radioéléments ne semble pas différente dans les échantillons de sédiments prélevés.

III.4.2 Radioactivité du plancton

Evaluées par rapport au poids de matière sèche, *les concentrations en radioéléments artificiels dans le plancton sont égales ou supérieures à celles mesurées dans les sédiments les plus contaminés.* La forte teneur en Be-7 montre l'efficacité de la fixation des apports atmosphériques par le plancton. Il est donc possible qu'une partie de l'activité en Cs-137 soit également d'origine atmosphérique.

Contrairement à ce qui a été montré dans le cas des sédiments, le rapport de l'Eu-155 au Be-7 est nettement supérieur à ceux du Cs-137, Co-60 et Am-241, suggérant une plus forte affinité du plancton pour les terres rares. Cette observation, qui recoupe certains résultats obtenus par ailleurs avec les oligo-éléments stables, ne repose cependant que sur une seule mesure et demande confirmation.

Le fait le plus remarquable est la forte concentration en I-131 (22000 pCi/kg) qui constitue de loin la plus forte activité rencontrée lors de cette campagne. Cette accumulation de l'iode radioactif dans le plancton est toutefois relativisée si l'on considère le rapport d'activité au Be-7 qui est semblable à celui du sédiment n°7. Les données comparatives sont très rares. *L'activité mesurée à Mururoa* (ainsi que le rapport I-131/Be-7) *est très semblable à celle d'échantillons de phyto- et zooplancton contaminés par les retombées de Tchernobul et recueillis en Méditerranée au large de Villefranche-sur-mer un mois après cet accident.*

En considérant un facteur de concentration de 6000 dans le plancton frais par rapport à la même masse d'eau, *on évalue l'activité de l'eau du lagon à 1,15 pCi/l. Ce chiffre est à rapprocher de la valeur de la concentration maximale admissible de l'eau de boisson qui est de 10 000 pCi/l. La teneur de l'activité totale de l'iode radioactif contenue dans le lagon est faible et ne présente pas de danger pour l'homme.*

Enfin, de faibles teneurs en Cs-134 (environ 75 pCi/kg) ont pu être détectées.

III.4.3 Radioactivité des eaux

a) Radioéléments naturels

Le seul radioélément naturel qui ait été mesuré est le Be-7 (moyenne 273 ± 120 fCi/l). Il est essentiellement apporté par les précipitations. Les valeurs trouvées paraissent plutôt supérieures aux concentrations moyennes de cette zone du Pacifique (45-225 fCi/l : Young & Silker, 1980).

Les plus fortes concentrations (400-500 fCi/ℓ) représentent soit la concentration normale des eaux de surface de cette partie du Pacifique, soit plutôt le résultat d'un apport récent dû aux pluies qui ont précédé la mission. Les plus faibles concentrations (environ 150 fCi/l) peuvent résulter d'un relatif confinement de certaines masses d'eau (station n°1) où le Be-7 de courte période aurait décru, ou bien d'un transfert partiel de cet élément sur la phase en suspension dans les zones les plus turbides.

Ces variations, qui semblent donc témoigner d'une hétérogénéité des masses d'eau, ne peuvent être interprétées en détail faute de données suffisantes sur les variations de salinité et de turbidité.

Ce radioélément n'est reponsable que d'une fraction limitée de la radioactivité naturelle dissoute. La radioactivité naturelle de l'eau de mer est largement dominée par le Potassium. *L'activité en K-40 atteint 350 pCi/ℓ dans le Pacifique Sud, chiffre à comparer aux 0,4 à 0,5 pCi/ℓ du Be-7.*

A cette radioactivité s'ajoute celle des produits de filiation de la chaine de l'U-238 (la contribution de la chaine du Th-232 est négligeable). Les données moyennes des eaux de surface du Pacifique Sud sont les suivantes (en pCi/l ; UNEP, 1984) :

U-238	1,1
Th-234	0,9
U-234	1,2
autres	0,2

b) Radioéléments artificiels

La somme des plus fortes concentrations artificielles mesurées n'atteignant pas 0,4 pCi/l (station n°16), la comparaison avec les radioéléments naturels montre clairement le caractère très limité de la contamination des eaux du lagon. Celle-ci est essentiellement due (parmi les radioéléments que nous avons mesurés) aux isotopes du Cs.

- isotopes du Césium

La plus forte concentration est située à la station n°1 au fond, tandis qu'une valeur encore relativement forte est observée à la station n°5 en surface. Ces 2 échantillons coincident avec ceux qui présentent les rapports Cs-134/Cs-137 les plus forts (0,24 et 0,18). Les limites de détection dans les autres échantillons un peu moins riches en Cs-137 montrent que ce rapport y est aussi plus faible (inférieur à 0,06).

- isotopes du Plutonium

Contrairement au Cs-137, les concentrations en Pu-239+240 dans la passe d'entrée s'individualisent nettement de celles du lagon qui sont environ 10 fois plus fortes. On observe un écart statistiquement significatif d'un facteur 2 entre surface (1,05 ± 0,13 fCi/l) et fond (0,40 ± 0,03 fCi/l). A l'intérieur du lagon, les concentrations sont relativement faibles à la station n°1 (3,3 fCi/l) et plus fortes aux stations 3 et 5 (7,5 - 9,4 fCi/l).

Les rapports d'activité Pu-238/Pu-239+240 sont globalement comparables à ceux dans les sédiments. Ici encore les rapports au niveau de la passe sont nettement plus faibles (0,13 - 0,16) et se rapprochent donc du rapport des retombées atmosphériques globales.

- autres radioéléments

Les données étant lacunaires, leur distribution ne peut être précisée. On notera la rareté de l'Eu-155 dissous qui contraste avec son abondance dans la phase sédimentaire. Au contraire, la présence de Mn-54 (période 312 jours) dissous semble attestée aux stations 3 et 5, alors que cet élément n'a pas été mis en évidence dans les sédiments.

III.5 Origines des radioéléments

III.5.1 Les sédiments et le plancton

a) Influence des retombées atmosphériques

Les seuls radioéléments artificiels dont une partie de l'activité pourrait être imputée aux apports atmosphériques globaux faisant suite aux explosions nucléaires dans l'atmosphère sont le Cs-137, le Cs-134, le Sb-125, ainsi que l'Am-241 et les isotopes du plutonium.

Une telle contribution ne peut être exclue a priori pour le Cs-137, dont les activités sont cependant particulièrement faibles (< 0,6 à 13 pCi/kg), et pour Sb-125. Le Cs-134 n'a pas été détecté et un héritage des retombées de Tchernobyl semble improbable. En effet, le rapport Cs-134/Cs-137 dans ces retombées était de 0,5 à Paris en mai 1986, soit 0,33 après décroissance en juin 1987 ; ce rapport est inférieur à 0,11 dans l'échantillon de sédiment n°1. Par ailleurs, l'influence de l'accident de Tchernobyl n'a pas été observée dans l'hémisphère sud.

Il existe de l'Am-241 et des isotopes du plutonium dans les retombées globales liées aux explosions nucléaires atmosphériques mondiales, mais les activités rencontrées localement, atteignant 200 et 3600 pCi/kg respectivement, sont beaucoup trop élevées pour provenir de cette source générale.

b) Influence des essais nucléaires locaux

Il est donc clair que les activités en Am-241, Co-60, Eu-155 et isotopes du plutonium proviennent des divers essais nucléaires effectués dans l'atoll et sont très certainement imputables aux traces des anciens essais atmosphériques.

La somme des activités artificielles est souvent inférieure à la somme des activités des radioéléments naturels mesurés, ou au maximum supérieure d'un facteur d'environ 2. Cette comparaison des activités artificielles et naturelles ne préjuge pas de la présence possible de purs émetteurs beta et ne tient pas compte des autres émetteurs gamma naturels dont les concentrations n'ont pas été déterminées (Pb-214, Bi-214, etc).

c) Les causes accidentelles

La présence d'Iode-131 ne peut être attribuée qu'à une émission récente, la demi-vie de ce radioélément n'étant que de 8 jours.

L'émission d'iode s'est-elle produite le jour où nous assistions au tir, ou lors d'un tir précédent ? Quel est le chemin suivi par l'Iode ?

Après avoir évoqué les possibilités de fuite par une fissure qui se serait propagée de la cavité jusqu'à la surface, traversant le basalte puis le corail, ou par le puits de forage qui serait plus ou moins étanche, *les responsables du CEA nous ont fourni une explication pour cette présence d'iode. Le 20 mai 1987 lors d'un post-forage de contrôle, réalisé après un tir, une fuite accidentelle s'est produite au moment du désaccouplage des vannes situées au dessus de la tête de forage.* Des mesures effectuées localement par les services du CEA ont permis d'estimer l'activité dégagée à 40 Ci. Du Xénon 133 (période 5,3 jours) aurait également été relaché. On nous a assuré du caractère tout à fait exceptionnel de ce type d'accident.

Malgré le caractère plausible des explications de l'accident fournies par les responsables du CEA, nous n'avons pas pu en vérifier directement le bien fondé.

III.5.2 Les radioéléments artificiels dissous

a) Isotopes du Césium

* *Les concentrations moyennes en Cs-137 dissous dans le lagon sont de 144 ± 76 fCi/ℓ*, et à peine inférieures dans la passe d'entrée (115-133). Ces résultats sont identiques à ceux obtenus de 1983 à 1985 par le SMSR : lagon 152 fCi/l ; extérieur au nord du lagon : 87 fCi/l.

Les teneurs en surface dans le Pacifique nord-ouest en 1976-1979 étaient de 130-200 fCi/l (eaux non filtrées, Nagaya & Nakamura, 1981). *Les concentrations mesurées en 1984 dans les eaux du Pacifique sud-équatorial étaient de 90 ± 30 fCi/ℓ.*

Alors qu'une partie du Cs-137 des sédiments peut être imputée aux tirs atmosphériques locaux anciens, il est très vraisemblable qu'une fraction non négligeable du Cs-137 dissous du lagon provient des retombées atmosphériques globales. L'échantillon prélevé à 45 m de profondeur dans la passe ne représente pas nécessairement l'eau du Pacifique, et il est possible qu'un prélèvement plus profond eut montré une concentration encore plus faible.

* L'origine du Césium-134 est plus problématique. En raison des trop faibles concentrations, on n'a pu donner qu'une limite supérieure du rapport Cs-134/Cs-137 dans les sédiments (0,1 à 1,0). Aux stations 1f et 5s (cf annexe 1), ce rapport dissous est de 0,24 et 0,18. Il n'est donc pas possible de confirmer l'absence de Cs-134 dans les sédiments.

Les retombées de Tchernobyl ont apporté des quantités importantes de Cs-134 dans l'hémisphère nord, mais à notre connaisance l'impact de cet accident n'a pas été décelé dans l'hémisphère sud (Cambray et al, 1987).

Les retombées atmosphériques globales ne contiennent pas de Cs-134 et les sédiments de l'atoll d'Eniwetok non plus (McMurphy et al, 1985). *Si cet élément provient des tirs aériens anciens de Mururoa, le rapport Cs-134/Cs-137 mesuré aurait été 18 fois supérieur en 1974, soit d'environ 3,6. Nous ne savons pas si cette valeur est vraisemblable. Dans le cas contraire, il faudrait imputer l'origine du Cs-134 aux essais souterrains.*

Il reste également à envisager une contamination de certains échantillons au cours du prétraitement. Du Cs-134 a en effet été employé comme traceur à Mururoa.

Toutefois, la présence de Cs-134 n'a été détectée qu'aux stations les plus proches des zones les plus contaminées de l'atoll. Si cette coincidence n'est pas fortuite, elle indiquerait une remobilisation locale du Cs-134 à partir de certains éléments du lagon.

Au cours de la confrontation des résultats des mesures effectuées par le SMSR et la Fondation Cousteau, aucune information n'a été fournie qui permettrait d'expliquer la présence de Cs-134 dans certains prélèvements.

b) Isotopes du plutonium

Les concentrations observées aussi bien dans les sédiments que dans les eaux sont beaucoup trop élevées pour pouvoir être attribuées aux retombées atmosphériques globales, *et le plutonium dissous du lagon (Pu-239+240 : 3,2-9,4 fCi/l) est donc d'origine locale et traduit une remobilisation à partir des dépots sédimentaires. Toutefois, les concentrations dans le lagon sont 2 à 10 fois inférieures aux concentrations moyennes d'Eniwetok (Noshkin, 1980).*

Au nord des îles Samoa, les concentrations en Pu-239+240 dissous dans les eaux de surface étaient en moyenne de 0,12 fCi/l en 1978-1981 (Livingston et al, 1987). Cette valeur se rappproche de notre mesure dans les eaux prélevées à 45 m de profondeur dans la passe d'entrée du lagon (0,40 fCi/l). A la même station la concentration en surface est 2,5 fois plus forte (1,05 fCi/l).

Ces résultats indiquent une dilution significative des eaux du lagon par des eaux océaniques moins contaminées et une stratification probable des eaux à cet endroit. Il est vraisemblable que les eaux de surface représentent le flux sortant d'eaux plus chaudes. Dans ce cas, la concentration à 45 m résulterait d'un mélange partiel de ces eaux avec le flux entrant d'eaux froides. Il manque une mesure dans les eaux de fond (vers 1300 m) qui mettrait en évidence la concentration des eaux océaniques.

Dans le lagon, l'identité des concentration en Pu-239+240 dans les eaux de surface et de fond (stations 1, 3 et 5) semble traduire un mélange vertical rapide des eaux. Les études à Bikini ont montré au contraire un enrichissement important des eaux de fond au dessus des sédiments les plus contaminés (Schell et al, 1980). On ne peut exclure à Mururoa qu'il en soit de même dans les zones où sont déposés les sédiments plus contaminés que ceux que nous avons pu échantillonner.

Les rapports Pu-238/Pu-239+240 sont élevés dans les eaux et les sédiments (0,16-0,22) et très supérieurs à celui de la retombée des tirs nucléaires mondiaux. A Mururoa le rapport le plus faible est encore de 0,11 (plancton), *ce qui montre que dans aucun des échantillons du lagon le plutonium ne peut être totalement imputé aux apports atmosphériques globaux.*

Des rapports Pu-238/Pu-239+240 parfois élevés, atteignant 0,55, ont été mesurés dans les sédiments et les eaux à Eniwetok (Noshkin, 1980), mais l'origine des fortes valeurs n'est pas précisée. A Bikini le rapport moyen n'est que de 0,03 mais atteint localement 0,52 à la suite d'excès de Pu-238 résultant de la décroissance de Cm-242 utilisé comme traceur des transferts dans certains sédiments (Schell et al, 1980).

Au cours de la tempête du 12 mars 1981 qui a sévi sur l'atoll de Mururoa, des fûts contenant des déchets radioactifs ont été rejetés dans le lagon. De plus, des plaques de goudron qui fixaient du plutonium ont été arrachées et jetées dans le lagon. Le secret défense entoure cette affaire. Le chiffre d'une vingtaine de kg de Pu remobilisé est avancé. Il ne nous sera ni confirmé ni démenti. Il est impossible de remonter à ce chiffre uniquement à partir des mesures effectuées sur 8 échantillons prélevés en dehors des zones dites "chaudes".

Le levé du secret défense sur cette affaire permettrait d'interpréter les forts rapports Pu-238/Pu-239+240 mesurés à Mururoa et de connaître l'activité du plutonium attribuable aux retombées atmosphériques et à la remobilisation des déchets ou éventuellement à des fuites accidentelles.

c) Autres radioéléments

Ils ne proviennent pas des retombées atmosphériques globales. L'Eu-155, qui contribue significativement à l'activité gamma des sédiments, n'a pu être mesuré dans les eaux, en raison de teneurs trop faibles. On n'a pu que déterminer la limite supérieure des concentrations à la station n°1 (7 fCi/l). Les concentrations en Co-60 dissous sont pratiquement identiques ; leur mesure étant de ce fait entachée d'une erreur importante, leur dispersion dans les eaux de l'atoll parait aléatoire. Signalons enfin quelques traces de Mn-54 dissous (1-2,5 fCi/l) aux stations n°3 et 5. Cet élément n'avait pas été mis en évidence avec certitude dans les sédiments.

III.6 Apports au Pacifique

Une évaluation du flux de radioéléments sortant de l'atoll nécessite un minimum de connaissance de l'hydrologie, des concentrations dissoutes et particulaires, et des turbidités. Malgré l'insuffisance de nos données, nous tenterons ci-dessous de faire une évaluation préliminaire de l'ordre de grandeur du flux sortant.

Les estimations qui suivent ne préjugent nullement d'eventuels flux radioactifs atteignant le Pacifique par l'extérieur de l'atoll.

III.6.1 Echange des eaux

La diminution en profondeur au niveau de la passe des concentrations en Pu-239+240 dissous qui se rapprochent des valeurs moyennes du Pacifique équatorial, et celle des concentrations en Cs-137 dissous mesurées par Bourlat indiquent *la vraisemblance d'un flux sortant dans la tranche d'eau superficielle plus chaude. Ces observations sont en accord avec celles de Rougerie et al, 1984.*

Selon ces auteurs, le volume des eaux de l'atoll est de 2,5 à 3,5 milliards de m3 et le temps de résidence des eaux de 23 à 92 jours. En prenant un volume d'eau de 3 milliards de litres, *le flux entrant ou sortant serait de 12 à 48 milliards de m3 par an.* On a utilisé cette valeur pour calculer le flux de radioéléments qui s'échappe de l'atoll par la passe. Il faut pour cela tenir compte des concentrations dans les eaux qui entrent.

III.6.2 Concentrations

On peut estimer la concentration moyenne en Pu-239+240 dissous dans le Pacifique équatorial à 0,12 fCi/l (Livingston et al, 1987). Les mesures de Bourlat indiquent que la teneur en Cs-137 dissous au fond de la passe d'entrée est inférieure à 27 fCi/l. Dans le cas des radioéléments de courte période ou absents des retombées, les concentrations dans cet apport d'eau profonde sont a priori nulles. Nous avons donc déduit ces concentrations dans les eaux marines profondes des concentrations moyennes du lagon et utilisé le flux d'eau qui sort mentionné ci-dessus.

Il faudrait également prendre en compte le flux de radioéléments particulaires. Les matières en suspension paraissent presque exclusivement biogéniques. La concentration en plancton des eaux superficielles peut être estimée à 0,1 mg de matière sèche par litre, ou moins. En utilisant les concentrations des tableaux 2 et 3, on peut calculer que la contribution du plancton à la radioactivité d'un litre d'eau de mer ne dépasse pas 1 % de l'activité totale pour le Co-60, le Cs-137 et l'Eu-155 ; elle atteint 7 à 13 % pour le Pu-238 et le Pu-239+240 respectivement.

Dans ces conditions, les radioéléments sont essentiellement exportés sous forme dissoute et la contribution des matières en suspension est négligeable. Il faut noter que ces calculs n'auraient pas de signification dans le cas d'un radioélément de très courte période comme l'iode 131.

III.6.3 Résultats

L'estimation des flux de radioéléments qui sortiraient actuellement de Mururoa avec les eaux de surface sont reportés dans le tableau suivant, avec quelques données comparatives caractéristiques de l'industrie nucléaire civile européenne.

Eléments	Concentration fCi/l	Flux sortant Ci/an	Rejets liqu. Centrale REP 4x900MWe (1982) Ci/an	Rejets liqu. La Hague 1982 Ci/an	Rejets liqu. Windscale 1984 Ci/an
Co-60	4,3	0,05-0,2	$\simeq$ 3,4	84	35
Eu-155	7	<(0,1 -0,3)	?	?	< 8
Mn-54	1,9	$\leqslant$(0,02-0,1)	$\simeq$ 0,2	?	< 5
Cs-137	115	1,4 -5,7	$\simeq$ 1,5	1364	11700
Pu-238	1,5	0,02-0,07	?	5,1	70
Pu-239 +240	6,7	0,08-0,32	?		224

La principale source radioactive est le Cs-137 ; l'activité apportée au Pacifique (1,4 à 5,7 Ci/an) est comparable aux rejets liquides d'une centrale nucléaire équipée de 4 réacteurs à eau pressurisée de 900 MWe. Les apports d'autres émetteurs gamma comme le Co-60 et l'Eu-155 sont nettement inférieurs. *L'apport total en plutonium (au plus 0,4 Ci/an) équivaut à environ 8 % des rejets de l'usine de retraitement de La Hague.*

III.7 Comparaisons mesures Fondation Cousteau / SMSR

** Les quelques différences qui apparaissent entre les mesures effectuées par la Fondation Cousteau et le SMSR ne sont pas de nature à remettre en cause les résultats précédemment présentés.*

La Fondation Cousteau a recherché la présence de radionucléides d'origines naturelle et artificielle dans tous les prélèvements effectués. Par contre, le SMSR ne n'est intéressé qu'aux radionucléides artificiels.

Les limites de détection de l'instrumentation dont dispose l'Institut de Biogéochimie Marine sont très basses, ce qui a permis la détection des traces de certains radioéléments qui n'ont pas été détectés par le SMSR.

* Dans les sédiments et la carotte, le SMSR n'a mesuré que l'activité de l'Am-241, Eu-155, Co-60 et le Pu-238, Pu-239+240 ; alors que la Fondation Cousteau s'est intéressée à d'autres éléments importants comme le Cs-134, I-131, Be-7 et Ra-226.

Il est à noter que les activités de Eu-155 mesurées par le SMSR sont 1,7 fois plus élevées que celles évaluées par la Fondation Cousteau.

Les activités des Pu-238 et Pu-239+240 sont identiques pour les deux organismes.

* Dans le plancton, l'activité du Pu-239+240 mesurée par la Fondation Cousteau est deux fois plus élevée que celle mesurée par le SMSR.

* Le SMSR a mesuré le Pu particulaire contenu dans l'eau de mer, alors que la Fondation Cousteau ne s'est intéressée qu'aux radioéléments dissous. Le traitement différent des prélèvements d'eau peut expliquer les écarts entre les résultats obtenus par le SMSR et la Fondation Cousteau mais les ordres de grandeur sont conservés.

IV EVALUATION DES RISQUES DES TIRS NUCLEAIRES SOUTERRAINS

* *L'objectif de notre mission* n'était pas d'évaluer les conséquences sur l'homme qu'ont pu avoir les explosions nucléaires atmosphériques effectuées à Mururoa et Fangataufa entre 1963 et 1975, mais plutôt *d'essayer d'apprécier les risques d'une contamination radioactive de l'atoll et de son environnement proche et lointain, de tenter d'estimer les conséquences des ébranlements successifs des tirs nucléaires sur la structure de l'atoll ainsi que les risques d'un affaissement partiel de la couronne corallienne.*

IV.1 Structure géologique de l'atoll

IV.1.1 Le socle corallien

* Le déplacement des points de tirs à l'intérieur du lagon est une précaution qui permet de limiter les risques hydrauliques. Un certain nombre de zones ont été fragilisées par les tirs successifs et puissants qui ont été réalisés sur la périphérie de l'atoll, en particulier dans le Nord et le Sud. Cependant, *on a pu observer, directement, qu'un tir effectué à l'intérieur du lagon provoquait de nouvelles fractures dans la dalle calcaire du platier déjà fragilisée.*

Les ébranlements engendrés par les prochains tirs continueront à fragiliser la couronne corallienne et à accélérer le vieillissement de cet atoll, soit en provoquant la chute des blocs cyclopéens déjà en partie détachés par les failles antérieures, soit en provoquant de nouvelles failles.

* *On peut supposer que ces ébranlements et les fractures affectent l'ensemble du socle calcaire remobilisant du même coup les failles naturelles et le réseau karstique du socle, augmentant ainsi la perméabilité de l'ensemble de l'édifice calcaire.*

IV.1.2 Le socle volcanique

* En ce qui concerne le socle volcanique, il est évident que sa perméabilité est localement augmentée par les fractures artificielles, les cheminées d'effondrement et les puits. L'ébranlement accompagnant chacun des tirs doit remobiliser les fractures naturelles ainsi que les fractures artificielles dues aux tirs antérieurs. Ces augmentations de perméabilité sont probablement très localisées, mais se trouvent juste au niveau des zones sensibles : les chambres où sont vitrifiés les produits radioactifs. De plus, on peut se demander si l'onde de choc d'une explosion ne modifie pas le confinement des produits radioactifs des précédents tirs : fissuration des réservoirs vitrifiés.

Il ne faut pas estimer l'effet de chacun des tirs pris indépendemment, mais considérer l'effet mécanique dû à la synergie des tirs successifs ; cet effet ne peut être égal à la somme des tirs successifs puisque la roche encaissante se modifie à chaque tir.

* Dans ces conditions, les valeurs de la résistance, de la porosité, de la perméabilité d'un échantillon de roche prélevé par carottage à un moment donné ne peuvent être véritablement représentatives de la structure de Mururoa. La perméabilité d'échantillons de roches prélevées dans le basalte varie de 1 à 100 milliDarcy suivant les zones et la profondeur de prélèvements. Le C.E.A. considère qu'en valeur moyenne la vitesse de circulation de l'eau interstitielle à l'intérieur du basalte est d'environ 1 m/an à 1000 m de profondeur.

Une valeur moyenne pour la vitesse de circulation de l'eau dans le basalte n'a pas grande signification car elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité de la roche. L'eau passera par les failles si elles existent.

La mesure in situ de la perméabilité de la roche conduit à la mise en oeuvre de moyens importants. Une telle expérimentation menée sur un ancien puits de tir a montré que la perméabilité dans le basalte sain au dessus de la zone fracturée était d'environ 1 milliDarcy.

La cheminée d'effondrement est comblée par des éléments très grossiers. Les vides entre les éléments sont très importants puisque leur volume, s'ajoutant à celui des roches qui s'effondrent, empêche l'effondrement de gagner la surface.

Ajoutons que, si la chambre et la cheminée se remplissent d'eau interstitielle en quelques semaines, cela signifie que la perméabilité de la roche encaissante est suffisante pour cela.

** Les travaux de Rougerie ont montré que dans les 450 premiers mètres (socle corallien), la vitesse de circulation de l'eau peut atteindre 90 m par an. La seule barrière réellement efficace entre les radioéléments artificiels créés au moment des explosions nucléaires et l'environnement marin est constitué par l'épaisseur de roche volcanique saine qui sépare le sommet de la cheminée d'effondrement et la base de l'assise corallienne.*

* Selon les responsables du CEA-DIRCEN, la profondeur d'un tir est calculée de telle sorte que l'épaisseur de roche volcanique saine soit égale à 2 fois le rayon de la cavité. *Ceci signifie que l'épaisseur de roche volcanique saine au dessus de la zone fissurée est de 100 à 300 m.*

Dans cette hypothèse, de l'eau interstitielle qui aurait été contaminée par des radioéléments artificiels qui n'interagiraient pas avec la roche (tritium, gaz rares...) pourrait commencer à diffuser très lentement dans le lagon après une période de 100 à 300 ans.

IV.2 Risques de contamination radioactive

IV.2.1 Retour des éléments les plus volatils

* Le rapport Tazieff soulignait "l'absence systématique de dosage des radioéléments les plus volatils (Iode, Tritium) au niveau du puits, après le tir, sous prétexte que ces produits sont peu préoccupants d'un point de vue sanitaire." ... "En effet, leur absence constatée permettrait de confirmer l'étanchéité du dispositif, donc l'aspect non contaminant des explosions souterraines, au moins à court terme."

Les nucléides les plus volatils comme le krypton sont depuis la mission Tazieff systématiquement recherchés dans l'eau du puits de tir. L'analyse des prélèvements aurait montré jusqu'à maintenant la parfaite étanchéité du bourrage.

* Le rapport Atkinson concluait qu'"à l'évidence le bouchon n'est pas étanche, et des produits de fission volatils s'échappent du site, au moment du tir et pendant la période qui suit." Ce résultat découlait de la découverte dans l'air contenu dans les terrains superficiels de l'un des éléments les plus volatils, le Tritium, à des doses non négligeables. Ce résultat ne fut pas confirmé par les mesures que le C.E.A. a entreprises par la suite.

* Les responsables du CEA nous ont affirmé que l'Iode 131 que nous avions décelé dans le seston et dans 2 prélèvements de sédiment avait une origine accidentelle (fuite au cours d'un post forage) et n'avait rien à voir avec une fuite de cet élément par le puits d'un tir précédent.

Le puits constitue le passage privilégié par lequel les radioéléments les plus volatils pourraient revenir à la surface. L'analyse systématique de l'eau du puits de tir doit être poursuivie afin de confirmer le confinement total de tous les radioéléments dans le sous-sol de l'atoll.

IV.2.2 Retour des éléments "moyennement" solubles

* Il apparait, en première approximation et en fonction des éléments en notre possession ou portés à notre connaissance, que *le temps de migration vers la surface de certains radioéléments pourrait être dans certains cas voisin de 100 ans. Ceci conduit à considérer avec attention les radioéléments de durée de vie moyenne comme le Césium 137 (Cs-137) et le Strontium 90 (Sr-90) dont la durée de vie est de 30 ans.*

Le Cs-137 et le Sr-90 sont des radioéléments importants pour les raisons suivantes :

- Ils sont concentrés par les organismes vivants. En effet, le Cs est un mimétique du Potassium (K) et le Sr est, lui un mimétique du Calcium(Ca). Tous deux jouent un rôle fondamental dans les organismes vivants, en particulier ceux des récifs coralliens.

- Cs et Sr sont des éléments qui s'adsorbent difficilement : leurs coefficients de distribution respectifs, dans le basalte, sont 10 pour le Cs et <9 pour le Sr. Par conséquent, leur vitesse de migration est en moyenne moins rapide que celle des éléments les plus volatils (Iode et Tritium), mais infiniment plus rapide que celle des éléments qui s'adsorbent très facilement, comme le Plutonium dont le coefficient de distribution dans le basalte est de l'ordre de 200 (Atkinson 1983).

** Le Sr et le Cs ou leurs précurseurs sont suffisamment volatils pour ne pas se retrouver piégés dans le verre et se retrouvent donc dans la cheminée, et migrent rapidement vers le haut de cette zone très fracturée.*

* C'est bien l'épaisseur de 100 à 300 m du socle volcanique sain qui sépare le haut de la cheminée du socle corallien qui représente la seule barrière susceptible de ralentir suffisamment longtemps la migration des radioéléments artificiels.

IV.2.3 Retour des éléments les moins solubles

* Les produits radioactifs les moins volatils sont piégés dans la lave après le refroidissement des roches volcaniques fondues par l'explosion. C'est-à-dire que *les éléments radioactifs "mélangés" à la roche en fusion sont pris dans le verre qui forme le pourtour et surtout le fond de la chambre.*

* On peut donc en première approximation comparer ces éléments radioactifs piégés dans la lave avec les déchets hautement radioactifs des centrales nucléaires stockés dans des verres spéciaux. La comparaison se limitera aux moyens de stockage des produits radioactifs afin d'empêcher leur retour dans la chaîne alimentaire.

On isole par des barrières artificielles et naturelles les déchets radioactifs des centrales pour qu'ils ne contaminent pas la biosphère. Quelles sont ces barrières, jugées nécessaires pour stocker les déchets ? Et retrouve-t-on de telles barrières à Mururoa ?

* Les déchets sont coulés dans des verres spéciaux, des borosilicates qui se dissolvent dans l'eau à la vitesse de 0,035 g.cm-2.an-1 à 100°C. Ces verres sont plus résistants, homogènes et surtout bien moins faillés que les verres résultants de la fusion des roches volcaniques de la chambre. L'effondrement de la cheminée doit notablement augmenter le réseau de fractures qui entament le verre. On peut estimer que le taux de dissolution du verre de la chambre est 10 fois supérieur à celui des borosilicates. Néanmoins à 25°C le taux de dissolution du verre est 10 fois plus faible que celui à 100°C. Ces hypothèses conduisent à un taux de dissolution de 0,035 g.cm-2.an-1.

D'autre part, les déchets des centrales sont totalement piégés dans les borosilicates, leur répartition est homogène, ce n'est vraisemblablement pas le cas des produits radioactifs résultant de l'explosion qui subissent une pression et une température infiniment supérieurs et sont "projetés" vers la périphérie de la chambre.

Il faut noter que l'activité du Pu-239 contenu dans les verres de stockage est en moyenne de 3 mCi/g, alors que cette activité tombe à 1,3 µCi/g dans la lave.

Enfin, *les déchets des centrales piégés dans les borosilicates sont enfermés dans des conteneurs en aciers spéciaux pour éviter que la dissolution du verre et la lixiviation de certains éléments très mobiles ne commence trop tôt,* c'est-à-dire avant que leur activité ait fortement décrû. Il va sans dire qu'aucune enveloppe d'acier n'évite le lessivage du verre de la chambre.

* D'autre part, nombre de chercheurs considèrent que ce sont les barrières naturelles qui jouent le rôle le plus important dans le stockage des déchets nucléaires. Aussi le site de stockage doit répondre à des critères très stricts. *L'un des critères les plus importants est l'absence d'eau, et surtout d'eau circulante. En tout état de cause, le socle volcanique d'un atoll, totalement gorgé d'eau, est le plus mal choisi !*

* Un autre critère important est l'absence de faille. Or, en plus des failles naturelles qui affectent le socle volcanique, l'explosion provoque la formation autour du site de stockage (la chambre) d'un véritable réseau de fissures.

Quant à la nature des roches, les roches volcaniques sont bien loin d'être les meilleures. Leur coefficient d'adsorption est infiniment moindre que celui des vermicullites (micas) ou de l'illite (argile).

* *L'atoll de Mururoa est par conséquent un très mauvais site de stockage de déchets radioactifs...* Il n'y a aucune raison de croire que si certains critères de confinement semblent nécessaires au stockage des déchets des centrales nucléaires civiles, il ne soient plus nécessaires pour stocker les déchets des essais nucléaires militaires.

IV.3 Evaluation de l'activité des nucléides contenus dans le basalte de l'atoll de Mururoa

* Pour mener à bien cette évaluation, il faudrait connaitre la composition de chaque engin, le rendement de fission, les éléments créés par activation en particulier lors d'une explosion du type H ou N, la puissance des tirs. Malheureusement, ces informations relevant du domaine du secret militaire ne sont pas divulguées par les autorités.

Par contre, des estimations peuvent être faites à partir des retombées qui ont suivi les essais nucléaires atmosphériques. En effet, ces essais ont entraîné la retombée sur l'ensemble du globe d'une quantité importante de radionucléides artificiels formés par fission et activation. Les principales informations sont contenues dans un rapport établi en 1982 par le Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR).

* *Par ailleurs, il est intéressant de comparer l'estimation de l'activité des radionucléides produits par les explosions nucléaires souterraines effectuées à Mururoa depuis 1975 avec l'activité des radionucléides présents dans les combustibles irradiés des centrales nucléaires.*

L'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) nous a communiqué un document intitulé "Paramètres relatifs à un combustible irradié dans un réacteur à eau pressurisée EP" qui permet de calculer l'activité des principaux radionucléides produits par tonne d'uranium irradié dans un réacteur à eau pressurisée (REP ou PWR).

Une tranche de centrale nucléaire de 1000 MWe fonctionnant 6600 heures par an et produisant environ 6,6 milliards de KWh consomme annuellement 27 tonnes d'uranium enrichi à 3,25 %.

** L'activité du Stromtium-90 et du Césium-137 produits par les explosions de bombe A d'une puissance totale d'une Mégatonne 10 ans après l'évènement est de 260 x 10^3 Ci, ce qui représente l'activité du St-9 et du Cs-137 contenus dans 1,5 t d'uranium irradié après 3 ans de refroidissement.*

La production de plutonium 239 et 240 par les essais nucléaires dans l'atmosphère est évaluée à 350 x 10^3 Ci pour une énergie de fission de 217 Mt, soit une production de 1600 Ci/Mt. Cette activité correspond à celle du Pu-239+240 produit par 2 tonnes d'uranium irradié après 3 ans de refroidissement.

Dans l'hypothèse où toutes les explosions nucléaires souterraines réalisées jusqu'à maintenant à Mururoa étaient du type bombe A (1 à 2,5 Mt), on constate que l'activité du St-90 et du Cs-137 est comprise entre 260 000 et 650 000 Ci, et celle du Pu-239+240 est comprise entre 1600 et 4000 Ci.

Les chiffres précédents sont à rapprocher de la valeur indiquée par le C.E.A. en Pu-239+240 contenu dans l'atoll qui serait d'environ 8000 Ci.

* Les actinides contenus dans l'uranium irradié des centrales nucléaires sont stockés après avoir été traités dans des usines spécialisées comme celle de la Hague en France ou Sellafield ex. Windscale en Grande Bretagne. Ce traitement conduit en particulier à retirer la majeure partie du Pu de l'uranium irradié. De telles usines de retraitement rejettent dans l'atmosphère et dans l'eau de refroidissement des quantités importantes de Curies de radioéléments.

Par exemple, vers 1980 l'usine de Winscale rejetait en mer plusieurs centaines de milliers de Curies de radioéléments variés. Ces rejets semblent avoir diminué et atteindraient maintenant un niveau équivalent à ceux de la Hague, soit plusieur dizaines de milliers de Curies.

Par contre, les rejets atmosphériques en Kr-85 seraient d'environ 1 million de Curies par an à La Hague et à Windscale.

Les sous-marins nucléaires auraient rejeté en mer environ 1 million de Ci par suite de déversement de résines utilisées pour le dessalement de l'eau de mer et d'un certain nombre de rejets et de fuites qui leur sont associés.

** Même avec une marge d'erreur d'un facteur dix, on constate que l'activité totale des radioéléments produits par les essais nucléaires souterrains est inférieure à celle des radioéléments produits annuellement par une centrale nucléaire PWR de 900 MWE.*

Comme le confinement des radioéléments dans le basalte est certainement supérieur à plusieurs centaines d'années, sauf accident, l'activité des produits de fission qui pourraient arriver à la surface serait faible. Les taux de concentration de certains produits de fission comme le Strontium et le Césium dans la chaîne alimentaire seraient alors négligeables.

En l'état de nos connaissances, nous constatons la faible valeur relative de l'activité du plutonium piégé dans le basalte de l'atoll. Les longues périodes du Pu-239 et du Pu-240 respectivement 24100 et 6570 ans doivent conduire les responsables du C.E.A. à être très attentifs à toutes les causes physiques et chimiques qui aboutiraient à la remobilisation de ce plutonium.

V CONCLUSIONS DE LA MISSION DE LA FONDATION COUSTEAU

* Le Cdt Cousteau a dirigé les équipes scientifiques et cinématographiques dans le cadre d'une mission exploratoire sur l'atoll de Mururoa où ont lieu les expérimentations nucléaires françaises.

L'objectif de cette mission était triple :

- *tenter d'évaluer les risques de pollution radioactive à court, moyen et long terme.*
- *estimer le flux de radionucléides artificiels sortant actuellement du lagon ;*
- *observer le vieillissement accéléré de l'atoll ;*

* Il est important de noter que l'analyse des phénomènes géologiques et radiologiques qui ont lieu à Mururoa a été menée en comparant les informations orales fournies par les responsables politiques, scientifiques et opérationnels du CEA et de la DIRCEN avec nos propres informations. Aucun document scientifique ne nous a été communiqué ni au cours de notre séjour à Mururoa ni après.

Le secret défense qui entoure les expérimentations nucléaires françaises et qui empêche la publication de certaines études scientifiques de caractère général menées à Mururoa contribue à maintenir le doute sur les informations fournies par les responsables du CEA et de la DIRCEN.

** Nous demandons que le secret défense soit levé pour certains aspects strictement scientifiques, en particulier environnementaux, des essais réalisés, afin de permettre la publication des nombreuses études menées par les chercheurs du CEA en particulier sur la géologie et l'hydrologie de l'atoll.*

V.1 Radioactivité actuelle des eaux du lagon

* *L'analyse des échantillons de sédiment et de plancton que nous avons prélevés dans le lagon a montré que les eaux du lagon avaient été contaminées par de l'iode 131. Deux hypothèses permettent d'expliquer la présence de l'iode : soit une fuite par le bouchon qui ferme le puits du tir, soit une fuite lors d'un post-forage effectué sur un tir précédent comme l'assure les responsables du C.E.A. Nous n'avons pas pu vérifier sur place le bien fondé de ces deux hypothèses.*

* En dehors de cette pollution par l'iode 131, la principale source radioactive est le Cs-137. La présence de ce radionucléide est imputable aux tirs nucléaires atmosphériques qui ont eu lieu principalement entre 1945 et 1975 (date du dernier tir atmosphérique français). Cette activité est du même ordre de grandeur que celle du Césium trouvé dans les eaux du littoral français.

L'activité apportée au Pacifique de 1,4 à 5,7 Ci/an par le Cs-137 est comparable à celle d'une centrale nucléaire équipée de 4 réacteurs à eau pressurisée de 900 MWe.

Aucune explication satisfaisante n'a été fournie pour expliquer la présence de Cs-134. Même si les quantités mesurées ne présentent actuellement aucun danger, la présence de ce radioélément doit être expliquée.

L'apport total en plutonium aux eaux du Pacifique est d'environ 0,4 Ci/an. Ce plutonium provient pour une part des déchets radioactifs qui ont été rejetés dans le lagon au cours de la tempête du 12 mars 1981 et d'autre part des retombées atmosphériques globales.

V.2 Vieillissement accéléré de l'atoll

Nos observations montrent, clairement, que le vieillissement accéléré de la couronne corallienne continue. Les essais pratiqués sous le lagon provoquent toujours des fissures et des éboulements qui touchent la pente externe de l'atoll. Les risques d'effondrement dans la zone sud ne sont pas exclus ; en effet des failles longitudinales très larges (1 à 2 mètres) entament sur plusieurs dizaines de mètres la partie supérieure de la pente externe.

* L'influence des explosions souterraines sur la structure du socle volcanique ne peux pas être observée visuellement. Il est clair que la perméabilité du socle volcanique est localement augmentée par les fractures provoquées par les tirs souterrains.

* *Le vieillissement prématuré et accéléré de l'atoll explique, certainement, en grande partie, le déplacement prochain des bases militaires présentes sur l'atoll de Fangataufa situé à quelques dizaines de milles de Mururoa.*

V.3 Risques de pollution radioactive à moyen et long termes

* L'évaluation des risques de pollution radioactive conduit à distinguer 3 types de radioéléments :

- *Les éléments radioactifs très volatils*, à durée de vie courte comme l'Iode et le Tritium, qui peuvent revenir en surface très rapidement (quelques jours) en s'échappant par le puits. Même si ces éléments ne sont pas considérés comme dangereux du fait de la brièveté de leur vie ou de leur non-incorporation dans la chaîne alimentaire, *leur présence dans l'eau du puits et dans le lagon doit être contrôlée systématiquement après un tir*, afin de s'assurer de l'étanchéité du bouchon et donc de la qualité du confinement.

- *Les éléments radioactifs à durée de vie moyenne* (trentaine d'années) et assez solubles pour qu'ils reviennent en surface alors que leur activité est encore importante, tels que le *Césium 137, le Strontium 90*. Ces éléments, mimétiques du potassium et du calcium, sont concentrés par les organismes vivants. Ils pourraient représenter un éventuel danger de contamination radioactive, *localisé autour de l'atoll*, si les quantités produites par les essais nucléaires souterrains étaient très supérieures à nos estimations et si leur retour était suffisamment rapide (inférieur à 100 ans).

La rapidité de ce retour dépend essentiellement de l'épaisseur de roches volcaniques saines comprises entre le haut de la cheminée d'effondrement et l'assise corallienne qui est suivant la puissance des tirs de 100 à 300 m. En effet, la cheminée dans laquelle les éléments radioactifs se retrouvent après l'explosion constitue un véritable boulevard vers la surface. Quant au socle corallien, il est traversé par des flux ascensionnels capables de transporter ces éléments en surface en 5 à 10 ans.

L'activité totale de ces produits de fission est inférieure à celle des mêmes produits de fission produits annuellement par une centrale nucléaire PWR de 900 MWe.

Cependant, les dosages que nous avons effectués confirment l'hypothèse du non retour actuel de ces éléments en surface.

- *Les éléments radioactifs à durée de vie longue, comme les différentes formes de Plutonium.* Les modalités du retour, si retour il y a, de ces éléments ne peuvent être raisonnablement estimées aujourd'hui à partir des informations qui ont été portées à notre connaissance. *Cependant, les propriétés physico-chimiques de ces éléments qui s'adsorbent très facilement rendent hypothétiques leurs retours vers le lagon.*

L'activité totale du plutonium contenu dans le basalte de l'atoll serait également inférieure à celle du plutonium produit annuellement par une centrale nucléaire PWR de 900 MWe.

* Après la Mission Tazieff de 1982 et celle du Pr Atkinson de 1983, la mission de la Fondation Cousteau était donc la troisième à être autorisée à pénétrer sur le site ultra protégé de Mururoa pour tenter d'évaluer les risques radiologiques à court, moyen et long termes des essais nucléaires souterrains français.

Les mesures effectuées sur place et nos observations sous-marines montrent que les risques de pollution radiologique à court et moyen terme sont négligeables.

A plus long terme, les risques sont plus difficiles à évaluer à partir des informations mises à notre disposition par le CEA.

ANNEXE 1

CHRONOLOGIE DES EVENEMENTS

20 JUIN 1987 : ARRIVEE A MURUROA ET INTERVIEWS

Arrivée sur l'atoll de Mururoa, déchargement du matériel, installation dans les chambres.

13 h 45 : Réunion avec Monsieur le Haut Commissaire Teillac, le Général Mermet, et les responsables du C.E.P. pour la mise au point du programme de prélèvements ; nombre et position des stations par rapport au point de tir dans le lagon ; nature et nombre des prélèvements.

15 h 00 : Interview et discussion filmées du Haut Commissaire Teillac et du Général Mermet autour d'un ancien point de tir souterrain. La discussion porte sur les conséquences des tirs, sur la géologie de l'atoll et sur le devenir des déchets radioactifs.

17 h 30 . Visite des laboratoires de géologie, puis de chim· · géochimie de la DIRCEN et du SMCB.

19 h 00 : Présentation du film sur Mururoa et les expérimentations atomiques.

22 JUIN 1987 : JOURNEE DES PRELEVEMENTS

A la fin de chaque station, les échantillons d'eau sont ramenés au laboratoire en vedette rapide, pour y être immédiatement traités.

06 h 45 : Préparation du matériel

09 h 00 : Station (1)

X = 710 993
Y = 7583 230

09 h 00 -> 09 h 08 Pompage de 2 x 200 litres d'eau de surface (station 1s)
09 h 42 -> 09 h 51 Pompage de 2 x 200 litres d'eau à 31 m (fond à 37 m) (station 1f)

Prélèvement de 3 x 1/2 litres de sédiments (à 37 m) (Sed 1)

09 h 51 : fin de station (1)

10 h 45 : Station (2)

X = 714 853
Y = 7580 230

Prélèvement de 3 x 1/2 litres de sédiments (à 48 m) (Sed 2)

11 h 30 : Station (3)

X = 716 553
Y = 7581 617

11 h 35 -> 11 h 45 Pompage de 2 x 200 litres par 35 m (fond 42 m) (station 3f)
11 h 52 -> 12 h 00 Pompage de 2 x 200 litres en surface (station 3s)

Prélèvement de 3 x 1/2 litres de sédiments par 42 m (Sed3)

12 h 43 Carottage (carotte)

13 h 00 Fin de station (3)

14 h 15 : Station (5)

Latitude : 21°48',18 Sud
Longitude:138°53',82 Ouest

14 h 20 -> 14 h 30 Pompage 2 x 200 litres d'eau en surface (station 5s)
14 h 35 -> 14 h 44 Pompage 2 x 200 litres d'eau par 35 m (fond 45 m) (station 5f)

14 h 50 Fin de station (5)

15 h 05 : Station (4)

X = 714 093
Y = 7586 418

Prélèvement de 3 x 1/2 litres de sédiments par 25 m (Sed 4)

16 h 00 -> 16 h 30 (?) : Plongée : Station (6)

Plongée sur l'épave de la barge qui a supporté le tir "Capella" en 1974. Observation, film et mesure à l'aide d'une chambre d'ionisation fournie par le CEA. Rien d'anormal, une épave riche en poissons. A notre sortie de plongée, nous sommes "passés au compteur" par mesure de sécurité.

16 h 36 : Station (7)

X = 721 167
Y = 7581 767

Prélèvement de 3 x 1/2 litres de sédiments par 15 m (Sed 7)

17 h 20 : Station (8)

X = 728 718
Y = 7584 372

Prélèvement de 3 x 1/2 litres de sédiments par 15 m (Sed 8)

Simultanément, un trait de plancton de 1 heure est effectué vers l'entrée de la passe, sans résultat car le filet se colmate.

Retour de Calypso à quai.

23 JUIN 1987

Départ de Calypso à l'aube (05h00 du matin). Simultanément, de 05h30 à 08h00, un trait de plancton est effectué avec un filet de 260 µm tracté par un Zodiac entre la bouée Alpha 6 et la passe. Ce prélèvement a été fractionné en 1 trait de 15 mn, 1 trait de 30 mn et 1 trait de 60 mn. Le collecteur a été vidé et nettoyé à la fin de chacun des traits.

10 h 00 -> 10 h 30 : Plongée

Plongée à l'entrée de la passe sur la pointe Sud.

14 h 00 -> 14 h 30 : Plongée

Plongée sur la pente externe de l'atoll dans la zone "Zoé", jusqu'à 30 m. Observation des failles et fractures qui entament le récif.

24 JUIN 1987

11 h 20 -> 12 h 00 : Plongée

Plongée sur la pente externe de l'atoll dans la zone "Zoé", jusqu'à 48 m. Observation des failles et fractures qui entament le récif.

Essais de la soucoupe.

25 JUIN 1987

13 h 00 -> 14 h 45 : Plongée de la soucoupe

Plongée de 90 minutes sur la pente externe du récif dans la zone "Zoé" jusqu' à 230 m.

Départ de Calypso pour les Gambiers.

22 AVRIL 1988

Confrontation des résultats des analyses effectuées sur les échantillons prélevés au cours de la mission de la Calypso dans l'atoll de Mururoa. Plusieurs personnalités scientifiques avaient été conviées à assister à cette réunion : le Professeur J.M. Martin et Monsieur A. Thomas de l'Institut de Biogéochimie Marine de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, le Professeur G. de Marsily, Directeur du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Monsieur F. Clapier physicien à l'Institut de Physique Nucléaire de l'Université Paris Sud.

ANNEXE 2

TRAITEMENT ET ANALYSE DES ECHANTILLONS

1. Prétraitement

Les échantillons de sédiments ont été séchés à 105°C, broyés et homogénéisés. Une quantité de 325 g a été placée dans les boites utilisées pour la spectrométrie gamma, et ajustée à une densité de 1 g/cm3 pour éviter des différences d'auto-absorption du rayonnement. L'échantillon de plancton a été étuvé, broyé et analysé directement par spectrométrie.

En ce qui concerne les échantillons d'eau, la phase particulaire en suspension a été éliminée par filtration tangentielle en continu à 0,45 micron, puis par filtration sur filtres Sartorius de 0,45 microns. Les filtrats ont été acidifiés à pH 1,5 par HCl concentré R.P. On a ajouté 25 mg/l de Fe 3+ comme entraineur. Des traceurs stables des principaux radioéléments ont été ajoutés à l'eau filtrée pour déterminer les rendements d'extraction : CoCl2, CsCl, BeSO4, EuCl3, ainsi que 1 dpm de Pu-242. Après agitation ces traceurs ont été laissés pour équilibration durant 10 à 40 heures. Deux types de précipitations ont été faites en séquence. Tout d'abord une précipitation des hydroxydes de fer avec NH4OH à pH 9. Les hydroxydes ayant entrainé la majeure partie des radioéléments (Pu, Eu, Co, Be) ont été récupérés par décantation, séchés à l'étuve à 105°C, broyés et homogénéisés. On a ensuite ajouté du molybdo-phosphate d'ammonium (AMP) à pH 2 pour extraire les isotopes du Césium. L'AMP a été récupéré par décantation, puis séché à l'étuve.

2. Analyses par spectrométrie gamma

Pour les radioéléments dissous, après étuvage et homogénéisation, les hydroxydes de fer et les AMP ont été mesurés apprès un délai de 46 à 112 jours (hydroxydes) et de 43 à 145 jours (AMP) de la même façon que les sédiments.

L'analyse des sédiments a été effectuée de façon non destructive à l'aide d'un détecteur en germanium hyperpur de 32 % d'efficacité ayant une résolution de 1,8 keV. Le détecteur est placé dans une enceinte d'environ 1 m3 en plomb de faible activité épaisse de 15 cm. La durée des comptages varie de 40 à 70 heures pour les sédiments et a dû être étendue à 5 jours pour l'échantillon de plancton dont la masse était très faible (1,4 g sec). En raison des délais d'acheminement des échantillons (plancton excepté), les comptages n'ont pu débuter dans le meilleur des cas que 37 jours après le prélèvement. Il en résulte que l'identification et le dosage des radioéléments de courte période (par exemple quelques jours) n'ont pu être effectués sur la totalité des échantillons sédimentaires.

Les rendements [illegible] pour les énergies supérieures à 120 keV (majorité des émetteurs gamma détectés) ont été établis par rapport à un standard interne et vérifiés par

ailleurs au cours de divers exercices d'intercalibration et d'intercomparaison avec l'A.I.E.A. Le calcul des activités en Ra-226 pose le problème d'une interférence possible avec le principal pic de l'Uranium-235. On a de ce fait adopté pour le pic à 186 keV une intensité gamma apparente de 7,53 % supérieure à l'intensité réelle du Ra-226 (3,28 %). Ce choix, qui s'est avéré satisfaisant dans des milieux sédimentaires très différents, n'est pas nécessairement justifié pour les carbonates et les teneurs réelles en Ra-226 pourraient donc être supérieures d'un facteur 2 à celles reportées ici.

Pour les énergies inférieures, les rendements sont extrapolés et une erreur systématique peut affecter les concentrations d'un petit nombre d'éléments comme l'Eu-155 (mesuré par le pic à 105 keV, et pour lequel par ailleurs des interférences possibles avec des radioéléments naturels n'ont pas été corrigées) et l'Am-241 (pic à 60 keV).

Les limites de détection ont été calculées à partir du continuum des spectres à l'endroit de la principale transition gamma du radioélément considéré, et corrigées de la décroissance radioactive. Pour les radioéléments de courte période, elles sont donc d'autant moins significatives (c'est-à-dire d'autant plus élevées) que le délai entre prélèvement et comptage s'accroit (cas de I-131 par exemple). Les erreurs reportées ne concernent que la statistique de comptage (± 1 écart type).

3. Isotopes du plutonium

a) Eaux

Les hydroxydes de fer (contenant de grandes quantités de sel) sont purifiés par plusieurs cycles de dissolution (par HCl concentré) et précipitation (par NH4OH concentré). Les hydroxydes de fer purifiés sont finalement dissous par HCl 9M et le plutonium est purifié par résines échangeuses d'ions anioniques DOWEX AG1 x8 100-200 mesh suivant le procédé adopté par Germain et al, (1987).

Les échantillons sont ensuite repris par une solution contenant de l'acide oxalique saturé (100 ml), et 200 mg de Ca2+ à pH 2 et le plutonium est coprécipité par NH4OH concentré sous la forme d'oxalate de calcium. Celui-ci est récupéré par centrifugation, dissous par HCL 6N et le cycle répété une deuxième fois, et le précipité est cette fois-ci filtré sur filtre Millipore 0,45 microns. Le filtre contenant l'oxalate de calcium est ensuite calciné dans un bécher en platine et redissous par HCl 6N. On ajoute ensuite du Fe3+ (5 mg) et les hydroxydes de fer sont précipités par NH4OH concentré. Le précipité est centrifugé, redissous par HCL concentré et le cycle est répété une deuxième fois. Le précipité d'hydroxydes de fer, après avoir jeté le décantat,

est finalement évaporé au bain-marie. Le plutonium contenu dans le précipité est ensuite purifié par 2 cycles de colonnes échangeuses d'ions (volume 1 ml) en utilisant la même résine que précédemment. La fixation du Pu se fait par un mélange HCl/HNO3 (10 ml HNO3 8M, 180 ml HCl concentré complété avec H2O à 250 ml) les colonnes sont lavées au moyen de HNO3 8M et de HCl concentré, le Pu est élué par un mélange HCl concentré et NH4I 0,1M. Le plutonium est finalement déposé sur un disque en inox par électrolyse d'après la méthode utilisée par Wong (1971).

b) Sédiments

Après ajout d'un traceur (2 dpm de Pu-242), le plutonium est extrait du sédiment (environ 1 g sec) à chaud par HCl 6N pendant environ 5 heures sous agitation (agitateur magnétique). On ajoute quelques ml de H2O2 au cours de la première heure de l'attaque.

Après extraction, on filtre les matières insolubles au moyen d'un filtre à membrane de 0,45 micron. Afin de vérifier l'efficacité de l'extraction dans le cas où il subsistait un résidu insoluble après l'attaque, l'analyse de l'échantillon S4 a été dupliquée en procédant à une minéralisation totale par un mélange de HNO3 et HClO4 concentrés et une nouvelle analyse du plutonium en utilisant du Pu-236 comme traceur. Cet essai a montré que le plutonium récupéré dans cette fraction est inférieur à 1 % de la quantité récoltée par l'extraction habituelle avec HCl 6N.

Le filtrat est amené à pH 9-10 par addition de NH4OH concentré et le plutonium est co-précipité avec les hydroxydes de fer. Après séparation par centrifugation, le précipité est dissous par HCl 6N et le plutonium est purifié par précipitation avec l'oxalate de calcium, séparation par résines échangeuses d'ions (volume 1 ml) et électrolyse d'après le procédé utilisé dans le cas des eaux.

Si les élutions ne s'effectuent pas de façon correcte, la mesure de la concentration en Pu-238 peut être faussée par une interférence avec des traces d'Am-241 incomplètement éliminé. L'analyse de l'échantillon S4 a donc été dupliquée après ajout de 2 dpm de traceur Am-243. Le rapport Pu-238/Pu-239+240 ainsi obtenu était identique à celui déterminé par la méthode courante, ce qui confirme bien la qualité de l'élimination de l'américium dans cette série d'analyses.

c) Plancton

L'échantillon a été totalement minéralisé à l'eau régale, puis traité comme précédemment.

ANNEXE 3

LA MISSION TAZIEFF DE 1982

LA MISSION ATKINSON DE 1983

I LA MISSION SCIENTIFIQUE FRANCAISE DE JUIN 1982

A la demande des autorités politiques françaises, une mission scientifique dirigée par Haroun Tazieff fut autorisée à se rendre sur le site de Mururoa et à assister à un tir nucléaire souterrain.

Etant donné la brièveté de la préparation, moins d'un mois, c'est une mission de caractère exploratoire qui fut organisée.

La mission était constituée de scientifiques français internationalement reconnus dans leur discipline.

La mission a séjourné à Mururoa du 26 au 28 juin 1982 et a assisté au tir du 27 juin.

Pendant ce séjour, les scientifiques ont pu pratiqué quelques expériences de contrôle et ont interrogé les responsables du CEA sur tous les sujets concernant les problèmes géologiques et hydrauliques, la surveillance radiologique du milieu physique et biologique, la radioprotection et le suivi médical du personnel.

I 1 Principales observations et recommandations de la mission Tazieff

Nous reproduisons ici les principales observations et recommandations publiées dans le rapport de H. Tazieff.

I.1.1 Contamination radioactive

- "*Des études approfondies* de composition de la flore et de la faune ont permis la mise en oeuvre *d'un programme remarquable de radioécologie qui montre sans ambiguïté l'innocuité de la contamination radioactive de toute la région*, et plus généralement sa faiblesse par rapport à ce qu'on mesure dans d'autres régions, et sa faiblesse par rapport à la radioactivité naturelle."

- "*Les contrôles d'eau de mer*, effectués dans le lagon et autour de l'atoll, *mériteraient d'être multipliés* et surtout effectués à différentes profondeurs. La connaissance de la courantologie locale devrait vraiment être améliorée."

- "*L'absence d'équipe scientifique chargée de piloter les programmes, d'interpréter et de publier les résultats (ou certains d'entre eux) se fait cruellement sentir.*"

- En ce qui concerne le confinement des produits radioactifs lors d'une explosion souterraine, "on ne peut pas exclure à priori que ceux *des produits radioactifs qui sont normalement gazeux, ou très volatils, puissent partiellement s'échapper de la cavité au moins jusqu'à l'atmosphère.* Or ces produits ne sont généralement pas recherchés, parce qu'ils sont particulièrement peu préoccupants du point de vue sanitaire, alors que leur absence constatée permettrait de confirmer l'étanchéité du dispositif, donc l'aspect non contaminant des explosions souterraines, au moins à court terme."

- "A plus long terme, il faut avouer qu'*on a peu de données sur les risques de migration des matériaux radioactifs jusqu'à l'environnement.*"

"Une recherche systématique des plus mobiles d'entre eux dans les eaux souterraines et dans l'eau de mer, pendant un certain nombre d'années, permettrait de s'assurer de la qualité du confinement."

- Le devenir des déchets de plutonium qui ont été remobilisés par une tempête en mars 1981 dans le milieu marin et notamment les sédiments devrait faire l'objet d'études complémentaires.

- *Il est constaté que les expériences ont eu pour premier effet un tassement non uniforme des sédiments pouvant provoquer des fissures de la dalle du platier.*

Le principal risque est donc de caractère hydraulique, ce qui a conduit à la construction de plateformes de sauvegarde, d'un mur de protection autour de la base Vie.

I.1.2 Contamination éventuelle de l'océan

- "*Il m'a été assuré que 99,9 % des produits de fission résultant d'un essai sont piégés dans le verre naturel* ("lave") engendré par les températures extrêmement élevées de l'explosion nucléaire. Je n'ai pu jusqu'ici entendre, de la bouche d'aucun expert en ce domaine, de démenti à cette affirmation, mais je vais chercher à m'informer davantage (Ce rapport est rédigé dans la semaine suivant notre retour)."

- "Les études effectuées par le CEA montrent que *la circulation convective souterraine est dirigée exclusivement de l'extérieur de l'île vers le lagon.*"

- *"La vitesse de circulation de l'eau vers 1000 m de profondeur est de l'ordre du mètre par an.* Les débits des eaux transitant par le point d'explosion sont donc extrêmement faibles et les dilutions élevées. Si lixiviation de produits dangereux il y a, des durées de parcours d'eaux, éventuellement transporteuses de radionuclides, de l'ordre du millier d'années depuis le verre-piège sont envisageables."

- *"Il serait néanmoins souhaitable de procéder à une série complémentaire de mesures portant, d'une part sur la vitesse des eaux souterraines aux profondeurs de tirs, d'autre part sur la chimie de ces eaux à hauteur des chambres de tir."*

I.1.3 Surveillance de l'environnement

- "Il nous paraît indispensable que soit réalisée dans un avenir immédiat une étude générale de l'environnement de Mururoa, d'une part, et de Fangataufa, d'autre part, sites qui n'ont pas été visités par les spécialistes depuis 1979.

I.1.4 Surveillance radiologique

- Le SCPRI (Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants), dépendant du Ministère de la Santé dirigé par le Professeur P. Pellerin a été désigné depuis 1969 comme centre international de référence pour la radioactivité par l'Organisation Mondiale de la Santé, et en particulier son service organise des intercomparaisons régulières sur la radioactivité de prélèvements de natures diverses avec les services de surveillance du CEP.

Les résultats des intercomparaisons sont :

- "La radioactivité artificielle que l'on observe en Polynésie dans la chaine alimentaire est faible, généralement même inférieure à celle que l'on mesure dans l'hémisphère Nord."

- "L'activité artificielle moyenne pour les poissons est, pour l'ensemble des îles, de l'ordre de 10 picocuries par kilogrammes frais, ce qui est inférieur aux activités trouvées dans les poissons de Méditerranée.

I.1.5 Physico-chimie et radioactivité de l'atmosphère

- Le Pr Lambert note *"qu'une partie non négligeable des produits de fission sont des gaz rares (krypton et xenon) qui sont susceptibles de gagner la surface du sol progressivement". "L'absence de ces nucléides malgré une recherche systématique dans l'atmosphère, mais surtout dans l'eau qui remplit le puits du tir, indiquerait un excellent confinement."*

- "Une recherche des aérosols radioactifs au voisinage immédiat et sous le vent du puits devrait être beaucoup plus sensible que le dispositif actuel."

- "Comme dans le cas des produits de fission gazeux, le radon est susceptible d'atteindre l'eau du puits et éventuellement l'atmosphère libre. Une recherche systématique de ce nucléide permettrait de conclure à la présence ou à l'absence de communications entre l'environnement et, cette fois-ci, la cheminée (et non plus la chambre de tir)."

- "D'une façon plus générale, il me semble qu'il existe, à l'heure actuelle, un hiatus entre les programmes du SMCB chargé de suivre l'environnement biologique, et du SMSR à qui revient l'étude du milieu physique et qui devrait être en mesure d'évaluer les quantités de radioactivité introduites dans l'environnement, même si celles-ci doivent se révéler non significatives au point de vue sanitaire."

- "Ces diverses insuffisances apparaissent clairement à propos des résidus de plutonium dispersés par la tempête de mars 1981 (cf paragraphe V.5.2.b). On constate leur relative inocuité dans le milieu biologique (bien que seules les valeurs de Pu 239 soient prises en compte), on contrôle, on décontamine les plages localement, mais on ignore les quantités introduites dans l'environnement, leur taux de solubilisation et leurs cheminements possibles."

- *"De plus, il est regrettable qu'il n'existe à peu près aucun programme utilisant comme traceurs géologiques ou hydrauliques les produits radioactifs fabriqués ou libérés par les explosions nucléaires, programme qui permettrait de vérifier en permanence l'étanchéité du sous-sol de l'atoll."*

I.1.6 Le problème des contrôles systématiques

Le Pr Vie Le Sage, spécialiste des aérosols atmosphériques, relève :

- *"L'absence d'investigations systématiques sur l'eau du puits de tir est regrettable."*

- "La faiblesse de la stratégie en cas d'incident de tir entrainant une contamination de l'atmosphère."

- D'autre part, "l'entrainement de 10 à 20 kg de plutonium provenant des précédentes expérimentations aériennes, lors de la tempête de mars 1981, ne semble pas avoir fait l'objet d'études très particulières."

I.2 Remarques sur la Mission Tazieff

- H. Tazieff déclara que son rapport était le résultat d'une mission exploratoire et "les différentes observations contenues dans ce rapport devront être prises en compte pour définir le programme de la mission longue durée qui doit faire suite à cette mission exploratoire."

Malheureusement, *aucune mission "longue durée" n'a suivi la Mission Tazieff. on notera le caractère également exploratoire de la mission de la Calypso qui s'est déroulée 5 ans après celle de Tazieff et pratiquement dans les mêmes conditions.*

- *Aucune information n'est donnée sur l'activité totale confinée dans le basalte, sur la profondeur des tirs en fonction de la puissance, sur l'épaisseur du basalte sain au dessus de la zone fracturée.*

- *On peut remarquer que le Pr Pellerin annonce des valeurs moyennes de la radioactivité artificielle. Il ne faudrait pas oublier les risques liés à une concentration ponctuelle et locale.*

A la suite de la mission Tazieff, un certain nombre de dispositions ont été prises afin de prévenir les conséquences humaines d'un raz de marée. Les nucléides les plus volatils comme le krypton sont systématiquement recherchés dans l'eau du puits de tir. Des mesures in situ de la perméabilité du basalte sain au dessus de la zone fracturée par des essais nucléaires ont été entreprises.

II LA MISSION SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE D'OCTOBRE 1983

En octobre 1983, une mission composée de scientifiques étrangers se rendit en Polynésie Française et en particulier sur l'atoll de Mururoa. *Cette mission représentait la Nouvelle Zélande, l'Australie et la Nouvelle Guinée et était présidée par Mr Atkinson.* Les objectifs de cette mission étaient les suivants :

- *L'établissement de l'impact radiologique des anciens essais nucléaires atmosphériques.*
- *Connaître la géologie et l'hydrologie de Mururoa et évaluer les modifications du sous-sol à la suite des expérimentations souterraines.*
- *Analyser la possibilité de migration ou de fultes de produits radioactifs.*
- *Estimer les flux de radioéléments sortant de l'atoll.*
- *Comparer l'atoll de Mururoa aux sites de stockage de grande activité.*
- *Etudier la gestion des déchets radioactifs à Mururoa.*

II.1 Les conclusions de la mission Atkinson

a) Les doses maximales annuelles dans les îles du Pacifique dues aux retombées radioactives des expérimentations atmosphériques sont restées inférieures au 1/10e de l'exposition annuelle moyenne due à la radioactivité naturelle dans le monde. *Les doses annuelles actuelles sont 0,5 % environ du bruit de fond naturel en Nouvelle Zélande et à Tahiti, et un peu moins aux Fidji.*

b) Les niveaux de la radioactivité ambiante sur la zone des installations de la base-vie de l'atoll de Mururoa, sont en général inférieurs à ce qu'ils sont dans le reste du monde et les traces de retombées dues aux expérimentations atmosphériques ne sont décelables qu'à des niveaux très en dessous de ceux significatifs pour la santé.

c) Les doses de radiations reçues par la population de la Polynésie Française dues à la radioactivité naturelle et aux retombées radioactives sont inférieures à la moyenne mondiale, et ne conduisent pas à s'attendre à ce que des maladies induites par des radiations soient décelables.

d) Les statistiques de cancer dans la région ne comportent aucun élément suggérant qu'il y ait des taux élevés pour les types de cancer qui pourraient être associés à des expositions excessives de retombées radioactives.

e) L'intégrité de la structure des calcaires coralliens formant la partie supérieure de l'atoll de Mururoa a été altérée par fissuration, tassement et glissement sous-marin.

f) La variation dans l'épaisseur et la composition de la zone de transition jette un doute sur son aptitude à se comporter soit comme une barrière pour la migration des radionucléides, soit pour amortir et canaliser l'énergie sismique due à l'explosion nucléaire.

g) Le massif volcanique dans lequel ont lieu les expérimentations a été sévèrement modifié dans les zones entourant les cavités de l'explosion. L'examen des données disponibles conduit à penser que l'intégrité de l'ensemble du massif volcanique n'a pas été affectée.

h) A ce jour, il n'y a pas d'indication géologique de [illegible] *court terme.* L'hydrologie des calcaires et des terrains volcaniques est telle que l'on peut supposer que *des migrations se produiraient depuis les cavités de l'explosion dans un délai de cinq cents à mille ans.*

i) Une migration des produits de fission volatils et gazeux se produit au moment du tir depuis la cavité de l'explosion. Il y a des raisons de penser que les quantités sont plus importantes que celles que l'on s'attendrait simplement à trouver à travers un bourrage de puits de tir "pas tout à fait parfait".

j) Sur les sites d'essais souterrains, de l'eau est susceptible de lixivier les matériaux radioactifs (qui peuvent être assimilés à des déchets de haute activité). *Il y a des mécanismes de transfert de cette eau contaminée vers la biosphère, tout au moins à long terme (plus de 500 ans).* La conséquence radiologique de cette migration dépend, d'une manière importante, de la profondeur des tirs et de leurs emplacements relatifs. Les détails précis des emplacements ne sont pas connus.

k) La gestion des déchets était insuffisante. Elle est maintenant très bonne. Seules de faibles quantités de radioactivité sont régulièrement éliminées et elles ne sont pas significatives du point de vue radiologique.

l) Il y a des transferts de plutonium dissous du lagon vers l'océan. Cela n'est que d'une importance radiologique mineure. *La mission n'a pas été en mesure de vérifier la présence de 10 à 20 kg de plutonium dans les sédiments du lagon ni de déterminer leur provenance.*

II.2 Remarques sur la mission Atkinson

* *Le Pr Atkinson notait le caractère exploratoire de sa mission.*

* Les scientifiques de la mission furent autorisés à effectuer une seule expérience in-situ qui montra *un niveau élevé de tritium dans l'air contenu dans les terrains superficiels.* Les deux explications envisagées étaient :

- *Fuites* à travers le bouchon du puits de forage.

- *Un temps de remontée des radioéléments* vers la surface plus rapide que celui calculé à partir de la vitesse de circulation de l'eau de 1 m/an et d'une marge de basalte sain de 500 m.

Le CEA et la DIRCEN critiquèrent ces deux explications. Toutes les expériences entreprises par le C.E.A. pour retrouver du tritium dans l'air contenu dans les terrains superficiels échouèrent.

* L'hypothèse de 100 mégatonnes d'énergie de fission comme étant la somme des énergies de tous les tirs susceptibles d'être exécutés dans l'atoll semble largement surévaluée au regard des explosions déjà effectuées dans le passé. Ceci conduit à surévaluer considérablement les activités qui pourraient être stockées dans le basalte : *le chiffre d'une activité de 100 millions de Curies provenant des produits de fission et d'activation est peu vraisemblable.*

* Les 4 carottes prélevées à une profondeur supérieure à 550 m analysées par le Bureau des Ressources Minérales de Camberra ne pouvaient pas être représentatives de la complexité géologique de l'atoll. *Les résultats des mesures de perméabilité et de porosité montrent la grande hétérogénéité du sous-sol de l'atoll* (la perméabilité intrinsèque varie de 0,005 à 29 milliDarcy).

* Les conclusions du rapport se veulent rassurantes en ce qui concerne l'impact radiologique des essais atmosphériques. Le contenu du rapport lui-même l'est moins. *En effet, les rédacteurs du rapport montrent l'énorme difficulté rencontrée pour mener à bien des études épidémiologiques lorsque les données initiales sont incomplètes.*

ANNEXE 4

BIBLIOGRAPHIE

ANDRA "Paramètres relatifs à un combustible irradié dans un réacteur EP" - Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs.

Atkinson H.R. 1984 - "Report of a New Zeland, Australia, Papua New Guinea Scientific Mission to Mururoa Atoll" - Published by the Ministry of Foreign Affairs, New Zeland.

Buigues D. 1982 - "Sédimentation et diagénèse des formations carbonatées de l'atoll de Mururoa, Polynésie Française" - Thèse 3ème cycle, Orsay.

Buigues D. 1985 - "Principaux facies et leur répartition dans l'atoll de Mururoa" - Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress, Tahiti.

Cambray R.S. et al. 1987 - "Observations on radioactivity from the Chernobyl accident" - Nuclear Energy, 26(6), 77)101.

CEA- DIRCEN 1984 - "Les essais nucléaires français" - Commissariat à l'Energie Atomique et Direction des Centres d'Expérimentations Nucléaires.

CEA-DIRCEN 1986 - "Activité volumique de l'eau de mer en Cs-137 aux abords de Mururoa et dans l'océan Pacifique".

Chevalier J.B. 1973 - "Geomorphology and geology of coral reefs in French Polynesia" - Biology and Geology of Coral Reefs - Academic Press Inc.

Costello J.M. 1983 - "High level radioactivity waste disposal"

Germain P. et Gueguemiat P. - "Measurement of transuranic elements, chiefly 237-Np (by neutron activation analysis), in the physical and biological comportments of the French shore of the English Channel" - J. Environ, Radioactivity 5 (1987), 319-331.

Greenpeace, 1985 - "Nuclear Testing at Mururoa" - New Zeland.

IAEA, 1985 - "Sediment Kds and concentration factors for radionuclides in the marine environment"; IAEA, Technical report series n°247, STI/DOC/10/247, 73 p.

Livingston H.D., Mann D.R., Casso S.A., Schneider D.L., Surprenant L.D. & Bowen V.T., 1987 - "Particle and solution phase depth distribution of transuranics and 55-Fe in the North Pacific". J. Environ. Radioactivity, 5, 1-24.

McMurphy G.M., Schneider R.C., Colin P.L., Buddemeier R.W. & Suchanek T.H., 1985 - "Redistribution of fallout radionuclides in Enewetak atoll lagoon sediments by callianassid bioturbation" - Nature, 313, 674-677.

Marsily G. de, Lepoux E, Barbreau A., Margat J. - "Nuclear waste disposal : can the geologist guarantee isolation ?" - Science Vol 197, August 5, 1977.

Martin J.M. et Thomas A., 1988 - "Contamination radioactive de l'environnement par les Centrales Nucléaires" - Colloque "Nucléaire, Santé, Sécurité" - Montauban janvier 1988.

Nagaya Y. & Nakamura K., 1981 - "Artificial radionuclides in the Western Northwest Pacific (1) 90-Sr and 137-Cs in the deep waters" J. Oceanogr. Soc. Japan, 37(3), 135-144.

Noshkin V.E., 1980 - "Transuranium radionuclides in components of the benthic environment of the Enewetak atoll" p.578-601 in "Transuranic elements in the environment", W.C. Hanson editor, Techn. Inf. Center / U.S. Dept. of Energy, Springfield, Va, USA.

Perkins R.W. & Thomas C.W., 1980 - "Worldwide fallout," p.53-82 in "Transuranic elements in the environment" W.C. Hanson editor, Tech. Inf. Center / U.S. Dept. of Energy, Springfield, Va, USA.

"Radioactivity in the South Pacific" UNEP Regional Seas Report and Studies n° 40, SPC/SPEC/ESCAP/UNEP.

Rougerie F., Ricard M. & Mazaury E., 1984 - "Le lagon de l'atoll de Mururoa" - Rapport CEA-R-5236.

Schell W.R., Lowman P.G. & Marshall R.P., 1980 - "Geochemistry of transuranic elements at Bikini atoll" M. 541-577 in "Transuranic elements in the environment" W.C. Hanson editor, Techn. Inf. Center / U.S. Dept. of Energy, Springfield, Va, USA.

SIPRI 1981 - "Nuclear radiation in Warfare".

Talandier J. & Kuster G.R., 1976 - "Seismicity and submarine volcanic activity in French Polynesia" J. Geophys. Res. 81, 936.

Tazieff H. 1982 - "Rapport d'Haroun Tazieff sur l'ensemble de la Mission Scientifique en Polynésie Française".

UNSCEAR 1982 - "Rayonnements ionisants : sources et effets biologiques" - Nations Unies, New York.

Wong K.M. "Radiochemical determination of plutonium in sea water, sediments and marine organisms" Anal. Chim. Acta 56, 355-364 (1971).

Young J.A. & Silker W.B., 1980 - "Aerosol deposition velocities on the Pacific and Atlantic oceans calculated from 7-Be measurements" Earth Pl. Sci. Letters, 50, 92-104.

ANNEXE 5

DEFINITIONS ET UNITES

Activation : Des éléments chimiques deviennent "radioactifs" lorsqu'ils sont exposés à des radiations, en général des neutrons.

Activité : Nombre de désintégrations nucléaires spontanées qu'une source radioactive subit par unité de temps.

L'unité internationale est le Becquerel (Bq) qui représente une désintégration par seconde.

Une autre unité couramment utilisée est le Curie (Ci) égale à $3,7 \times 10^{10}$ désintégrations par seconde.

1 Ci = $3,17 \times 10^{10}$ Bq
1 Bq = 27×10^{-12} Ci
1 TBq = 27 Ci
1 Bq/m³ = 27 fCi/l

Adsorption : Pénétration superficielle d'un gaz ou d'un liquide dans un solide.

Dose absorbée : La dose absorbée représente l'énergie cédée par unité de masse à la matière par les rayonnements ionisants.

La dose absorbée est mesurée en Gray (Gy). 1 Gy représente 1 Joule par kilogramme.

Une autre unité est encore parfois utilisée, le Rad égal à 1/100 de Gray.

Equivalent de dose : L'équivalent de dose représente la transposition biologique de la dose absorbée.

L'équivalent de dose est mesuré en Sievert (Sv). 1 Sv représente 1 Joule par kilogramme.

Une autre unité est encore parfois utilisée, le Rem égal à 1/100 de Sievert.

Fission : Processus dans lequel lors d'un bombardement de neutrons un noyau d'atome lourd (uranium, plutonium, etc) éclate en plusieurs fragments, généralement deux, plus légers, en libérant une énorme quantité d'énergie et plusieurs neutrons.

Fusion : Processus dans lequel plusieurs atomes légers, en particulier des isotopes de l'hydrogène, deutérium et tritium, se combinent en des atomes plus lourds en dégageant une grande quantité d'énergie.

Multiples : peta (P) : 10^{15} ; tera (T) : 10^{12} ; giga (G) : 10^{9} ; mega (M) : 10^{6} kilo (k) : 10^{3}

et
sous-multiples : femto (f) : 10^{-15} ; pico (p) : 10^{-12} ; nano (n) : 10^{-9} ; micro (µ) : 10^{-6} milli (m) : 10^{-3}

Perméabilité : Caractéristique des corps poreux de se laisser traverser par des gaz ou des liquides.

L'unité de perméabilité est le milliDarcy.

Période : La période d'un produit radioactif : est le temps au bout duquel l'activité de ce produit se réduit naturellement de moitié.

Porosité : Pour un matériau, la porosité représente le rapport du volume des vides au volume total.

Radioactivité : Représente la désintégration spontanée du noyau d'un atome avec l'émission de particules ou de rayonnements électromagnétique.

Radiation : Des éléments émettent lorsqu'ils se désintègrent des radiations.
Radiations α : émissions de noyaux d'hélium. Rayonnement peu pénétrant.
Radiations β : émission d'électrons. Rayonnement moyennement pénétrant.
Radiations γ : onde électromagnétique Rayonnement très pénétrant.

Radioéléments : Les principaux radioéléments qui apparaissent dans ce rapport sont : tritium (Tr), potassium (K-40), radium (Ra-226), actinium (Ac-228), beryllium (Be-7), argent métal (Ag-100 m), americium (Am-241), cerium (Ce-144), cobalt (Co-58 ou Co-60), césium (Cs-137 ou Cs-134), europium (Eu-155), iode (I-131 ou I-129), ruthénium (Ru-106), antimoine (Sb-125), zirconium (Zr-95), plutonium (Pu-238, Pu-239+240).

TNT : L'équivalent TNT est généralement donné en kilotonnes (kt) ou mégatonnes (Mt).

1 kt correspond à une énergie de $4,18 \times 10^{12}$ Joules.

-o-o-o-o-o-o-